

Wasserstoffrecht

Wende / Otto

2026

ISBN 978-3-406-83540-7

C.H.BECK

schnell und portofrei erhältlich bei
beck-shop.de

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de steht für Kompetenz aus Tradition. Sie gründet auf über 250 Jahre juristische Fachbuch-Erfahrung durch die Verlage C.H.BECK und Franz Vahlen.

beck-shop.de hält Fachinformationen in allen gängigen Medienformaten bereit: über 12 Millionen Bücher, eBooks, Loseblattwerke, Zeitschriften, DVDs, Online-Datenbanken und Seminare. Besonders geschätzt wird beck-shop.de für sein umfassendes Spezialsortiment im Bereich Recht, Steuern und Wirtschaft mit rund 700.000 lieferbaren Fachbuchtiteln.

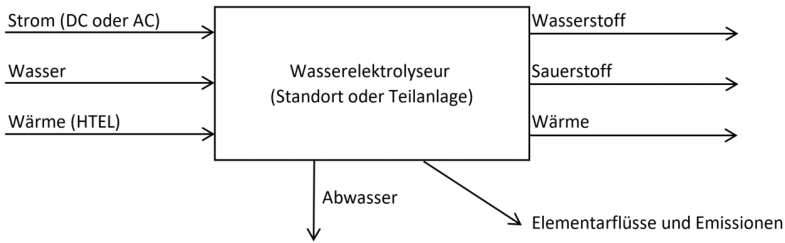
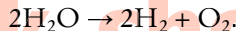


Abb. 3.8: Abstrahierung eines auf Wasserelektrolyse basierenden Produktionsstandortes auf Grundlagen von Massen- und Energiebilanzen: Je nach verwendeter Technologie (Hochtemperaturelektrolyse) kann neben Strom und Wasser auch eine (Hochtemperatur-)Wärmequelle genutzt werden. Als Produkte werden Sauerstoff und Wasserstoff und in aller Regel auch Wärme (auf niedrigem Temperaturniveau) frei. Bedingt durch die Notwendigkeit das zugeführte Wasser aufzubereiten, fällt oftmals ein Abwassermassenstrom mit erhöhter Salzfracht an. Als Emission ist vor allem Schall zu nennen. Elementarflüsse wiederum sind direkt mit der Umgebung ausgetauschte Ströme.

Quelle: Eigene Darstellung.

Als **Wasserelektrolyse** wird die Spaltung von Wasser H_2O in Wasserstoff und O_2 unter einem von außen aufgeprägtem elektrischem Strom verstanden. Die Nettoreaktionsgleichung ergibt sich zu:



Erst die Entwicklung geeigneter Stromquellen im Ende des 18. Jahrhunderts erlaubte 1789 erstmal die Wasserstoffproduktion durch den Einsatz **elektrischer Energie**.³⁹ Dabei wird sich zu Nutze gemacht, dass es sich bei oben genannter Zersetzungsgleichung des Wassers um eine sogenannte Redox-Reaktion, eine Elektronenübertragungsreaktion, handelt. Im chemischen Sinne werden dabei Elektronen vom im Wassermolekül enthaltenen Sauerstoff auf den Wasserstoff übertragen, welcher dadurch als Wasserstoffgas H_2 frei wird. Die Elektronenübertragung findet dabei durch die von außen angeschlossene Stromquelle statt, welche gleichzeitig die für die Zersetzung notwendige Energie liefert.

Bis heute sind verschiedene Technologien zur apparativen Umsetzung entwickelt worden, wobei technisch relevant heute die folgenden vier sind:

- Alkalische Elektrolyse (AEL)
- PEM-Elektrolyse („proton exchange membrane“)

³⁹ Smolinka/Bergmann/Garche/Kusnezoff, The history of water electrolysis from its beginnings to the present, 2022.

- Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL oder auch SOEL genannt; „solid oxide electrolysis“), jedoch heute im großtechnischen Maßstab noch von untergeordneter Bedeutung.
 - Alkalische Membranelektrolyse (AEM), heute nur in kleinem Maßstab verfügbar (< 1 MW).
- 48 Auch wenn die elektrochemischen und physikalischen Vorgänge in den **Zellen** sich zum Teil signifikant unterscheiden, so sind allen Technologien der Strom- und Wassereinsatz gemein. Da das Verständnis der elektrochemischen und physikalischen Vorgänge im Detail für eine rechtliche Betrachtung eine stark untergeordnete Rolle spielen, sei im Folgenden lediglich auf den typischen Anlagenaufbau und die nach außen hin (dh über die Anlagengrenze hinaus) relevanten technologischen Eigenschaften und Unterschiede eingegangen.
- 49 Hinsichtlich der rechtlich relevanten technologischen Unterschiede sei erwähnt, dass die HTEL den Vorteil bietet, dass als Energiequelle zusätzlich zur elektrischen Energie ein gewisser Anteil an **Hochtemperaturwärme** genutzt werden kann, während die anderen Technologien eine **Abwärmenutzung** auf niedrigem Temperaturniveau grundsätzlich ermöglichen. Jedoch ist das Temperaturniveau mit $< 60^\circ\text{C}$ derart gering, dass lediglich eine Raumwärmebereitstellung in Frage kommt. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es nur wenige Projekte mit Demonstrationscharakter, welche eine Abwärmenutzung vorsehen. Ein weiteres zu erwähnendes technologisches Merkmal ist die Verwendung von einer 20–40 prozentigen Kaliumhydroxid-Lösung (seltener: Natriumhydroxid) in alkalischen Elektrolyseuren, da die Verwendung an diese alkalischen Laugen besondere Anforderungen hinsichtlich Sicherheits- und Genehmigungsvorschriften birgt.

Abkürzung	AEL	PEM	HTEL/SOEC
Technologiebezeichnung	Alkalische Wasserelektrolyse	Polymerelektrolyst-Wasserelektrolyse	Hochtemperatur-Wasserelektrolyse
Technologie- reifegrade	weitestgehend ausgereift	weitestgehend ausgereift	Prototypen im Einsatz
realisierte Anlagengrößen	1–100 MW	1 kW–20 MW	1–50 kW
Vorteile		hohe Teillastfähigkeit	Nutzung von Hochtemperatur- abwärme
	lange Haltbarkeit		hohe Effizienz möglich
		hohe Gasreinheiten	

Abkürzung	AEL	PEM	HTEL/SOEC
Nachteile	Aufwendigerer Betrieb (Lauge)	Edelmetallkatalysatoren	wenig dynamisch
	geringfügig höherer Platzbedarf	PFAS-Membranen	schlechte Temperaturwechselverträglichkeit
		Reinstwasserbedarf	

Tabelle 3.1: Vergleichende Gegenüberstellung der verschiedenen Technologien zur Wasserelektrolyse. Die alkalische Membranelektrolyse (AEM) ist nicht dargestellt. 50

Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man einen Wasserstoffproduktionsstandort, so lässt sich folgender allgemeingültiger Aufbau festhalten: 51

- **Elektrolysezelle:** kurz auch nur Zelle genannt, ist die kleinste Einheit, in der Wasserstoff und Sauerstoff getrennt produziert werden können
- **Stack:** auch Zellstack oder Zellstapel genannt, ist die apparative Einheit, in welcher mehrere Zellen (ca. 50–500) zusammen geschaltet werden und die einem Plattenwärmeüberträger ähnelt
- **Elektrolyseur:** auch Elektrolyse-System oder Elektrolyseprozess genannt, für sich alleine funktionierende Einheit/verfahrenstechnische Anlage bestehend aus Stacks, Stromaufbereitung, Teilanlagen zur Kühlung, Gasabtrennung und -abfuhr, Wasseraufbereitung, Prozessleitsystem, Mess-, Steuer- und Regelsysteme, Sicherheitssysteme etc
- **Produktionsstandort:** vollständiger Standort, welcher weitere Anlagen enthält, welche den produzierten Wasserstoff entsprechend der Anwendung aufbereiten, bspw. Gastrocknungen, Kompressoren, Speichertanks, Trailerabfüllanlagen oder Gasnetz-Einspeiseanlagen

Es sei angemerkt, dass im allgemeinen Sprachgebrauch der Begriff **Elektrolyseur** nicht immer gleich verwendet wird. Beispielsweise ob die Gas- und Wasseraufbereitung dem Elektrolyse-System oder dem übergeordneten Standort (beispielsweise, weil mehrere Elektrolyse-Systeme gemeinsam versorgt werden) zugeordnet werden, kann kontextabhängig sein. Für eine genauere Auflistung der Bestandteile sei auf Tsotridis/Pilenga⁴⁰ verwiesen. 52

⁴⁰ Tsotridis/Pilenga, EU harmonised terminology for low temperature water electrolysis for energy storage applications. data.europa.eu/doi/10.2760/138987.

E. Wasserstoffspeicher

- 53 Wasserstoff hat auf Grund seiner geringen Dichte nur einen sehr geringen **volumetrischen Energieinhalt** im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen (vgl. → Rn.29). Somit entsteht das Problem der **Speicherung** hauptsächlich für Transport oder Vorratshaltung. Um die bestehenden – für fossile Kraftstoffe funktionierenden – Systeme in Transport und Lagerung sinnvoll beurteilen zu können, sollte die mit fossilen Kraftstoffen darstellbare volumetrische Energiedichte in Betracht gezogen werden. Diese wäre für flüssige fossile Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel ca. 9–10 kWh/l und für gasförmige fossile Kraftstoffe wie Erdgas ca. 8–12 kWh/m³. Bei Wasserstoff ist mit dem aktuellen Stand der Technik mit maximal 2–2,5 kWh/l in physikalisch oder chemisch gebundener Form bzw. in Reinform bei Druck- oder Tieftemperaturspeicherung und mit ca. 3 kWh/m³ (0,003 kWh/l) bei Umgebungsbedingungen zu rechnen.⁴¹

I. Speicherung in Reinform

- 54 Um Wasserstoff in **Reinform** zu speichern, bietet sich die Veränderung von Druck und Temperatur an, um die Dichte zu erhöhen. Der **Phasenwechsel** zu flüssigem Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen erfolgt bei 20 K oder -253 °C. Diese Art der Speicherung wird Kryogen- oder Tieftemperaturverflüssigung (LH₂ – liquid hydrogen) genannt. In flüssiger Form ist Wasserstoff eine klare farblose Flüssigkeit mit einem Gewicht von ca. 70,8 g/l und einem Energieinhalt von 2,24 kWh/l. Die **kryogene Speicherung** ist wegen der benötigten Kühlleistung und der notwendigen Isolation relativ teuer und energieintensiv. Angewendet wird sie hauptsächlich in der Raumfahrt.⁴² Im Mobilitätssektor haben ua General Motors mit Brennstoffzellentechnologie und BMW mit Verbrennungsmotoren mit flüssigem Wasserstoff Versuchsfahrzeuge betrieben.⁴³ Allerdings hat sich bisher die kryogene Wasserstoffspeicherung im automobilen Sektor nicht durchsetzen können. Auf Grund des relativ geringen Gewichts und des niedrigen Druckniveaus wird die kryogene Speicherung von Wasserstoff als Option für die Luftfahrt diskutiert. An dieser Stelle sei noch auf den sogenannten **Boil-off-Effekt** hingewiesen, welcher zu

⁴¹ Bundesverband Geothermie, Brennwert, www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/b/brennwert.

⁴² DLR Innospace, Aus Sonne und Wind wird Wasserstoff, www.dlr-innospace.de/innospaceexpo/W&A/Home/content/wasserstoff.html.

⁴³ BMW Group, Vorreiter in der Wasserstoffforschung, www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2024/wasserstoff-geschichte.html.

(Speicher-) Verlusten bei der Lagerung von Flüssigwasserstoff führt: Da der Wasserstoff im siedenden Zustand bei tiefer Temperatur vorliegt, führt der nicht zu vermeidende Wärmefluss aus der Umgebung in den Tank zum Verdampfen des flüssigen Wasserstoffs. Um einen Druckanstieg im Tank zu vermeiden, muss also beständig gasförmiger Wasserstoff abgelassen werden. Kann dieser nicht genutzt werden (zB wenn ein Fahrzeug nicht in Betrieb ist), so muss in die Umgebung abgelassen werden. Dieser Effekt wird leider weitläufig mit der für Speicher nicht relevanten **Diffusion** durch Behälterwände hindurch verwechselt und auch mit der geringen Größe des Wasserstoffatoms begründet. Beides ist falsch.

Alternativ zur kryogenen Speicherung kann man Wasserstoff **55** unter **Hochdruck** speichern. Üblich sind Drücke von 200–1000 bar. Die volumetrische Energiedichte bewegt sich je nach Druckniveau zwischen 0,5 und 2,5 kWh/l. Aktuell wird in der Regel im mobilen Sektor mit 700 bar und im stationären Sektor mit 300–350 bar gearbeitet. Gespeichert wird in Gasbehältern. Dies sind in der Regel Stahlflaschen. Nachteil dieser Art der Speicherung sind das hohe Gewicht (125 kg/50 l Flaschenvolumen inklusive Füllung)⁴⁴ und die hohen Kosten. Gerade im mobilen Einsatz und im Transport spielen diese Faktoren eine große Rolle. Grund hierfür sind die mit steigender Masse steigenden Fahrwiderstände und damit die zu erwartende Verbrauchserhöhung sowie die nachteilige Wirkung hoher Anschaffungskosten. Deswegen gibt es einen hohen Innovationsschub auf diesem Gebiet der Speicherung bezüglich des Flaschenmaterials.⁴⁵ Als Alternativen zur reinen Stahlflasche (Typ 1) sind nach der HyPA (Hydrogen Partnership Austria) drei weitere Typen möglich:

- Metallische Wandung mit einer Ummantelung aus harzgetränkter Glas- oder Kohlefaser im zylindrischen Teil der Gasflasche (Typ 2).
- Kohlefaserbehälter mit innenliegendem Stahl- oder Aluminiumliner (Typ 3)
- Kohlefaser-Kunststoffbehälter (Typ 4)

Der Vollständigkeit halber seien noch die Möglichkeiten Slush **56** (Wasserstoff im Aggregatzustand fest) und Kryo-komprimiert (Mix aus Temperaturabsenkung und Druckerhöhung) erwähnt.

Die Speicherung in **Kavernen** ist eine weitere Option. Der Vorteil **57** ist das große Speichervolumen, jedoch kommen dafür bisher nur

⁴⁴ HyPA, Zur Speicherung von Wasserstoff, www.hypa.at/news/zur-speicherung-von-wasserstoff.

⁴⁵ HyPA, Speicherung von Wasserstoff, www.hypa.at/fileadmin/11_hypa/fact_sheets/hypa-fact-sheet_speicherung_von_wasserstoff_juni_2023.pdf.

Salzkavernen und geleerte Erdgasfelder in Betracht. Ein Beispiel für diese noch in der Entwicklung stehende Technologie ist das vom Klimaministerium über die FTI-Initiative „Vorzeigeregion Energie“ des Klima- und Energiefonds geförderte Projekt „Underground Sun Storage“.⁴⁶ In diesem Zusammenhang sei auf die beträchtlichen Vorkommen von weißem Wasserstoff hingewiesen (vgl. → Rn. 9). Sollten sich diese gerade auch im Zusammenhang mit der Regenerationsfähigkeit des natürlichen Wasserstoffs beweisen, käme die Lagerung von Wasserstoff in Kavernen nur noch bedingt in Frage.

II. Speicherung physikalisch (an Festkörper gebunden)

- 58 Wasserstoff kann in einem festen Trägermedium gespeichert werden. Eine Art dieser Speicherung nennt man **Metallhydridspeicher**, also ein Metall das unter bestimmten Umgebungsbedingungen (Fülldruck 30 bar) in der Lage ist gasförmigen Wasserstoff zu absorbieren, dh bei Kontakt mit der Feststoffoberfläche des Speichermaterials zerfallen die Wasserstoffmoleküle in atomaren Wasserstoff und dringen in das Material ein. Als Material finden Metalle wie zB Palladium und Magnesium sowie Metallverbindungen wie TiFe (Titan-Eisen) und ZrMn₂ (Zirkonium-Mangan) Verwendung. Bei Wärmezufuhr (> 200°C) löst sich der Wasserstoff wieder aus dem Metallgitter. Die vergleichsweise geringen Drücke und Temperaturen zum Anlagern und Auslösen machen Metallhydridspeicher einfach in der Handhabung. Nachteilig sind das Gewicht mit einer Speicherdichte von 1–2 kg H₂/100 kg Metallhydrid, das damit einhergehende große Volumen und die hohen Kosten. Eine andere Speichermöglichkeit bietet die sogenannte **Powerpaste**. Diese Erfindung des Fraunhofer IFAM (Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung) bindet Wasserstoff in Magnesiumhydrid Pulver und setzt ihn bei Kontakt mit Wasser wieder frei. Bemerkenswert ist die relativ hohe Speicherdichte mit 1 kg H₂/10 kg Powerpaste.⁴⁷
- 59 Alternativ zum Einlagern von Wasserstoff in Feststoffe (Absorption) wie oben beschrieben, gibt es das Anlagern von Wasserstoff an Feststoffen (Adsorption). Dies geschieht in sogenannten **Nanotubes** und Metal Organic Frameworks (MOF).
- 60 **Nanotubes** sind fünf- oder sechseckige Kohlenstoffringe (Fullerene) die sich zu Kohlenstoffkäfigen ausbilden. Diese können zur

⁴⁶ HyPA, Speicherung von Wasserstoff, www.hypa.at/fileadmin/11_hypa/fact_sheets/hypa-fact-sheet_speicherung_von_wasserstoff_juni_2023.pdf.

⁴⁷ Wasserstoffregion Chemnitz/HZwo, Factsheet Wasserstoff-Speicherung, www.landkreis-mittelsachsen.de/fileadmin/user_upload/Wasserstoff/HZwo_HyExperts_Factsheet_H2-Speicherung.pdf.

Oberflächenvergrößerung aufgerollt werden. Der Wasserstoff lagert sich an dieser Oberfläche aufgrund von Teilchenwechselwirkung an. Hierfür sind allerdings sehr tiefe Temperaturen (ca. -200°C) notwendig. Als Speicherungsumfang geht man von ca. 2–3 Massenprozent aus.

MOF bestehen aus regelmäßigen porösen Metallgittern, an deren Ecken Metallverbindungen wie zB Zinkoxid sitzen, die als SBU's (Secondary Building Units) bezeichnet werden. Diese sind über Linker – ähnlich wie bei Kunststoffen – verbunden. Die Anlagerung von Wasserstoff erfolgt nach einem ähnlichen Prinzip wie bei Nanotubes. Allerdings sind MOF viel poröser und damit leichter bei einer gleichzeitig größeren Oberfläche. Aktuelle Untersuchungen zeigen $4.000\text{ m}^2/\text{gMOF}$ mit 5–7 Massenprozent. Allerdings ist hier, ähnlich wie bei den Nanotubes, eine Tieftemperatur von -196°C zur Anlagerung von Wasserstoff notwendig.⁴⁸

III. Speicherung chemisch (an Fluide gebunden)

Die Speicherung von Wasserstoff in einem Fluid hat den Vorteil, dass gängige Transport- und Verteilungssysteme ohne einschneidende technische Änderungen benutzt werden können – wie Hochdruck und Tieftemperaturfähigkeit – und dies idealerweise bei einer hohen volumetrischen und gravimetrischen Speicherfähigkeit. Allerdings gilt es hier Kosten-, Ressourcen- und Gefährdungsaspekte zu beachten.

Prinzipiell lässt sich Wasserstoff via Methanisierung in synthetisches Methan und weiterführend via Fischer-Tropsch-Synthese ($\rightarrow$ Rn. 93 ff.) in synthetischen Kraftstoff (E-Fuel) wie zB Diesel, Kerosin und Benzin verwandeln und ist damit, was Energiekapazität, Transport- und Verteilungsfähigkeit betrifft, direkt mit den fossilen Kraftstoffen vergleichbar – und dies bei einer höheren Reinheit und damit Vorteilen in den Schadstoffrohmissionen. Allerdings sind hier die hohen Entstehungskosten zu beachten. Aktuell sind allein die Herstellungskosten bei ca. 4 EUR/l, allerdings gehen die Prognosen von 2,29 EUR/l inklusive Steuern für 2030 aus.⁴⁹ Regelmäßig wird auf den schlechten energetischen Wirkungsgrad von Syn-Fuels hingewiesen. Betrachtet man aber Regionen mit einer hohen Verfügbarkeit von regenerativen Energien, wie zB die Sahara, wird dieses Argument relativ, da Transport- und Speicherung von Syn-Fuels gegenüber der reinen Stromanwendung viel einfacher und günstiger ist.

⁴⁸ Max-Planck-Gesellschaft, Das Raumwunder im Tank, www.mpg.de/1326157/wasserstoff.

⁴⁹ Wuppertal Institut für Klima und Energie, 2025.

- 64 Weiterhin bekannt und erprobt ist das Speichern von Wasserstoff in Methanol (CH_3OH) und Ammoniak (NH_3) ($\rightarrow$ Kap. 8 Rn. 94 f.). Methanol lässt sich über Reforming ($\rightarrow$ Rn. 41 ff.) mit Hilfe von CO_2 herstellen und hat eine Energiedichte von 4,4 kWh/l.
- 65 Für NH_3 werden mit dem **Haber-Bosch-Verfahren** Wasserstoff und Stickstoff bei Temperaturen zwischen 400 und 450 °C und Drücken von 120–220 bar in Gegenwart eines Katalysators auf Eisenbasis zu NH_3 gewandelt.⁵⁰ Als Schlüsselkomponente bei der Düngemittelproduktion verfügt NH_3 über eine etablierte globale Lieferkette mit sicheren Standards für Massentransport und Lagerung. NH_3 tritt unter Umgebungsbedingungen als Gas auf und wird bei -33 °C oder 7,5 bar (bei 15 °C) flüssig bei einer volumetrischen Energiedichte von 3,53 kWh/l und kann so gut transportiert werden. Allerdings sind sowohl NH_3 als auch CH_3OH im Gegensatz zu H_2 giftig, umweltschädlich und korrosiv.
- 66 Als interessante Alternative haben sich in der letzten Zeit chemische Trägerflüssigkeiten aus der Verfahrenstechnik entwickelt – sogenannte **liquid organic hydrogen carriers** (LOHC). LOHC sind ölarartige, organische Flüssigkeiten wie beispielsweise Benzyltoluol, die aus Kohlenwasserstoffen bestehen. An diese Trägerflüssigkeiten kann Wasserstoff gebunden und bei Bedarf wieder freigesetzt werden. Für die Anlagerung (Hydrierung) des Wasserstoffs benötigt man 30–50 bar bei ca. 150 °C im Beisein eines Katalysators. Die entstehende hydrierte Flüssigkeit ist unter Umgebungsbedingungen stabil und gut transportierbar. Zum Auslösen des Wasserstoffs (Dehydrierung) wird eine Temperatur von 300 °C benötigt. Solche Temperaturen sind zB gut aus der Abwärme von Verbrennungsmotoren darstellbar, was eine Kombination von Wasserstoffverbrennungsmotor ($\rightarrow$ Rn. 81) mit LOHC sinnvoll erscheinen lässt. Einer der wesentlichen Technologieträger in Sachen LOHC ist die Firma „Hydrogenious“ in Erlangen. Die niedrigen Kosten der wiederverwendbaren LOHC-Flüssigkeiten mit ca. 4 EUR/l und die relativ hohe Energiedichte mit ca. 2 kWh/l, sowie die Robustheit der LOHC-Flüssigkeit unter Umgebungsbedingungen und die überschaubaren Randbedingungen für Hydrierung und Dehydrierung lassen auf eine wesentliche zukünftige Verwendung von LOHC bei der Speicherung und dem Transport von Wasserstoff schließen. Sichtbar wird dies an den weltweiten aktuellen Joint Ventures

⁵⁰ Umweltbundesamt, Kurzeinschätzung von Ammoniak als Energieträger und Transportmedium für Wasserstoff, 28.2.2022, S.2, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/uba_kurzeinschaetzung_von_ammoniak_als_energietraeger_und_transportmedium_fuer_wasserstoff.pdf.