



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Informationssammlung

Einsatzbedingungen von Wasserstoff I Wasserstoffproduktion

Autorin: Dr. Julia Rothe



Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V.

Friedrich-Barnewitz-Str. 4c

18119 Rostock-Warnemünde

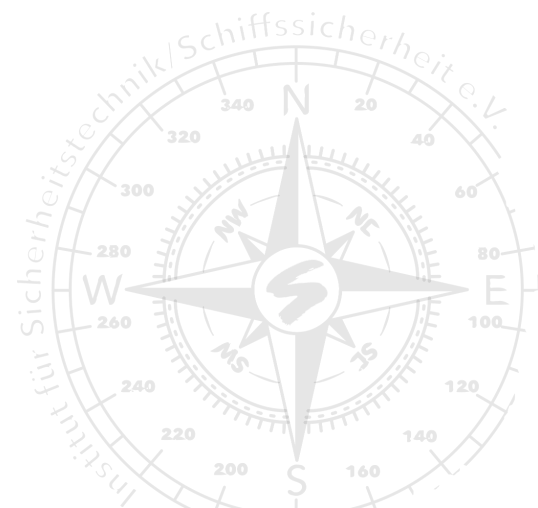
Telefon: +49 (0)381 77876 140

E-Mail: institut@schiffssicherheit.de

Internet: www.schiffssicherheit.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Thermochemische Verfahren.....	3
2.1	<i>Dampfreformierung (Steam Methane Reforming)</i>	<i>3</i>
2.2	<i>Methanpyrolyse (Türkiser Wasserstoff).....</i>	<i>4</i>
2.3	<i>Abfallvergasung (Orangener Wasserstoff)</i>	<i>4</i>
2.4	<i>Cracken von Ammoniak/Methanol.....</i>	<i>6</i>
3	Biologische Verfahren.....	6
3.1	<i>Dunkle Fermentation (Oranger Wasserstoff)</i>	<i>6</i>
4	Elektrochemische Verfahren.....	7
4.1	<i>Elektrolyse (Grüner/Gelber/Roter Wasserstoff).....</i>	<i>7</i>
5	Geologische Quellen (Goldener/Weißer Wasserstoff).....	9
6	Fazit und Zusammenfassung.....	9
7	Literatur	11



1 Einleitung

Wasserstoff kann auf unterschiedlichste Weise erzeugt werden – aus fossilen Rohstoffen, aus Biomasse oder aus Wasser durch Nutzung elektrischer Energie. Die jeweiligen Herstellungsverfahren unterscheiden sich dabei erheblich hinsichtlich Technologie, Effizienz, Emissionen, Randbedingungen (wie Druck und Temperatur) sowie technologischer Reife.

Um diese Vielfalt einzuordnen, hat sich eine Farbklassifikation etabliert, die einen schnellen Überblick über die Herkunft und die Umweltauswirkungen des Wasserstoffs gibt. Diese Farbcodes sind jedoch nicht normativ festgelegt, sondern dienen als Orientierungshilfe im politischen und wissenschaftlichen Diskurs.



Abbildung 1. Übersicht über die Farbuordnung zu Wasserstoff aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Ergänzt wird auch über gelben Wasserstoff aus Elektrolyse mit Netzstrom-Mix und weißen bzw. goldenen Wasserstoff aus natürlichen Quellen gesprochen.¹

2 Thermochemische Verfahren

2.1 Dampfreformierung (Steam Methane Reforming)

Die Dampfreformierung ist das zurzeit bedeutendste großindustrielle Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern und Wasser. Erdgas ist derzeit der wichtigste Rohstoff, aber prinzipiell eignen sich viele kohlenwasserstoffhaltige Rohstoffe wie Kohle (schwarzer oder brauner Wasserstoff) Leichtbenzin, Methanol, Biogas oder Biomasse als Ausgangsmaterial.

Beim weltweit dominierenden Verfahren wird Methan in Gegenwart eines Nickelkatalysators mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgesetzt. Die Reaktionsbedingungen liegen bei Temperaturen zwischen **750 und 1000 °C** sowie Drücken von **15 bis 30 bar**.^{2,3}

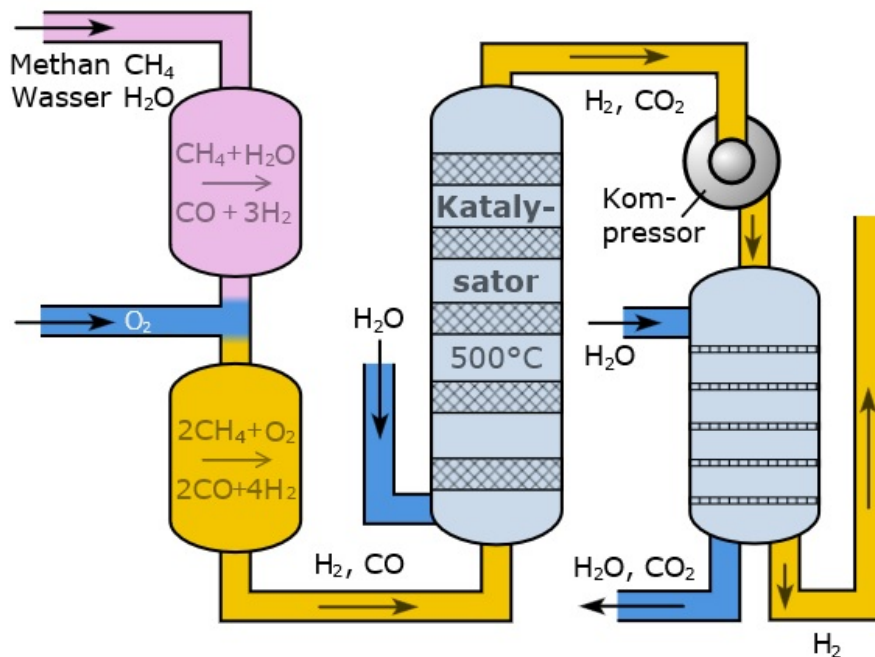


Abbildung 2. Schematischer Aufbau einer Anlage zur Dampfreformierung von Methan.⁴

Ohne Abscheidung des CO_2 entsteht grauer Wasserstoff. Wird das CO_2 abgeschieden und danach (z. B. in unterirdischen Kavernen) gelagert, man spricht von Carbon Capture and Storage (CCS), erhält man sogenannten blauen Wasserstoff.

In Deutschland gibt es zahlreiche Anlagen zur Dampfreformierung, zum Beispiel in Ludwigshafen bei BASF,⁵ in Leuna von Linde⁶ oder in Marl von Evonik. VNG plant eine Anlage im Rostocker Hafen, in der Erdgas aus Norwegen mittels Dampfreformierung zu blauem Wasserstoff und CO_2 umgesetzt wird. Das entstehende CO_2 soll abgeschieden, verflüssigt und anschließend unter dem Meeresboden gespeichert werden.⁷

2.2 Methanpyrolyse (Türkiser Wasserstoff)

Bei der Methanpyrolyse wird Methan ohne Sauerstoffzugabe thermisch in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten – bekannt als Kvaerner-Verfahren.⁸ Der Prozess findet bei Temperaturen von typischerweise über **800 °C bis 1200°C** und bis zu **10 bar** statt, je nach den spezifischen Bedingungen.⁹ Manchmal kommen auch Katalysatoren zum Einsatz, um den Prozess zu beschleunigen. Die Abwesenheit von Sauerstoff ist entscheidend, um die Verbrennung von Methan zu Wasser und CO_2 zu verhindern.¹⁰

Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass der entstehende Kohlenstoff als festes Granulat anfällt und so einfacher und sicherer gelagert (zum Beispiel in Bergwerkstollen) und verwertet werden kann, z. B. als Carbon black für die Reifenindustrie.¹¹ Diese Methode geht jedoch bisher nicht über Pilotprojekte hinaus.

2.3 Abfallvergasung (Orangener Wasserstoff)

Wasserstoff wird dann als orange bezeichnet, wenn er aus Biomasse bzw. Abfällen (in Analogie zur orangenen Müllabfuhr) hergestellt wird. Dafür wird diese bei hohen Temperaturen und im Beisein von Oxidationsmitteln (meist Luft, aber auch Wasserdampf oder CO_2) in einer thermochemischen Reaktion in Produktgas umgewandelt. Das Produktgas enthält in der Regel Wasserstoff, CO_2/CO und Methan. Die Vergasungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich

Temperatur, Druck und Prozessführung deutlich voneinander. Industriell gebräuchlich sind insbesondere Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser.¹² Darüber hinaus kommen Technologien wie Drehrohrvergaser, Vorschubrostvergaser, Plasmavergaser, hydrothermale Vergaser und mikrowellengestützte Vergaser zum Einsatz.

In der Regel werden bei der Vergasung von Biomasse kleine Festbettvergaser eingesetzt, die bei Temperaturen unter 1000 °C arbeiten. Für inhomogene Abfälle sind diese jedoch weniger geeignet. Besser sind Hochtemperatur-Festbettvergaser, die mit Temperaturen über 1000 °C arbeiten und so auch weniger aufbereitete oder gemischte Abfälle effizient umsetzen können.

Grundsätzlich nimmt der Wasserstoffgehalt im Produktgas mit steigender Vergasungstemperatur zu, während der Gehalt an Kohlenmonoxid und leichten Kohlenwasserstoffen sinkt. Die optimale Temperatur für eine maximale Wasserstoffausbeute liegt zwischen 800 °C und 850 °C. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das chemische Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion wieder zugunsten der Edukte, was die Wasserstoffausbeute verringert. Eine Vergasung unter Atmosphärendruck führt zu höheren Wasserstoffausbeuten, bei höheren Drücken sinkt sie.

Bei der Plasmavergasung werden unbehandelte Abfälle direkt in den Reaktor eingebracht und dort mit einem elektrisch erzeugten Plasma in Kontakt gebracht. Der Prozess findet üblicherweise bei Atmosphärendruck und sehr hohen Temperaturen zwischen 1500 °C und 5000 °C statt. Dabei entstehen ein hochwertiges Produktgas sowie verglaste Schlacke. Allerdings ist der Energiebedarf für die Plasmaerzeugung erheblich: Der Stromverbrauch beträgt etwa 1,2–2,5 MJ pro Kilogramm Abfall, was etwa 5–10 % des Brennwertes des Einsatzstoffs entspricht. Kritisch bei allen Hochtemperaturverfahren sind die Lebensdauer und die Betriebszeiten der Anlagenteile, da diese stark durch thermische Belastung, Materialermüdung und Korrosion beansprucht werden.¹³

Eine weitere Methode ist die hydrothermale Vergasung. Sie erfolgt in überkritischem Wasser (Temperaturen über 374 °C und Drücken über 221 bar) und ermöglicht die Vergasung auch sehr feuchter Einsatzstoffe wie Biomasse oder Kunststoffen. Aufgrund der großen Wassermengen liegt das Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion dabei deutlich auf der Seite des Wasserstoffs. Zur Unterstützung der Reaktion werden Katalysatoren, meist auf Basis von Alkalimetallen, eingesetzt. Allerdings sind die Reaktionszeiten länger und eine feine Aufbereitung des Rohstoffs ist notwendig. Trotz hohem Potenzial steckt die hydrothermale Vergasung derzeit noch weitgehend im Forschungsstadium.

Nach der Vergasung enthalten die Produktgase häufig noch einen hohen Anteil an Methan. Dieses wird anschließend durch eine Dampfreformierung (siehe oben) weiter in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Für die Abtrennung des Wasserstoffs kommen überwiegend Druckwechseladsorptions- oder Membranverfahren zum Einsatz.

Abfallvergasung in Deutschland: Es existieren in Deutschland derzeit keine großtechnischen kommerziellen Anlagen zur Abfallvergasung. Die thermische Behandlung von Abfällen erfolgt überwiegend durch klassische Müllverbrennung in Müllheizkraftwerken (MHKW) oder Müllverwertungsanlagen (MVA).¹⁴ In sogenannten Biogasanlagen wird kein Wasserstoff durch Vergasung erzeugt. Stattdessen wird die Biomasse dort durch Mikroorganismen und unter Ausschluss von Sauerstoff in einer Vergärung zu Methan bzw. Biogas umgewandelt.¹⁵

International existieren bislang nur vereinzelt Demonstrationsanlagen zur Biomassevergasung, wie etwa jene von Enerkem in Edmonton (Kanada) und von Showa Denko in Kawasaki (Japan), die

auf Wirbelschichtverfahren basieren.¹⁶ Ehemalige Anlagen in Deutschland wurden bereits wieder geschlossen.¹⁷ Die mutmaßlich einzige deutsche Anlage steht in Minden und wird von der britischen Firma Energoss betrieben. Mit einem Vorschubrostvergaser können bei 900 °C 120–144 Tonnen Abfall täglich umgesetzt werden.¹⁸

2.4 Cracken von Ammoniak/Methanol

Da der zukünftige Wasserstoffbedarf in Deutschland nicht allein durch im Land produzierten Wasserstoff gedeckt werden kann, wurden bereits erste Liefervereinbarungen mit anderen Ländern geschlossen.¹⁹ Angesichts der Herausforderungen beim direkten Wasserstofftransport, ihn unter hohem Druck oder extrem niedrigen Temperaturen zu transportieren, wird der eingekaufte Wasserstoff nicht als reiner Wasserstoff, sondern in gebundener Form importiert werden. Vor allem Methanol und Ammoniak bieten hierfür praktikable Lösungen, da diese Substanzen als Träger für Wasserstoff effizient transportiert und gespeichert werden können.

Beim Cracking von Methanol, einem Prozess, bei dem Methanol in Wasserstoff und Kohlenmonoxid gespalten wird, sind Temperaturen von etwa **200–300 °C** und Drücke von **10 bis 20 bar** typisch.^{20,21}

Für Ammoniak wird üblicherweise eine höhere Temperatur von **600 bis 900 °C** und ein Druck von etwa **20 bis 40 bar** benötigt,²² um Ammoniak in Wasserstoff und Stickstoff zu zerlegen.

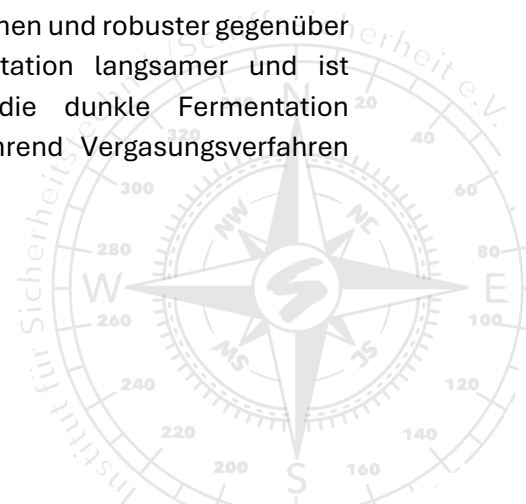
Ammoniak wird als der derzeit technologisch ausgereifteste Wasserstoffträger betrachtet, da es der derzeit wettbewerbsfähigste und technologisch ausgereifteste Wasserstoffträger ist.²³ Zudem enthält flüssiges Ammoniak bei gleichem Volumen mehr Wasserstoff als Methanol.

3 Biologische Verfahren

3.1 Dunkle Fermentation (Oranger Wasserstoff)

Als dunkle Fermentation (auch: Dunkelfermentation) werden biotechnologische Verfahren bezeichnet, bei denen Mikroorganismen in geschlossenen Anlagen (Reaktoren) aus Biomasse, biogene Reststoffen oder Abwässern, die biogene Reststoffe enthalten, Wasserstoff erzeugen. Diese Prozesse laufen bei Temperaturen von 35 bis 80 Grad Celsius ab. Wasserstoff fällt bei den verschiedenen, in der Forschung befindlichen Verfahren der dunklen Fermentation nicht rein an, sondern im Gemisch mit anderen Gasen etwa Methan.¹³

Im Vergleich zur Vergasung bietet die dunkle Fermentation den Vorteil, dass sie unter milden Bedingungen abläuft und damit deutlich energieärmer und materialschonender ist. Sie eignet sich besonders für feuchte Biomasse und Abwässer, da keine Trocknung nötig ist. Allerdings ist die Wasserstoffausbeute deutlich geringer als bei der Vergasung, und der Wasserstoff fällt nicht rein an, sondern als Teil eines Gasgemischs, das aufwändig aufbereitet werden muss. Während thermochemische Vergasungsverfahren hohe Durchsatzraten erreichen und robuster gegenüber Schwankungen im Einsatzstoff sind, läuft die dunkle Fermentation langsamer und ist empfindlicher gegenüber Störungen. Zudem befindet sich die dunkle Fermentation technologisch noch in einem frühen Entwicklungsstadium, während Vergasungsverfahren bereits industriell etabliert sind.



4 Elektrochemische Verfahren

4.1 Elektrolyse (Grüner/Gelber/Roter Wasserstoff)

Bei der Elektrolyse wird Wasser mit Hilfe elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die Farbe des Wasserstoffes ergibt sich auch der Stromquelle:

Grün:	Strom aus erneuerbaren Energien
Gelb:	Strom aus fossilen Energien
Pink/Rot/Violett:	Strom aus Atomenergie
Orange:	Strom aus Müllverbrennungs- oder Biogasanlagen

Die Bedingungen sowie die eingesetzten Materialien für Katalysatoren und Elektrolyten unterscheiden sich je nach Elektrolysetechnologie erheblich. Während manche Verfahren bei Raumtemperatur und atmosphärischem Druck arbeiten, benötigen andere hohe Temperaturen oder ermöglichen direkt eine Erzeugung unter Hochdruck.

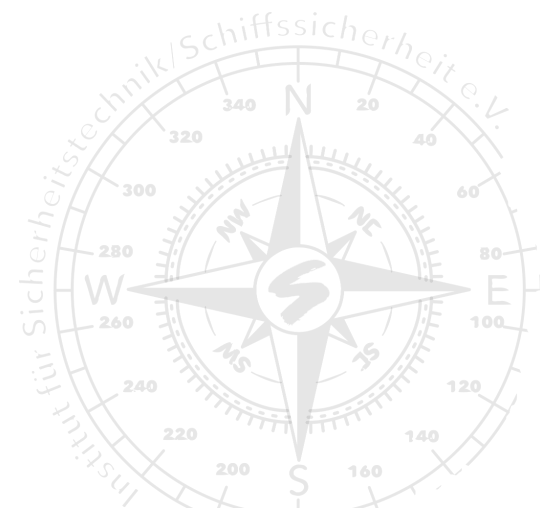


Tabelle 1. Überblick über Elektrolyseverfahren^{24,25,26,27,28}.

Technologie	Temperatur /Druck	Reifegrad	Vorteile	Nachteile
AEL –Alkalische Elektrolyse	40–90 °C 1–30 bar	etabliert	<ul style="list-style-type: none"> Kostengünstig, da keine Edelmetalle erforderlich Hohe Robustheit und lange Lebensdauer Relativ einfache und bewährte Technologie Vergleichsweise geringe Ansprüche an Wasserreinheit (entsalztes Wasser) 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Stromdichte, daher größere Bauweise Komplexe Abdichtung erforderlich Geringe Flexibilität bei schwankender Stromzufuhr
PEM-(Proton Exchange Membrane) Elektrolyse	50–80 °C 1–40 bar (bis 350 bar denkbar)	etabliert	<ul style="list-style-type: none"> Kompakte Bauweise ermöglicht hohe Leistungsdichte Sehr hohe Reinheit des erzeugten Wasserstoffs Schnelle Reaktion auf Laständerungen (ideal für fluktuierende Energiequellen wie Solar- oder Windkraft) 	<ul style="list-style-type: none"> Teuer aufgrund der Verwendung von Edelmetallkatalysatoren (Platin, Iridium) Begrenzte Lebensdauer der Membranen (empfindlich gegenüber Verunreinigungen) Höherer Wasserbedarf, da sehr reines destilliertes Wasser benötigt (ASTM Typ I)
AEM-Elektrolyse	40–60 °C 1–35 bar	in Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Kostengünstig, da keine Edelmetallkatalysatoren erforderlich Kompakte Bauweise, daher ähnlich flexibel wie PEM-Elektrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> Noch nicht so effizient und langlebig wie PEM oder AEL Stabilität und Haltbarkeit der Membran sind noch Herausforderungen Höherer Wasserbedarf, da sehr reines destilliertes Wasser benötigt
HTE – Hochtemperatur-Elektrolyse	600–1200 °C	in Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Effizienz durch Integration von Abwärme (reduziert Stromverbrauch) Kann mit Wärme aus industriellen Prozessen oder Kernkraftwerken betrieben werden Vielversprechend für die Kopplung mit synthetischer Kraftstoffproduktion (z. B. Power-to-X) Geringere Anforderungen an Ionenfreiheit des Wassers als PEM 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Betriebstemperaturen führen zu Materialverschleiß und beschränkter Lebensdauer Aktuell hohe Investitionskosten und begrenzte Kommerzialisierung



Elektrolyseure in Deutschland

In Deutschland dominieren derzeit vor allem PEM-Elektrolyseure im großtechnischen Maßstab. Insbesondere Elektrolyseure mit höheren Kapazitäten ($> 2,5$ MW) sind ausnahmslos PEM-Elektrolyseure.²⁹ Kleinere Anlagen setzen weiterhin auch auf AEL und zunehmend auf AEM.

So hat Air Liquide in Oberhausen den bislang „größten“ PEM-Elektrolyseur gebaut: Mit einer Leistung von 20 MW erzeugt er bis zu 2.900 Tonnen Wasserstoff pro Jahr bei typischen niedrigen Temperaturen und Drücken.³⁰

Im März 2025 nahm BASF einen 54-Megawatt-PEM-Elektrolyseur in Betrieb, der bis zu 8.000 Tonnen Wasserstoff jährlich produziert.³¹

Die Hochtemperaturelektrolyse (HTE), die zwischen 100 und 850 °C arbeitet,³² befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Sie wird insbesondere dort als vielversprechend angesehen, wo günstige oder ungenutzte Wärmequellen (z. B. Geothermie, Industrieabwärme) verfügbar sind. Ebenso sind erste Prototypen für Hochdruckelektrolyseure in Entwicklung, die Wasserstoff direkt bei 30–200 bar erzeugen und damit die energieaufwändige Kompression umgehen – meist auf Basis der PEM-Technologie.³³

Wo werden künftig Elektrolyseure eingesetzt?

Zukünftig werden Elektrolyseure vor allem dort errichtet, wo erneuerbare Energien direkt genutzt werden können, also in der Nähe von Windparks, Gezeitenkraftwerken oder Solar-Parks. Offshore-Windparks bieten hierfür ideale Bedingungen: große Flächen, konstante Windverhältnisse und die Möglichkeit, den erzeugten Wasserstoff direkt auf See zu produzieren.³⁴

Im 2010 eröffneten Windpark Alpha Ventus soll ein 10-Megawatt-Elektrolyseur installiert werden, um die Machbarkeit der maritimen Wasserstofferzeugung zu demonstrieren. Eine entsprechende Absichtserklärung haben die NorthH2-Projektgesellschaft, die Deutsche Offshore-Testfeld- und Infrastruktur-GmbH (DOTI) sowie die Stiftung Offshore Windenergie kürzlich unterzeichnet.³⁵

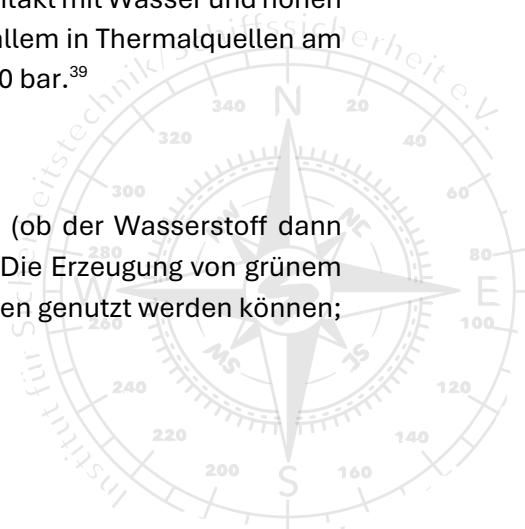
Projekte wie H2Mare entwickeln diese Ansätze weiter. Bisher laufen die Versuche aber noch als Prototypen an Land. Die enge Kopplung von Windenergieanlagen, Wasseraufbereitung und Elektrolyse direkt auf See könnte die Wasserstoffproduktion erheblich effizienter machen.³⁶

5 Geologische Quellen (Goldener/Weißer Wasserstoff)

Natürlich vorkommender Wasserstoff ist bisher ungenutzt und dessen Entstehung weitgehend unverstanden.³⁷ Einer von vielen möglichen Entstehungsvarianten ist die Serpentinisierung; ein Mineralumwandlungsprozess bei dem ultrabasische Gesteine bei Kontakt mit Wasser und hohen Temperaturen (200–350 °C) Wasserstoff erzeugen. Das passiert vor allem in Thermalquellen am Meeresboden,³⁸ in bis zu 3000 m Tiefe und einem Druck von bis zu 300 bar.³⁹

6 Fazit und Zusammenfassung

Die Zukunft der Wasserstofferzeugung geht in Richtung Elektrolyse (ob der Wasserstoff dann grün, gelb oder rot ist, spielt für die Randbedingungen keine Rolle). Die Erzeugung von grünem Wasserstoff wird vor allem dort erfolgen, wo die regenerativen Energien genutzt werden können;



hauptsächlich in der Nähe von Windparks, auch off-shore. Betrachtet man den derzeitigen Stand der Technik und Forschung, ist von PEM-Elektrolyseuren auszugehen, deren Kathodenseite unter höherem Druck (bis **50 bar**, angestrebt bis **350 bar**) und bei Temperaturen von **50–80 °C** betrieben wird.⁴⁰

Zudem sollte die Dampfreformierung von Methan mit anschließendem CCS beachtet werden, da die Erzeugung von blauem Wasserstoff den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur unterstützen wird.⁴¹

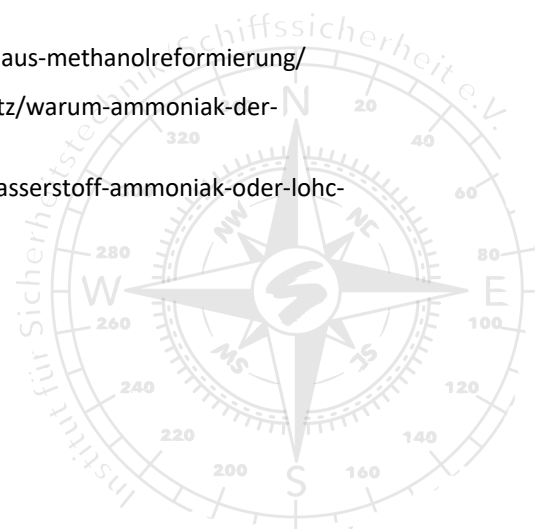
Die Abfallvergasung wird einen kleineren Teil zur Wasserstoffwirtschaft beitragen, aber an voraussichtlich vielen Standorten verwendet werden. Insbesondere wenn es um die Speicherung kleinerer Energiemengen geht, wie bei einem Solar-Feld. Sie sollte deswegen als Anwendungsszenario für Wasserstoff aufgenommen werden, gekoppelt an eine innovativere Option mit Einsatz von Plasma oder Hochtemperatur.

Verfahren	Druck (bar)	Temperatur (°C)
Dampfreformierung mit CCS	15–30	750–1000
PEM-Elektrolyse (offshore)	30–40	50–80
Abfallvergasung (Plasma oder Hochtemperatur)	1–10	1500–5000
Ammoniak-Cracking	200–300	10–20
Methanol-Cracking	600–900	20–40



7 Literatur

- ¹ <https://info.atlascopco-kompressoren.de/blog/die-wasserstoff-farbenlehre-grüner-blauer-grauer-wasserstoff-was-bedeutet-die-farben>
- ² <https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-er/dampfreformierung/#:~:text=Es%20ist%20heutzutage%20das%20verbreitetste,in%20vielen%20größtechnischen%20Anlagen%20durchgeführt.&text=Diese%20Reaktion%20wird%20bei%20einem,unter%20Einwirkung%20eines%20Katalysators%20durchgeführt.>
- ³ <https://www.sfc.com/de/glossar/dampfreformierung/>
- ⁴ <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Dampfreformierung.jpg>
- ⁵ <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2025/03/p-25-046>
- ⁶ <https://www.golem.de/news/dampfreformierung-die-fossile-wasserstoffindustrie-2012-152821.html>
- ⁷ <https://www.vng-handel.de/de/projekt-h2ge-rostock>
- ⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Kværner-Verfahren>
- ⁹ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-025-01574-9>
- ¹⁰ <https://www.ineratec.de/de/glossar/methanpyrolyse#:~:text=Die%20Methanpyrolyse%2C%20auch%20bekannt%20als,und%20festen%20Kohlenstoff%20zerlegt%20wird.>
- ¹¹ <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/wasserstoff/wasserstoff-farben.html>
- ¹² https://www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Text_Nr.72_Wasserstoffsystmstudie.pdf
- ¹³ <https://www.bundestag.de/resource/blob/866384/6f31ce3d496d03eb92d35856544ac1ba/WD-8-075-21-pdf-data.pdf>
- ¹⁴ <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-energie-umwelt/umwelt/abfall-und-kreislauf/synthesegas-aus-schwer-verwertbaren-abfaellen/>
- ¹⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Biogasanlage>
- ¹⁶ https://www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Texte/bifa-Text_Nr.72_Wasserstoffsystmstudie_Online.pdf
- ¹⁷ https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/07/2011_EaA_435_466_Gleis.pdf
- ¹⁸ https://www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Texte/bifa-Text_Nr.72_Wasserstoffsystmstudie_Online.pdf
- ¹⁹ <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/wasserstoff-import-liefervertrag-100.html>
- ²⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Methanol-Reformer#:~:text=6%20Weblinks,Technologie,bis%20280%20°C%20überhitzt.>
- ²¹ <https://www.caloric.com/de/product/wasserstofftechnologie/wasserstoff-aus-methanolreformierung/>
- ²² <https://www.thyssenkrupp.com/de/stories/nachhaltigkeit-und-klimaschutz/warum-ammoniak-der-effizientere-wasserstofftransport-ist>
- ²³ <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff/fluessiger-wasserstoff-ammoniak-oder-lohc-was-spricht-fuer-welchen-h2-traeger-381.html>



-
- 24 <https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-er/elektrolyse/ael/#:~:text=Die%20AEL%20wird%20in%20einem,von%201%2D30%20bar%20betrieben.>
- 25 <https://www.enapter.com/de/blog/aem-water-electrolysis-how-it-works/>
- 26 <https://www.zbt.de/portfolio/elektrolyse/aem-wasserelektrolyse/>
- 27 [https://www.fh-muenster.de/legacy/egu/fue/fue_gebiete/anlagentechnik-bep/stack-elektrolyseur.php#:~:text=Anionenaustauschmembran\(AEM\)%2DElektrolyse,-Die%20Anionenaustauschmembran%20teilt&text=Mehrere%20Einzelzellen%20werden%20durch%20die,1%20bar.](https://www.fh-muenster.de/legacy/egu/fue/fue_gebiete/anlagentechnik-bep/stack-elektrolyseur.php#:~:text=Anionenaustauschmembran(AEM)%2DElektrolyse,-Die%20Anionenaustauschmembran%20teilt&text=Mehrere%20Einzelzellen%20werden%20durch%20die,1%20bar.)
- 28 <https://www.purewater-hartmann.de/de/wasserqualitaeten.html>
- 29 <https://www.carmen-ev.de/marktuebersicht-elektrolyseure-online-version/>
- 30 <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/groesster-elektrolyseur-deutschlands-startet-im-ruhrgebiet/>
- 31 <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2025/03/p-25-046>
- 32 <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.50>
- 33 <https://www.wtz.de/blog/project/pem4heat/>
- 34 <https://www.tagesspiegel.de/themenspeziale/nachhaltigkeit/offshore-wasserstoff-tanker-statt-gasleitungen-machen-alles-viel-einfacher-11779394.html>
- 35 <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/wasserstoff-von-der-nordsee-10-mw-elektrolyseur-fuer-offshore-windpark/>
- 36 <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2mare/offgridwind>
- 37 <https://www.fau.de/2024/10/news/wissenschaft/natuerlicher-wasserstoff-der-verborgene-schatz-im-untergrund/>
- 38 <https://de.wikipedia.org/wiki/Serpentinisierung>
- 39 [https://de.wikipedia.org/wiki/Raucher_\(Hydrothermie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Raucher_(Hydrothermie))
- 40 https://www.samsongroup.com/de/loesungen/elektrolyse-zur-wasserstoffherstellung/?http_protocol_single-cookie-header=true#:~:text=Grundsätzlich%20zeichnet%20sich%20die%20PEM,bis%2080%20°C%20statt.
- 41 <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/blauer-wasserstoff-analyse-von-kosten-und-regulatorik/#:~:text=In%20internationalen%20Klimaneutralitätsstudien%20spielt%20blauer,derzeit%20nur%20eine%20untergeordnete%20Rolle.>

