

Prozessketten

zur Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff

Die Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff erhält aufgrund der globalen Bemühungen zum Klimaschutz und der damit einhergehenden Notwendigkeit zur Dekarbonisierung des Energiesystems wachsendes Interesse seitens Politik und Industrie.

Erklärtes Ziel der EU laut RED III ist es, bis 2030 42,5 % des Gesamtenergiebedarfs der EU durch Energie aus erneuerbaren Quellen zu decken. Dabei sollen in der Industrie bis 2030 42 % und bis 2035 60 % des genutzten Wasserstoffs in Form sogenannter RFNBOs (renewable fuels of non-biological origin) bereitgestellt werden. Der Anteil an RFNBOs am Verkehrssektor soll bis 2030 1 % betragen. Erneuerbarer Wasserstoff gilt als RFNBO, wenn er nach den Regeln der EU zertifiziert und mit einem Proof of Sustainability (PoS) versehen wird. Somit wird zertifizierter erneuerbarer Wasserstoff als integraler Faktor zur Zielerreichung der vorgeschriebenen Quote laut RED III erachtet.

Aktueller Wasserstoffbedarf und -produktion

Der globale Bedarf an Wasserstoff betrug im Jahr 2023 rund 3.200 TWh. Im Jahr 2020 wurden 95 % des EU-weit produzierten Wasserstoffs durch Methan-Dampf-Reformierung von Erdgas und zu einem kleinen Teil durch autotherme Reformierung produziert. Das dabei entstehende CO₂ wird größtenteils nicht durch CCS-Prozesse (carbon capture and storage) genutzt oder gespeichert, sondern entweicht in die Atmosphäre. Die restlichen 5 % des produzierten Wasserstoffes gingen hauptsächlich als Nebenprodukt aus dem Chlor-Alkali-Prozess der in der chemischen Industrie zur Herstellung von Chlor und Natronlauge genutzt wird, hervor. Schätzungen zufolge wird sich der Wasserstoffbedarf Europas bis 2050 noch stark erhöhen. Viele Mitgliedsstaaten der EU entwickeln vor diesem Hintergrund nationale Wasserstoffstrategien und unterstützen die nationale Produktion von Wasserstoff, um sich so rechtzeitig auf den erwarteten steigenden Bedarf einzustellen. So soll die EU-weite Elektrolysekapazität bis 2030 40 GW erreichen.

Spanien plant seine Elektrolysekapazität bis 2030 auf 12 GW zu erhöhen. Portugal und Italien wollen bis 2030 rund 5 GW Elektrolysekapazität erreichen.

Auch vor diesem Hintergrund soll das vorliegende Fact Sheet einen umfassenden Überblick über Prozesse zur Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff geben und als Grundlage zur Einordnung der Nutzung im zukünftigen Energiesystem dienen.

Betrachtete Produktions- und Speichertechnologien

Zur Produktion und Speicherung von erneuerbarem Wasserstoff stehen unterschiedliche Technologien zur Verfügung. Im Zuge der Recherche zu diesem Fact Sheet wurde eine Vorauswahl an Prozessen zur Herstellung und Speicherung von erneuerbarem Wasserstoff getroffen die in **Abbildung 1** dargestellt sind. Inkludiert sind auch die möglichen Ausgangsstoffe, Ressourcen und die Endprodukte.

Ausgangsstoffe und Ressourcen	Herstellung	Speicherung	Produkte
Biomasse	Alkali-Elektrolyse	Haber-Bosch Prozess	Wasserstoff (H ₂)
Wasser (H ₂ O)	PEM-Elektrolyse	Methanolsynthese	Ammoniak (NH ₃)
Erneuerbares Methan (CH ₄)	Festoxid-Elektrolyse	Druckspeicherung von Wasserstoff	Methanol (CH ₃ OH)
	AEM-Elektrolyse	Flüssigspeicherung von Wasserstoff	
	Mikrobielle Elektrolyse	Kryo-komprimierter Wasserstoff	
	Photoelektrolyse	Flüssige organische Wasserstoffträger	
	Katalytische Methanpyrolyse	Metallhydride	
	Methan Dampfreformierung	Adsorption von Wasserstoff	

Abbildung 1: Betrachtete Prozesse, Ausgangsstoffe und Produkte zur Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff, eigene Darstellung

Verschiedene Ausgangsstoffe lassen sich zur Herstellung erneuerbaren Wasserstoffs nutzen. Im Falle der Elektrolyse werden, je nach genutztem Verfahren, reines Wasser, organische Lösungen oder Abwasser genutzt, während erneuerbarer Wasserstoff auch durch katalytische Methanpyrolyse oder Methan-Dampfreformierung produziert werden kann. Derzeit werden diese Prozesse größtenteils mit Erdgas

betrieben. Um erneuerbaren Wasserstoff mittels katalytischer Methanpyrolyse oder Methan-Dampfreformierung zu produzieren, kann erneuerbares Methan, beispielsweise aus der Biomassevergasung als Ausgangsstoff dienen. Der produzierte Wasserstoff kann entweder in elementarer oder chemisch modifizierter Form transportiert oder gespeichert werden. Die betrachteten Speicherprozesse sind in Abbildung 1 genannt.

Darstellung der Prozessketten

Auf Basis von Abbildung 1 wurden Prozessketten der betrachteten Technologien gebildet und in Abbildung 2 übersichtlich dargestellt.

Neben den Prozessketten enthält Abbildung 2 auch einheitenlose Effizienzparameter für die genannten Technologien. Es wird explizit keine Aussage über die Marktreife einer Technologie, die Eignung betreffend geografische Lage oder Rohstoffverfügbarkeit getroffen. Auch politische Überlegungen oder Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Anlagen wurden im Rahmen der Recherche nicht quantitativ erhoben.

Eigenschaften und Grenzen der Effizienzparameter

Im Zuge der Recherche der 16 untersuchten Prozesse wurden technische Effizienzparameter erhoben. Die in Abbildung 2 beschriebenen Effizienzen sind das Ergebnis umfassender Literaturrecherche der aktuellen wissenschaftlichen Forschungslandschaft. **Besonderer Fokus lag auf der Erhebung der derzeit maximal erreichbaren Effizienzen nach starker Optimierung, meist ohne Rücksicht auf Skalierbarkeit oder Wirtschaftlichkeit der betrachteten Technologien.**

Da die Prozesse oft unterschiedlich aufgebaut sind oder unterschiedliche Ausgangsstoffe haben, war es nicht möglich einen vergleichbaren Effizienzparameter für alle Prozesse zu identifizieren. Zudem war es aufgrund der Homogenität der untersuchten Prozesse nicht möglich einheitliche Prozessgrenzen zu definieren auf die sich die erhobenen Effizienzen beziehen. Die in Abbildung 2 angegebenen Effizienzen sind aufgrund dieser Annahmen somit als **ungefähre Einordnung** zu betrachten. Sie **bilden nur begrenzt die derzeit in industriellen Anlagen erreichten Effizienzen ab.**

Ausgewählte Prozessketten für erneuerbaren Wasserstoff

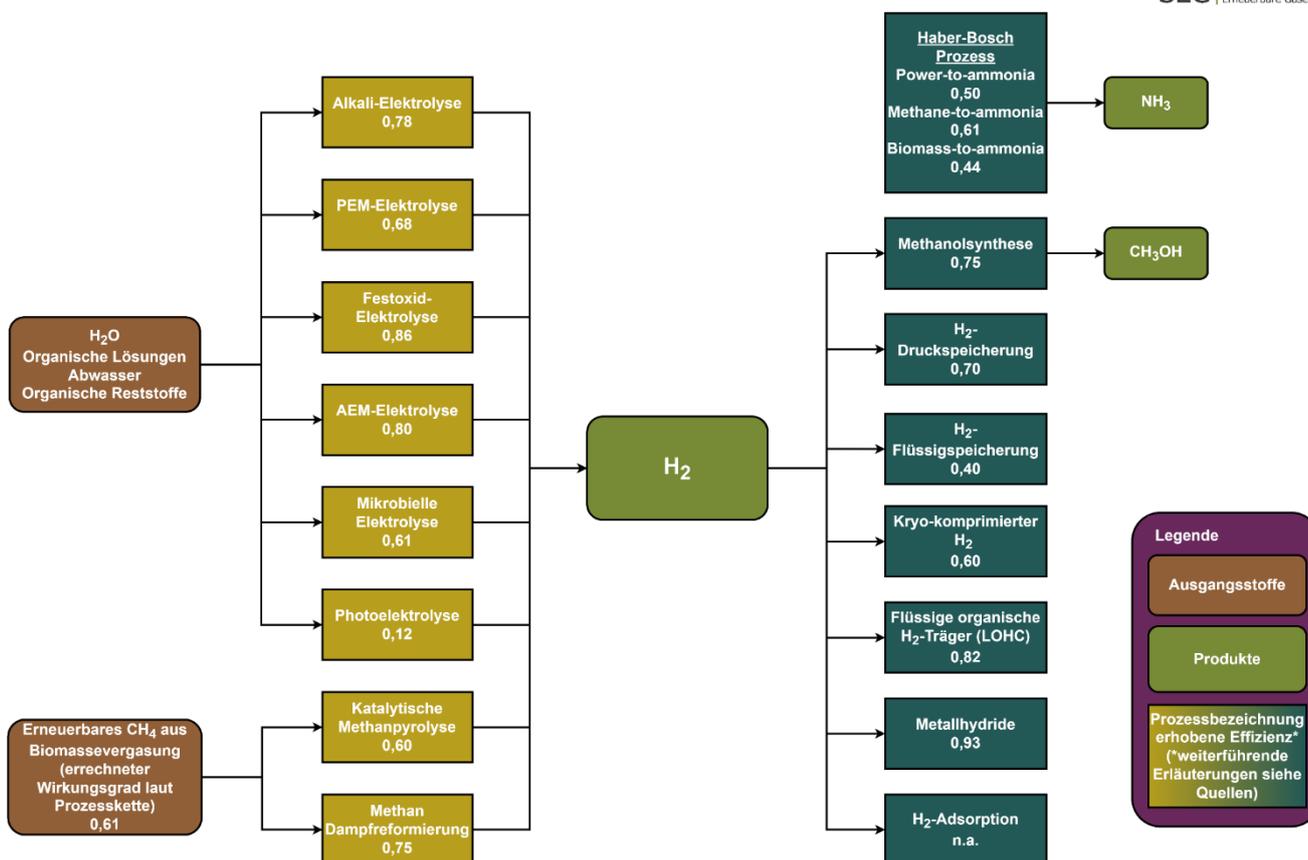


Abbildung 2: Prozessketten zur Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff inkl. erhobener Effizienzparameter der jeweiligen Technologie, eigene Darstellung

Berechnung und Interpretation der Ketteneffizienz

Auf Basis der Informationen in **Abbildung 2**, wurden die Ketteneffizienzen der jeweiligen Prozessketten berechnet. Dazu wurden die einzelnen Prozesseffizienzen der jeweiligen Prozesskette multipliziert, um die Ketteneffizienz zu bilden, wie in **Formel 1** beschrieben.

$$\eta_{PC} = \prod_{i=1}^n \eta_i$$

Formel 1: Berechnung der Ketteneffizienz

Ausgewählte Ergebnisse aus den Berechnungen der Effizienzketten sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** dargestellt.

Den Ergebnissen der Berechnung der Effizienzketten folgend ergibt sich, dass die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff mittels **Alkali-Elektrolyse** aktuell die höchste Effizienz der derzeit wirtschaftlich skalierbaren Elektrolýsetechnologien aufweist. Alkali-Elektrolyse reagiert sensibel auf Leistungsschwankungen, wie sie typischerweise bei der Stromproduktion mit Wind- oder PV-Kraftwerken auftreten.

Die **PEM-Elektrolyse** ist im Vergleich dazu robust gegenüber Leistungsschwankungen und kann deshalb einfach in Kombination mit PV- und Windkraftanlagen genutzt werden.

Die **Umwandlung von Biomethan in erneuerbarem Wasserstoff** mittels katalytischer Methanpyrolyse oder Methan-Dampfreformierung führt durch lange Prozessketten (Nutzung von Biomethan, beispielsweise aus Biomassevergasung oder anaerober Vergärung) zu hohen Effizienzverlusten.

Je nach Anwendung kann es sinnvoll sein den produzierten erneuerbaren Wasserstoff direkt zu verbrauchen, über Pipelines zu transportieren, oder in eine andere speicherbare Form zu bringen. Dazu steht eine Reihe von Verfahren zur Verfügung.

Während die H₂-Speicherung in Form von **Metallhydriden** und als **flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC)** hohe Effizienzen aufweist, gestaltet sich die Skalierung dieser Technologien derzeit noch als herausfordernd. Gerade in Hinsicht auf den Transportsektor sind diese beiden Technologien jedoch von wachsendem Interesse. Die **Druckspeicherung von H₂** ist ein vielversprechendes Verfahren zur Direktspeicherung von erneuerbarem

Wasserstoff und findet bereits Anwendung, beispielsweise zum Transport von Wasserstoff in Metallbehältern und Tanks oder zur Lagerung großer Mengen an Wasserstoff in geologischen Formationen wie ehemaligen Erdgaslagerstätten oder Salzkavernen.

Die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff zur **Herstellung von Ammoniak und Methanol** ist ein wichtiger Schritt zur Unterstützung der Dekarbonisierung. Ammoniak gilt als bedeutendster synthetischer Dünger und hat starken Einfluss auf die globale industrialisierte Landwirtschaft und damit auf die Ernährungssicherheit. 1,2% der globalen CO₂-Emissionen stammen aus der Herstellung von synthetischem Ammoniak durch den Haber-Bosch Prozess. Ammoniak kann zudem energetisch verwertet werden ohne zusätzliche CO₂-Emissionen zu emittieren. Methanol ist als wichtiger Ausgangsstoff zur Herstellung von Plattformchemikalien wie Formaldehyd, Essigsäure und Dimethylether notwendig. Die Dekarbonisierung dieser beiden Prozesse durch die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff kann so einen relevanten Teil zur Dekarbonisierung der Industriesektoren beitragen. Zudem ist die notwendige Infrastruktur zur Herstellung der beiden chemischen Verbindungen bereits vorhanden.



Abbildung 3: Anlage zur Methanolsynthese, Quelle: R_Yosha - stock.adobe.com

Fazit

Die in dieser Publikation betrachteten Prozessketten zur Herstellung erneuerbaren Wasserstoffs sind teilweise noch nicht in industriellem Maßstab oder ökonomisch vertretbar verfügbar, haben jedoch das Potential langfristig einen Beitrag zur Dekarbonisierung des zukünftigen Energiesystems zu leisten. Deshalb sollten sie Teil der Betrachtungen zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie Österreichs sein.

Quellen

RED III

<https://data.europa.eu/doi/10.2833/122757>

SEG Marktbericht 2024

https://www.erneuerbaresgas.at/jart/prj3/erneuerbare_gase/main.jart?rel=de&content-id=1742759181487&reserve-mode=active

Global Hydrogen Review 2024

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>

Master Thesis: Evaluating process chains of renewable gases

Wasserstoffspeicherung

<https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/>

Die Servicestelle Erneuerbare Gase (SEG) ist eine Einrichtung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Energie und Tourismus (BMWET).

 Bundesministerium
Wirtschaft, Energie
und Tourismus

Impressum

Servicestelle Erneuerbare Gase
(SEG)
Österreichische Energieagentur
Mariahilferstraße 136
1150 Wien

service@erneuerbaresgas.at
+43 1 285 02 34

Tabelle 1: Ergebnisse der Berechnung der H₂-Prozessketten auf Basis von CH₄ aus der Biomassevergasung

Technologie	CH ₄ aus Biomassevergasung und katalytischer Methanpyrolyse ($\eta_{PC}=0,37$)	CH ₄ aus Biomassevergasung und Methan Dampfreformierung ($\eta_{PC}=0,46$)
Methanol Synthese	0,27	0,34
LOHC	0,30	0,38
H ₂ Druckspeicherung	0,26	0,32
H ₂ Flüssigspeicherung	0,15	0,18
Kryo-komprimierter H ₂	0,22	0,27
Metallhydride	0,34	0,43

Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnung der H₂-Prozessketten auf Basis von Wasser, organischen Lösungen, Abwasser und organischen Reststoffen

Technologie	Methanol Synthese	H ₂ Druckspeicherung	H ₂ Flüssigspeicherung	Kryo-komprimierter H ₂	Flüssige organische H ₂ -Träger	Metallhydride
Festoxid-Elektrolyse	0,65	0,60	0,34	0,52	0,71	0,80
AEL	0,59	0,55	0,31	0,47	0,64	0,73
PEM	0,51	0,48	0,27	0,41	0,56	0,63
Photoelektrolyse	0,09	0,08	0,05	0,07	0,10	0,11
AEM	0,60	0,56	0,32	0,48	0,66	0,74
Mikrobielle Elektrolyse	0,46	0,43	0,24	0,37	0,5	0,57

Ausgangsstoffe und Ressourcen	Herstellung	Speicherung	Produkte
Biomasse	Alkali-Elektrolyse	Haber-Bosch Prozess	Wasserstoff (H ₂)
Wasser (H ₂ O)	PEM-Elektrolyse	Methanolsynthese	Ammoniak (NH ₃)
Erneuerbares Methan (CH ₄)	Festoxid-Elektrolyse	Druckspeicherung von Wasserstoff	Methanol (CH ₃ OH)
	AEM-Elektrolyse	Flüssigspeicherung von Wasserstoff	
	Mikrobielle Elektrolyse	Kryo-komprimierter Wasserstoff	
	Photoelektrolyse	Flüssige organische Wasserstoffträger	
	Katalytische Methanpyrolyse	Metallhydride	
	Methan Dampfreformierung	Adsorption von Wasserstoff	



SEG | Servicestelle
Erneuerbare Gase

Ausgewählte Prozessketten für erneuerbaren Wasserstoff

