

KLIMABILANZIERUNG DER WASSERSTOFFHERSTELLUNG

Rüdiger Lutz, Dieter Franke, Andreas Bahr

EINLEITUNG

Erklärtes Ziel der Bundesregierung ist es, die Energiesysteme zu transformieren, um in Deutschland bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Wasserstoff (H_2), als ein vielseitiger chemischer Rohstoff und Energieträger, der für die Sicherung der Energieversorgung vieler Bereiche eingesetzt werden kann, wird dabei eine große Rolle spielen. In diesem Beitrag wird auf Basis der neueren wissenschaftlichen Literatur die Klimabilanz der unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Wasserstoff betrachtet.

Häufig wird Wasserstoff eine Farbe zugeordnet, die nach dem Herstellungsverfahren festgelegt ist. Als grün wird Wasserstoff bezeichnet, wenn er durch Elektrolyse erzeugt wurde und der Strom dafür aus erneuerbaren Quellen stammt. Als grauen Wasserstoff bezeichnet man Wasserstoff, der aus fossilen Energieträgern gewonnen wird und bei seiner Herstellung Kohlenstoffdioxid ausgestoßen wird. Dies ist der Fall beim heutigen Standardherstellungsverfahren, der Dampfreformierung. Wird das Kohlenstoffdioxid aufgefangen und langfristig unter der Erde gespeichert, dann wird er als blauer Wasserstoff bezeichnet. Darüber hinaus gibt es noch weitere Farben, die aber nicht immer einheitlich verwendet werden (Erklärungen siehe *Energiestudie 2021*).

Die Zuordnung des Wasserstoffs zu Farben ist aber nicht ausreichend, um die Klimawirksamkeit der unterschiedlichen Herstellungsverfahren zu beurteilen. Grundlage für eine bessere Beurtei-

lung der Klimawirksamkeit sind Ökobilanzen, die auf Basis fundierter und transparenter Eingangsparameter erstellt wurden.

WAS IST WASSERSTOFF?

Wasserstoff ist ein farbloses, geruchloses und ungiftiges Gas, das bei Temperaturen unter -252 °C flüssig wird. Wasserstoff ist das chemische Element mit der geringsten Atommasse und dem kleinsten Atomradius. Bezogen auf die Masse, ist die Energiedichte zwar hoch (Heizwert 120 MJ/kg ; zum Vergleich Methan 50 MJ/kg), bezogen auf das Volumen aber eher gering (Heizwert $10,8\text{ MJ/Nm}^3$, zum Vergleich Methan $35,9\text{ MJ/Nm}^3$). Wasserstoff kann auch natürlich vorkommen und wird durch verschiedene Reaktionsprozesse in der Erdkruste gebildet. Geringe Vorkommen dieses geogenen oder natürlichen Wasserstoffs wurden immer wieder in der Literatur beschrieben (siehe *CTN 63*).

Im Gegensatz zum geogenen Wasserstoff muss der heutzutage genutzte Wasserstoff energieaufwändig erzeugt werden. Er wird deshalb nicht als Energierohstoff, sondern als Energieträger bezeichnet. Eine Verwendung als Energieträger findet gegenwärtig allerdings noch kaum statt. Überwiegend wird Wasserstoff derzeit in der chemischen Industrie z. B. zur Ammoniak- und Methanolherstellung eingesetzt, sowie in Raffinerien zur Hydrierung von Kohlenwasserstoffen.

HERSTELLUNGSVERFAHREN

In Zukunft soll Wasserstoff verstärkt als Energieträger eingesetzt werden und dadurch helfen, die fossilen Energierohstoffe zu ersetzen und zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft beizutragen. Hierfür ist die möglichst emissionsarme Herstellung wichtig.

Die Wasserstoffherstellungsverfahren lassen sich in drei Gruppen einteilen (Abbildung 1)

- Thermochemischer Wasserstoff:
Herstellung aus Erdgas, Kohle oder Biomasse durch Reformierung oder thermochemische Wasserspaltung
- Elektrochemischer Wasserstoff:
Spaltung von Wasser mittels Elektrolyse
- Biologischer Wasserstoff:
Verfahren, die auf biologischen Prozessen beruhen, z. B. Fermentationen, bei denen Wasserstoff direkt entsteht.

Bei der Wasserstoffherstellung durch Reformierung und Vergasung aus Biomasse, Erdgas oder Kohle fällt immer Kohlenstoffdioxid als Produkt an. Um die Klimabilanz des Wasserstoffs zu verbessern kann ein großer Anteil des Kohlenstoffdioxids abgetrennt und dauerhaft im geologischen Untergrund gespeichert werden (*CCS, Carbon Capture and Storage*). Bei der Pyrolyse bleibt der Kohlenstoff in fester Form übrig.

Wasser lässt sich nur bei unwirtschaftlich hohen Temperaturen (>1700 °C) thermisch in Wasserstoff und Sauerstoff spalten. Die Idee bei den Thermochemischen-Zyklen ist eine Aufspaltung in Teilprozesse. Diese ergeben in der Summe die gewünschte Wasserspaltung, laufen aber bei deutlich niedrigeren Temperaturen ab, z. B. Schwefelsäure-Jod-Verfahren (drei Reaktionen bei 830 °C, 120 °C und 320 °C) oder Westinghouse-Zyklus, der mit Elektrolyse gekoppelt ist.

Die Wasserelektrolyse ist ein elektrochemischer Prozess, der Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff auftrennt. Strom wird

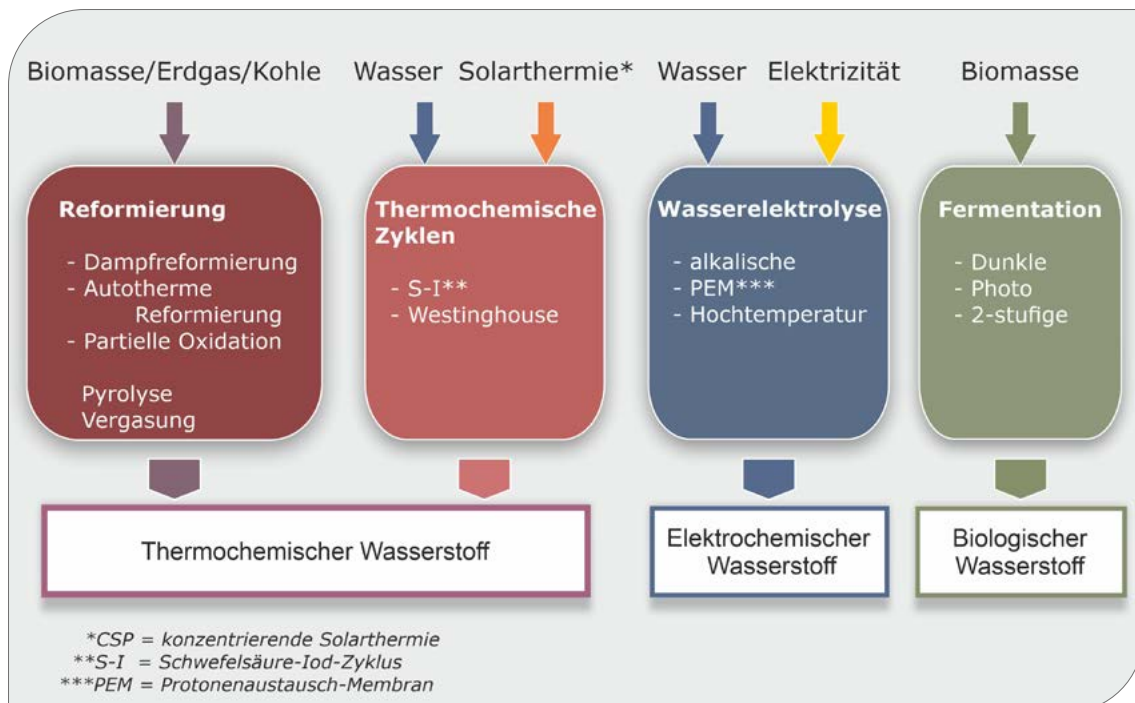


Abbildung 1: Herstellungsverfahren von Wasserstoff aus verschiedenen Ausgangsstoffen und durch unterschiedliche Prozesse; verändert nach Valente et al.¹.

durch Wasser geleitet und an den Elektroden werden Wasserstoff bzw. Sauerstoff frei.

Bei der Fermentation wird Biomasse durch Mikroorganismen zersetzt, wobei u. a. Wasserstoff entsteht. Je nach Substraten und eingesetzten Mikroorganismen gibt es verschiedene Varianten, z. B. dunkle Fermentation und photobiologische Wasserspaltung.

Kleinere Mengen an Wasserstoff lassen sich z. B. in Drucktanks speichern, wobei allerdings erhebliche Verluste auftreten. Vergleichsweise gut lässt sich Wasserstoff in Salzkavernen speichern, wobei hier auch längere Zeiträume von Monaten möglich sind. Wie sich Wasserstoff in Porenspeichern verhält ist noch Gegenstand der Forschung^{2,3}. Für Deutschland wurden Aspekte zu einer möglichen *Wasserstoffspeicherung im Untergrund* betrachtet².

TREIBHAUSGASBILANZ VON WASSERSTOFFHERSTELLUNGSVERFAHREN

Die Hauptfrage, die sich stellt ist, wie schädlich das jeweilige Verfahren zur Wasserstoffherstellung für das Klima ist.

Um die Frage der Umweltauswirkungen umfassend zu beantworten, werden Ökobilanzen berechnet. Ökobilanzen sind ein standardisiertes Werkzeug (DIN ISO 14040 und 14044^{4,5}), um die Umweltauswirkungen eines Produkts von der Rohstoffgewinnung zur Erzeugung über die Nutzung bis zur Nachnutzung (Recycling, Verschrotten, Verbrennen) zu erfassen. Dabei wird der gesamte Verlauf des Lebensweges, von der „Wiege bis zur Bahre“ (engl. cradle-to-grave) oder bis zu einem definierten Punkt (engl. cradle-to-gate) betrachtet. Speziell für Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen wurde ein Leitfaden für die Europäische Union erstellt (FC-HyGuide⁶).

Zur Klimabilanz der Wasserstoffherstellung liegen zahlreichen Studien und Berichte vor. Dabei

wird der Lebensweg für jedes Verfahren analysiert und das Ergebnis als Kohlenstoffdioxid-Äquivalent ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) angegeben, d. h. es werden auch noch weitere Treibhausgase (meist CH_4 und N_2O) untersucht und in CO_2 -Einheiten umgerechnet (Abbildung 2).

Eine Zusammenschau der wissenschaftlichen Literatur zu Ökobilanzen der Wasserstoffherstellung zeigt große Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Verfahren, als auch innerhalb der einzelnen Verfahren. Der Standardprozess zur Wasserstoffherstellung ist gegenwärtig die Dampfreformierung von Erdgas (Methanreformierung, grauer Wasserstoff) und der erzeugte Wasserstoff wird zum allergrößten Teil in Raffinerien und zur Ammoniaksynthese verwendet⁷. Bei der Methanreformierung gekoppelt mit Kohlenstoffdioxidspeicherung (CCS, blauer Wasserstoff) sind die Methanverluste in der Erdgas-Vorkette sowie die erzielten CO_2 -Abscheidungsraten für die Klimabilanz des erzeugten Wasserstoffs von entscheidender Bedeutung⁸.

Ein detaillierter Vergleich der Studienergebnisse zeigt aber auch für die gleichen betrachteten Herstellungsverfahren eine große Spannweite (Abbildung 2). Dies liegt einerseits an unterschiedlichen Eingangsparametern und Rahmenbedingungen oder der Nichtkenntlichmachung genauer Rahmenbedingungen. Unterschiede resultieren auch aus technischen Aspekten wie z. B. der Reinheit des produzierten Wasserstoffs, dem Druck am Ende des Herstellungsprozesses oder unterschiedlichen zugrunde gelegten Heizwerten. Weitere Faktoren sind u. a. der Standort oder die Größe der Anlage. Zu berücksichtigen ist auch, dass hier Verfahren verglichen werden, die schon großtechnisch stattfinden oder nur im Labormaßstab umgesetzt wurden.

Dennoch lassen sich generelle Aussagen treffen. Bei der gegenwärtigen Herstellung von Wasserstoff fallen immer Treibhausgase an. Diese lassen sich allerdings minimieren und im Falle der Verwendung von Biomassevergasung, gekoppelt mit Kohlenstoffdioxidspeicherung (CCS) werden sogar negative Emissionen möglich. Allerdings ist die Erzeugung großer Mengen Biomasse, die

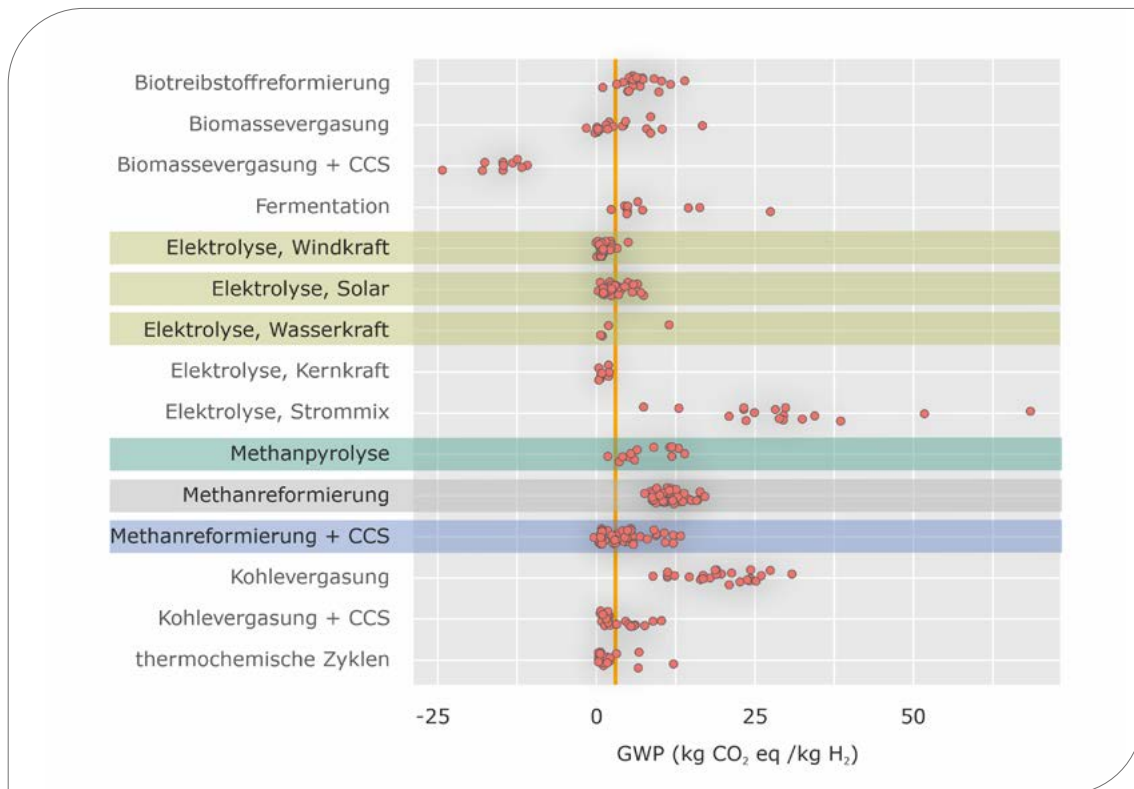


Abbildung 2: Zusammenschau der wissenschaftlichen Literatur zur Treibhausgasbilanz (GWP, Global-Warming-Potential) der verschiedenen Arten der Wasserstoffherstellung; hier bezogen auf unterschiedliche Rahmenbedingungen. Farblich hinterlegt sind die häufig verwendeten Wasserstofffarben. Die orange Linie markiert den Grenzwert der EU für klimaschonenden Wasserstoff von $3,0 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg H}_2$. Die Datenpunkte stammen aus den Publikationen^{1,10-33}.

den Einsatz von Düngemitteln und Diesel erfordern, nicht sinnvoll (erste Generation von Biomasse, z. B. Palmöl, Raps, Getreide), oder durch die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder den Flächenverbrauch kritisch zu sehen. Weiterentwicklungen zu Biomasse der zweiten und dritten Generation (z. B. Zellulose, Reststoffe, Algen) verbessern einige dieser Nachteile, die verfügbare Menge ist jedoch noch sehr limitiert und die Kosten sehr hoch.

Für die Klimabilanz der Wasserelektrolyse ist die Herkunft des eingesetzten Stromes entscheidend. Sehr deutlich zeigen sich die Unterschiede in der Stromgewinnung einzelner Länder und damit in der Klimabilanz für die Wasserstoff-

herstellung (siehe Zeile Elektrolyse, Strommix in Abbildung 2). Neben den unterschiedlichen Stromerzeugungsarten, wie Anteil an Kohle, Kernenergie oder erneuerbaren Energien, gehen auch länderspezifische Faktoren ein, wie Sonnenscheindauer, Wind- und Wasserangebot. Die Herstellung über einen Strommix, der größere Anteile Kohlestrom beinhaltet, wie gegenwärtig noch in Deutschland, schneidet hier besonders schlecht ab.

Stammt der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Energien, dann werden sehr gute Klimabilanzen erreicht. Allerdings werden auch dabei Treibhausgase emittiert und diese können über den EU-Grenzwerten für erneuerbaren Wasser-

stoff liegen. Der Treibhausgasanteil bei Strom aus erneuerbaren Energien resultiert aus der Herstellung und Installation der Anlagen. Solarzellen werden gegenwärtig zu einem großen Teil in China gefertigt, mit einem großen Anteil von Kohlestrom für die Erzeugung des Siliziums und anderer Bestandteile. Bei Windkraftanlagen müssen die Bestandteile, Fundamente aus Beton und Metall, Flügelblätter aus Verbundwerkstoffen und Elektronikkomponenten gefertigt werden und verursachen dadurch einen Treibhausgasausstoß, der in die produzierte Strommenge einfließt. Je nach Elektrolyseanlage werden unterschiedliche Mengen an mineralischen Rohstoffen für deren Herstellung benötigt³⁴. Bei den erneuerbaren Energien Windkraft, Wasserkraft und Solarenergie ist der Standort der jeweiligen Anlage entscheidend für die Klimabilanz. Um eine hohe Auslastung der Elektrolyseure zu erreichen, ist eine möglichst kontinuierliche Stromlieferung erforderlich, was aber bei erneuerbaren Energien oft nicht der Fall ist. Deshalb sind neben verschiedenen Stromerzeugungsverfahren auch unterschiedliche Elektrolyseverfahren nötig, die ebenfalls Einfluss auf die Klimabilanz haben. Mit den thermochemischen Zyklen lassen sich gute Klimabilanzen erreichen, wenn z. B. Solarenergie in Form von Photovoltaik (PV) mit konzentrierender Solarthermie (CSP) gekoppelt wird und dadurch die Nutzungsdauer einer Anlage steigt³⁵. Zukünftig wird sich die Klimabilanz der Elektrolyse aus erneuerbaren Energien vor allem dadurch verbessern, dass auch für die Herstellung der Anlagen Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen wird.

Die heutigen Standardverfahren zur Wasserstoffherstellung, Methanreformierung und Kohlevergasung können ihre Klimabilanz durch die Kopplung mit CCS deutlich verbessern und, bei Anwendung von Best-Practise-Standards, unter den erwarteten Grenzwert für erneuerbaren Wasserstoff kommen (Abbildung 2).

In den Arbeiten von Valente et al.^{1,30,36} (Abbildung 3) wurden die Ergebnisse aus zahlreichen veröffentlichten Studien auf einheitliche Rahmenbedingungen bezogen, wodurch sich die Zahl der verwertbaren Studien reduzierte, aber die Bandbreite der Ergebnisse abnahm. Eine solche Vereinheitlichung der Rahmenbedingungen (harmonisierte Ökobilanzen) ist hilfreich, um die unterschiedlichen Verfahren objektiver vergleichen zu können. Dazu zählt auch der Ansatz auf EU-Ebene (FC-HyGuide⁶).

Grenzwerte für sauberen Wasserstoff variieren in unterschiedlichen Ländern (dena/World Energy Council-Studie³⁷). So betrachtet China Wasserstoff unter $14,51 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg H}_2$ als „Low-Carbon-Wasserstoff“ und unterhalb von $4,9 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg H}_2$ als sauberen und erneuerbaren Wasserstoff. In Deutschland gilt der Wasserstoff als klimaschonend, wenn er den Grenzwert von $3,0 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg H}_2$ ⁹ einhält. Wasserstoffbasierte synthetische Brennstoffe müssen eine 70 %-Reduktion gegenüber einem Vergleichswert ($94 \text{ g CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$) für fossile Brennstoffe aufweisen^{9,38}. In dem von der EU-Kommission finanzierten Projekt CertifHy³⁹ wird ein Herkunftsnachweis für Grünen- oder Low-Carbon-Wasserstoff entwickelt. Der Grenzwert liegt dort bei $4,4 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg H}_2$. Die Bezeichnung des klimafreundlichen Wasserstoffs variiert und ist nicht einheitlich festgeschrieben. So finden sich Begriffe wie kohlenstoffarmer, klimaschonender, grüner, sauberer oder erneuerbarer Wasserstoff (Low-Carbon, Green, Clean, Renewable).

Wasserstoff ist ein vielfältig einsetzbarer Energieträger, dessen Bedeutung im Zuge der Energiewende deutlich zunehmen wird. Umso wichtiger erscheint es, mögliche negative Implikationen der Wasserstoffnutzung von Anbeginn an mitzubetrachten und nach Möglichkeit auszuschließen.

Wasserstoff ist selbst auch ein direktes, vor allem aber indirekt klimawirksames Gas, so dass Verluste im Netz und bei der Verwendung nicht nur

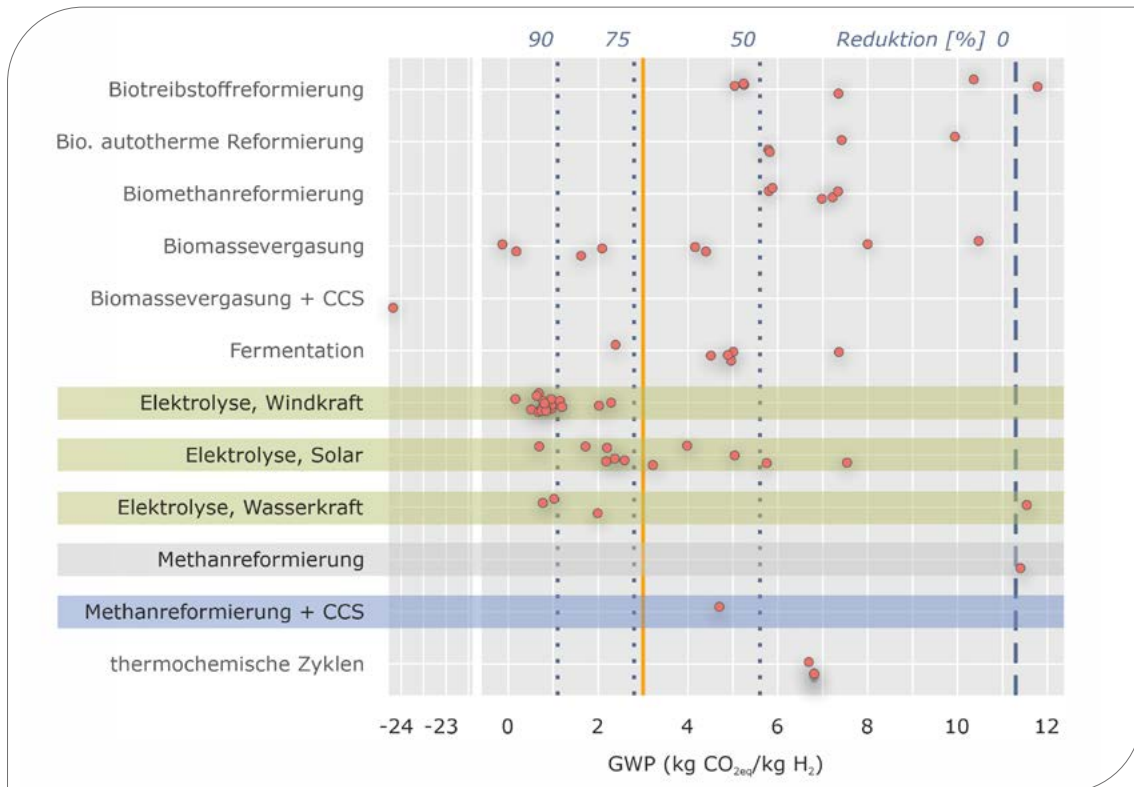


Abbildung 3: Zusammenschau der wissenschaftlichen Literatur zur Treibhausgasbilanz (GWP) der verschiedenen Arten der Wasserstoffherstellung, hier auf einheitliche Rahmenbedingungen (harmonisierte Ökobilanzen) bezogen³⁶. Farblich hinterlegt sind die häufig verwendeten Wasserstofffarben. Die orange Linie markiert den Grenzwert der EU für klimaschonenden Wasserstoff von 3,0 kg CO_{2eq}/kg H₂⁹, was einer Reduktion der Treibhausgase um 73,4 %, gegenüber einem fossilen Brennstoff (94 g CO_{2eq}/MJ) entspricht. Die gestrichelte Linie zeigt den Ausgangswert (fossiler Brennstoff) und die gepunkteten Linien mit nebenstehender Zahl die jeweilige Reduktion. Die Datenpunkte stammen aus den Publikationen^{1,30}.

aus Sicherheitsgründen, sondern auch aus ökonomischen und ökologischen Gründen minimiert werden müssen⁴⁰⁻⁴⁵. Auch wenn hier vorrangig die Klimabilanz betrachtet wird, sollte Erwähnung finden, dass die Verfahren der Wasserstoffherstellung auch Auswirkungen auf andere Schutzgüter wie z. B. Wasser und Boden haben. Am bedeutendsten erscheinen hier die Versauerung durch Stickstoff- und Schwefelverbindungen und die Eutrophierung (Überdüngung) bei der Biomasseerzeugung. Gebiete mit hoher Sonneneinstrahlung sind für die Solarstromgewinnung, bestmöglich gekoppelt mit konzentrierender Solarthermie, besonders geeignet. Allerdings fehlt es dort oft an dem nötigen Wasser, sodass entweder das Wasser oder der erzeugte Strom in Gebiete mit höherer Wasserverfügbarkeit transportiert werden müssen. In Ländern, in denen die Bevölkerung noch keinen dauerhaften Zugang zu

Energie hat, sollte für eine ausgewogene Nutzung sowohl für die Bevölkerung vor Ort als auch den Export von Wasserstoff gesorgt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zusammenschau der wissenschaftlichen Literatur zur Klimabilanz der Wasserstoffherstellung zeigt, dass in der Übergangsphase zu einem erneuerbaren Energiesystem, bei allen Verfahren zur Wasserstoffherstellung noch Treibhausgase ausgestoßen werden. Ein schnelles Hochfahren der Wasserstoffherstellung und -nutzung wird verschiedene Verfahren involvieren, besonders wenn der Wasserstoff aus unterschiedlichen Ländern stammt. Die Menge an erzeugten Treibhausgasen variiert zwischen den Methoden, aber

auch innerhalb der Methoden auf Grund von unterschiedlichen Bedingungen an den Standorten der Wasserstoffherzeugung. Eine einfache Einteilung der Herstellungsarten nach Farben ist nicht ausreichend, um die Klimaauswirkungen zu beurteilen. Vielmehr sollten alle Herstellungs- und Nutzungspfade mit harmonisierten Ökobilanzen begleitet werden, damit die Auswirkungen auf das Klima verlässlich beurteilt werden können. Ein definierter Grenzwert ist wichtig, ab dem Wasserstoff als klimaschonend gelten kann. Derartige Grenzwerte unterscheiden sich zum Teil erheblich, existieren bisher nur regional oder national und sind nicht international verbindlich. Ein einheitlicher Grenzwert kann auch dazu beitragen, dass die Verfahren nach dem jeweils besten Stand der Technik durchgeführt werden, um den Grenzwert zu unterschreiten.

LITERATUR

- 1 VALENTE, A., IRIBARREN, D. & DUFOUR, J. (2017): Harmonised life-cycle global warming impact of renewable hydrogen. *Journal of Cleaner Production* 149, 762-772, [doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.163](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.163).
- 2 WARNECKE, M. & RÖHLING, S. (2021): Underground hydrogen storage – Status quo. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, [doi:10.1127/zdgg/2021/0295](https://doi.org/10.1127/zdgg/2021/0295).
- 3 HEINEMANN, N. ET AL. (2021): Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. *Energy & Environmental Science* 14, 853-864, [doi:10.1039/d0ee03536j](https://doi.org/10.1039/d0ee03536j).
- 4 DIN EN ISO 14044:2021-02 (2021): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. 70, [doi:10.31030/3179656](https://doi.org/10.31030/3179656).
- 5 DIN EN ISO 14040:2021-02 (2021): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020 36, [doi:10.31030/3179655](https://doi.org/10.31030/3179655).
- 6 LOZANOVSKI, A., SCHULLER, O. & FALTEMBACHER, M. (2011): FC-HyGuide – Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H₂ Technologies. 139 – URL: <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/FC-Guidance-Document.pdf>.
- 7 IEA (2021): Hydrogen. – URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>.
- 8 BAUER, C. ET AL. (2022): On the climate impacts of blue hydrogen production. *Sustainable Energy & Fuels*, [doi:10.1039/d1se01508g](https://doi.org/10.1039/d1se01508g).
- 9 EUROPÄISCHE KOMMISSION (2021): Delegierte Verordnung (EU) 2021/ der Kommission vom 4. Juni 2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments., 349. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2139&from=EN>.
- 10 AL-QAHTANI, A., PARKINSON, B., HELLGARDT, K., SHAH, N. & GUILLEN-GOSALBEZ, G. (2021): Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied Energy* 281, 115958, [doi:10.1016/j.apenergy.2020.115958](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958).
- 11 ANTONINI, C. ET AL. (2020): Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis. *Sustainable Energy & Fuels* 4, 2967-2986, [doi:10.1039/d0se00222d](https://doi.org/10.1039/d0se00222d).
- 12 BALCOMBE, P. ET AL. (2018): The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 1077-1088, [doi:10.1016/j.rser.2018.04.089](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.089).

- 13 BHANDARI, R., TRUDEWIND, C. A. & ZAP, P. (2012): Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods – A Review. 47 (Forschungszentrum Jülich, Institute of Energy and Climate Research – Systems Analysis and Technology Evaluation (IEK-STE)). – URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn21/1748497219.pdf>.
- 14 BHANDARI, R., TRUDEWIND, C. A. & ZAPP, P. (2014): Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production* 85, 151-163, [doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048).
- 15 HOWARTH, R. W. & JACOBSON, M. Z. (2021): How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, [doi:10.1002/ese3.956](https://doi.org/10.1002/ese3.956).
- 16 IEA (2017): Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS. (IEA Greenhouse Gas R&D Programme).
- 17 IEA (2019): The Future of Hydrogen, 199. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- 18 MEHMETI, A., ANGELIS-DIMAKIS, A., ARAMPATZIS, G., MCPHAIL, S. & ULGIATI, S. (2018): Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* 5, 24, [doi:10.3390/environments5020024](https://doi.org/10.3390/environments5020024).
- 19 MURADOV, N. (2017): Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: Status and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 14058-14088, [doi:10.1016/j.ijhydene.2017.04.101](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.101).
- 20 NETL (2011): Assessment of Hydrogen Production with CO₂ Capture Volume 1: Baseline State-of-the-Art Plants. (DOE / National Energy Technology Laboratory).
- 21 PARKINSON, B., BALCOMBE, P., SPEIRS, J. F., HAWKES, A. D. & HELLGARDT, K. (2019): Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes. *Energy & Environmental Science* 12, 19-40, [doi:10.1039/c8ee02079e](https://doi.org/10.1039/c8ee02079e).
- 22 RAMSDEN, T., RUTH, M., DIAKOV, V., LAFFEN, M. & TIMBARIO, T. A. (2013): Hydrogen Pathways. (NREL).
- 23 ROBERT EDWARDS AND, D. R., JEAN-FRANÇOIS LARIVÉ AND & WEINDORF, W. (2014): WELL-TO-TANK Report Version 4.a. JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS. (European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport).
- 24 SALKUYEH, Y. K., SAVILLE, B. A. & MACLEAN, H. L. (2017): Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 18894-18909, [doi:10.1016/j.ijhydene.2017.05.219](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.219).
- 25 SPATH, P. L. & MANN, M. K. (2001): Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming. (NREL).
- 26 SRU (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. (Sachverständigenrat für Umweltfragen).
- 27 TIMMERBERG, S., KALTSCHMITT, M. & FINKBEINER, M. (2020): Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs. *Energy Conversion and Management: X* 7, 100043, [doi:10.1016/j.ecmx.2020.100043](https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100043).
- 28 TOCK, L. & MARÉCHAL, F. (2012): H₂ processes with CO₂ mitigation: Thermo-economic modeling and process integration. *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 11785-11795, [doi:10.1016/j.ijhydene.2012.05.046](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.046).

- 29 VALENTE, A., IRIBARREN, D. & DUFOUR, J. (2018): Harmonising the cumulative energy demand of renewable hydrogen for robust comparative life-cycle studies. *Journal of Cleaner Production* 175, 384-393, doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.069.
- 30 VALENTE, A., IRIBARREN, D. & DUFOUR, J. (2021): Harmonised carbon and energy footprints of fossil hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 17587-17594, doi:10.1016/j.ijhydene.2020.03.074.
- 31 VALENTE, A., IRIBARREN, D. & DUFOUR, J. (2021): Comparative life cycle sustainability assessment of renewable and conventional hydrogen. *Science of The Total Environment* 756, 144132, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144132.
- 32 VOLDSUND, M., JORDAL, K. & ANANTHARAMAN, R. (2016): Hydrogen production with CO₂ capture. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 4969-4992, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.01.009.
- 33 WULF, C. & KALTSCHMITT, M. (2018): Hydrogen Supply Chains for Mobility – Environmental and Economic Assessment. *Sustainability* 10, 1699, doi:10.3390/su10061699.
- 34 DERA (2022): Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse. 26. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-22.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 35 ROEB, M. ET AL. (2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung (DLR, Institut für Solarforschung). – URL: <https://elib.dlr.de/137796/>
- 36 VALENTE, A., IRIBARREN, D. & DUFOUR, J. (2017): Life cycle assessment of hydrogen energy systems: a review of methodological choices. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22, 346-363, doi:10.1007/s11367-016-1156-z.
- 37 GERMAN ENERGY AGENCY/WORLD ENERGY COUNCIL (2022): Global Harmonisation of Hydrogen Certification. 54. – URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/REPORT_Global_Harmonisation_of_Hydrogen_Certification.pdf.
- 38 EUROPEAN PARLIAMENT (2018): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. – URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>.
- 39 CERTIFHY (2022): – URL: <https://www.certifhy.eu>
- 40 VAN RUIJVEN, B., LAMARQUE, J.-F., VAN VUUREN, D. P., KRAM, T. & EERENS, H. (2011): Emission scenarios for a global hydrogen economy and the consequences for global air pollution. *Global Environmental Change* 21, 983-994, doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.03.013.
- 41 DERWENT, R. ET AL. (2006): Global environmental impacts of the hydrogen economy. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications* 1, 57-67, doi:10.1504/IJNHPA.2006.009869.
- 42 OCKO, I. B. & HAMBURG, S. P. (2022): Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 9349-9368, doi:10.5194/acp-22-9349-2022.
- 43 DERWENT, R. G. ET AL. (2020): Global modelling studies of hydrogen and its isotopomers using STOICHEM-CRI: Likely radiative forcing consequences of a future hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 9211-9221, doi:10.1016/j.ijhydene.2020.01.125.
- 44 COOPER, J., DUBEY, L., BAKKALOGLU, S. & HAWKES, A. (2022): Hydrogen emissions from the hydrogen value chain-emissions profile and impact to global warming. *Science of The Total Environment*, 154624, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154624.

45 WARWICK, N., GRIFFITHS, P., KEEBLE, J., ARCHIBALD, A. & PYLE, J. (2022): Atmospheric implications of increased Hydrogen use. 75. – URL: <http://www.gov.uk/government/publications/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use>.

IMPRESSUM

Herausgeber:

© **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, September 2022**

B1.3 Geologie der Energierohstoffe,
Polargeologie
Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover

E-Mail: energierohstoffe@bgr.de

www.bgr.bund.de