



Dokumentation

Einzelfragen zu wasserstoffbasierten Kraftstoffen

Einzelfragen zu wasserstoffbasierten Kraftstoffen

Aktenzeichen:

WD 8 - 3000 - 026/23

Abschluss der Arbeit:

16. Juni 2023

Fachbereich:

WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzugeben und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Wasserstoffbasierte Kraftstoffe	4
3.	Herstellungsverfahren	5
4.	Energiedichten der Energieträger	7
5.	Transportwege	8
6.	Kosten von Herstellung und Transport	10
7.	Technologien für wasserstoffbasiertes Kraftstoffe in der Mobilität und im Gebäudesektor	12

1. Einleitung

Die vorliegende Dokumentation liefert einen Einblick in die Arten, Herstellungs- und Transportverfahren von Wasserstoff. Der Schwerpunkt liegt auf wasserstoffbasierten Kraftstoffen. Darüber hinaus werden energietechnische und wirtschaftliche Aspekte erläutert.

2. Wasserstoffbasierte Kraftstoffe

Es gibt verschiedene Arten von wasserstoffbasierten Kraftstoffen. Wasserstoff kann sowohl gasförmig wie auch verflüssigt genutzt werden. Reiner Wasserstoff kann z.B. direkt als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge verwendet werden. In einer Brennstoffzelle reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff aus der Luft, wobei Wasser und elektrische Energie erzeugt werden. Diese elektrische Energie treibt den Elektromotor des Fahrzeugs an. Der Wasserstoff wird in Drucktanks gespeichert. Für den Einsatz in Lkws wird sowohl gasförmiger als auch flüssiger Wasserstoff eingesetzt. In Pkws wird gasförmiger Wasserstoff genutzt.¹

Synthetische Kraftstoffe², sogenannte „E-Fuels“ werden ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt. Dabei wird aus Wasser zunächst Wasserstoff gewonnen. Aus Kohlendioxid und Wasserstoff wird der synthetische Kraftstoff (Benzin, Diesel, Gas sowie Kerosin) hergestellt. Für diese Verfahren haben sich die Begriffe Power-to-X (PtX), Power-to-Liquid (PtL) oder Power-to-Gas (PtG) durchgesetzt. Im Rahmen aktueller Forschungsaktivitäten am Karlsruher Institut für Technologie wird beispielsweise eine Forschungsanlage entwickelt, die einen synthetischen und klimaneutralen Kraftstoff herstellen soll. Die Anlage soll in einem ersten Schritt das Kohlendioxid aus der Umgebungsluft herausfiltern. Verbunden mit Wasserdampf wird das Gemisch in Wasserstoff und Kohlenmonoxid gespalten. Daraus werden lange Kohlenwasserstoffketten gebildet. Im letzten Schritt werden die festen, langkettigen Kohlenwasserstoffe so aufgespalten, dass sie für die Herstellung von Benzin-, Kerosin- und Diesel genutzt werden können.³

¹ Weiterführende Informationen in: Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff – Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Kapitel 1

Umweltbundesamt (2023). „Wasserstoff - Schlüssel im künftigen Energiesystem“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-künftigen-energiesystem#Geb%C3%A4ude>

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FFE) (2019). „Welche strombasierten Kraftstoffe sind im zukünftigen Energiesystem relevant?“, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/welche-strombasierten-kraftstoffe-sind-im-zukuenftigen-energiesystem-relevant/>

² Oft wird der Begriff „E-Fuels“ für synthetische Kraftstoffe verwendet. Die Definitionen sind nicht immer eindeutig. Der Begriff „E-Fuels“ ist weit gefasst. Als E-Fuel bezeichnet man synthetische Kraftstoffe, die mittels Strom aus Wasser und Kohlenstoffdioxid hergestellt werden. Der Begriff „Synthetische Kraftstoffe“ beinhaltet z.B. auch Kraftstoffe die aus Biomasse hergestellt werden.

³ Bundesregierung (2023). „Sprit aus Luft und Ökostrom“, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/sprit-aus-luft-und-energie-1691506>

Eine Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste zu „E-Fuels“ aus dem Jahr 2018 liefert einen Überblick zum Entwicklungsstand und -potential, zu möglichen Herstellungsverfahren, zum Wirkungsgrad, zur Umweltverträglichkeit und zur Wirtschaftlichkeit synthetischer Kraftstoffe.⁴

Wasserstoff kann auch mit anderen Gasen gemischt werden, um verschiedene Arten von Kraftstoffen auf Wasserstoffbasis herzustellen. Zum Beispiel wird ein Gemisch aus Wasserstoff und Erdgas als „Wasserstoff-Erdgas-Mischung“ oder „Hythane“ bezeichnet. Diese Mischung kann in Fahrzeugen mit modifizierten Verbrennungsmotoren verwendet werden.⁵

Auch Ammoniak, der aus Wasserstoff und Stickstoff hergestellt wird, kann als Träger für Wasserstoff dienen und als Energiespeichermedium für Wasserstoff verwendet werden. Es kann auch in speziellen Brennstoffzellenfahrzeugen oder in Verbrennungsmotoren als Wasserstoffquelle eingesetzt werden.⁶

Metallhydride sind Materialien, die Wasserstoff chemisch binden und freisetzen können. Sie werden als Wasserstoffspeicher verwendet und können in Wasserstofftanks für den Transport und die Nutzung in Fahrzeugen eingesetzt werden.⁷

3. Herstellungsverfahren

Für die ökologischen und ökonomischen Betrachtungen des Wasserstoffs als sogenannter Energieträger sind zudem die Parameter der Produktionspfade relevant. Die verschiedenen Pfade der Wasserstofferzeugung werden häufig nach Farben kategorisiert. Die wichtigsten Farben und Produktionspfade werden im Folgenden kurz erläutert.⁸

Auf der Basis unterschiedlicher Primärenergien gibt es verschiedene Umwandlungsarten. Beispiele verschiedener Primärenergien sind: Erneuerbare oder fossile Energien, Wasserstoff als industrielles Nebenprodukt und Sekundärenergien (Strom, Biogas, Ethanol, Öle sowie Holz und

⁴ Deutscher Bundestag Wissenschaftliche Dienste (2018). „E-Fuels“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/544092/dab1b2ac5f0264e4b35ea370d197922e/wd-5-008-18-pdf-data.pdf>

⁵ Europäische Kommission (2022). Factsheet „Development, Deployment and Assessment of Infrastructures and Fleets based on Hythane and Hydrogen as Alternative Fuels for Transport“, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/92728/en>

⁶ Fraunhofer ISE (2022). „Ammoniak als Wasserstoff-Vektor: Neue integrierte Reaktortechnologie für die Energiewende“, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2022/ammoniak-als-wasserstoff-vektor-neue-integrierte-reaktortechnologie-fuer-die-energiewende.html>

⁷ EMCEL (2021). „Wie funktionieren LOHC-Wasserstoffspeicher?“, <https://emcel.com/de/lohc-wasserstoffspeicher/>

Weiterführende Informationen in: Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff – Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Seite 112

⁸ Hydrogen Europe (2023). „The Colors of Hydrogen“, <https://hydrogeneurope.eu/in-a-nutshell/>

Stroh). Verschiedene Umwandlungsarten hingegen sind: Elektrolyse, biologische Umwandlung, Dampfreformierung, Kohlevergasung oder Methanpyrolyse.⁹

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) hat die wichtigsten Herstellungsverfahren und Wasserstoffarten zusammengefasst:

„Der aktuell am häufigsten produzierte Wasserstoff ist der sogenannte **graue** Wasserstoff. Hierbei wird Wasserstoff von einem fossilen Kohlenwasserstoff, typischerweise Erdgas, abgespalten. Dies geschieht in der Regel mittels Dampfreformierung von Erdgas. Dabei reagiert das Erdgas mit Wasserdampf und es entstehen Wasserstoff und CO₂, welches in die Atmosphäre entweicht. **Blauer** Wasserstoff wird ebenfalls mittels Dampfreformierung erzeugt. Im Unterschied zum grauen Wasserstoff werden jedoch die dabei entstehenden CO₂-Emissionen mittels CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) abgeschieden und gespeichert. Somit entweicht das CO₂, das im Prozess entsteht, nicht in die Atmosphäre. **Türkiser** Wasserstoff wird ebenfalls aus fossilem Erdgas hergestellt. Hierbei kommt jedoch das Verfahren der Pyrolyse zum Einsatz. Es entsteht statt gasförmigem CO₂ fester Kohlenstoff, eine Gasabscheidung ist somit nicht notwendig. Sowohl bei blauem als auch türkissem Wasserstoff sind jedoch Emissionen der Produktion des Methans zu berücksichtigen. **Grüner** Wasserstoff wird auf Basis von erneuerbaren Energien hergestellt. Meist geschieht dies mittels Wasserelektrolyse, bei der Wasser unter Einsatz von Elektrizität in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Diese Elektrizität stammt aus erneuerbaren Energien und dadurch kann der Wasserstoff CO₂-neutral hergestellt werden.“¹⁰

Eine detaillierte Beschreibung der Herstellungsverfahren findet sich unter:

Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff – Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Kapitel 2.2, Seite 27

Schmidt, Th. (2020). „Wasserstofftechnik - Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft“, Carl Hanser Verlag München, 2020, Kapitel 5, Seite 217

Töpler, J., Lehmann, J. (2017). „Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven“, Springer Vieweg, 2017, Kapitel 11, Seite 207

⁹ Quelle und weitere Informationen unter: <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/>

¹⁰ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) (2021). „Beitragsreihe Wasserstoff: Wie wird Wasserstoff produziert?“, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-wasserstoff-wie-wird-wasserstoff-produziert/>

4. Energiedichten der Energieträger

Die Energiemenge, die bei den einzelnen Herstellungsmethoden benötigt wird, variiert je nach Verfahren und Effizienz. Die Schätzungen hängen vom technologischen Fortschritt, Effizienzsteigerungen und regionalen Unterschieden ab. Die Energiedichte bei Kraft- bzw. Brennstoffen leitet sich von ihrem Heizwert oder von ihrem Brennwert ab. Dabei besitzen feste und flüssige Brennstoffe eine höhere Energiedichte als gasförmige.

Die folgende Tabelle zeigt Energiedichten verschiedener Energieträger.¹¹

Energieträger	Energiedichte (Heizwert) kWh/kg
Wasserstoff	33,3
Benzin	12
Diesel	11,9
Erdgas	10,6 - 13,1

Die Aufstellung zeigt, dass die Energiedichte von Wasserstoff etwa dreimal so groß ist, wie die von Benzin.

Die folgende Abbildung stellt in einer grafischen Übersicht der Energiepfade die verschiedenen wasserstoffbasierten und fossilen Antriebssysteme anhand ihrer jeweiligen Gesamtwirkungsgrade gegenüber. Die Grafik zeigt, dass der Strombedarf für Wasserstoff und synthetisches Methan im Vergleich zur direkten Stromnutzung sehr hoch ist.¹²

¹¹ Bild der Wissenschaft (2007). „Energiedichte verschiedener Kraftstoffe“, <https://www.wissenschaft.de/allgemein/energiedichte-verschiedener-kraftstoffe/>

¹² Fraunhofer ISI (2019). „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>

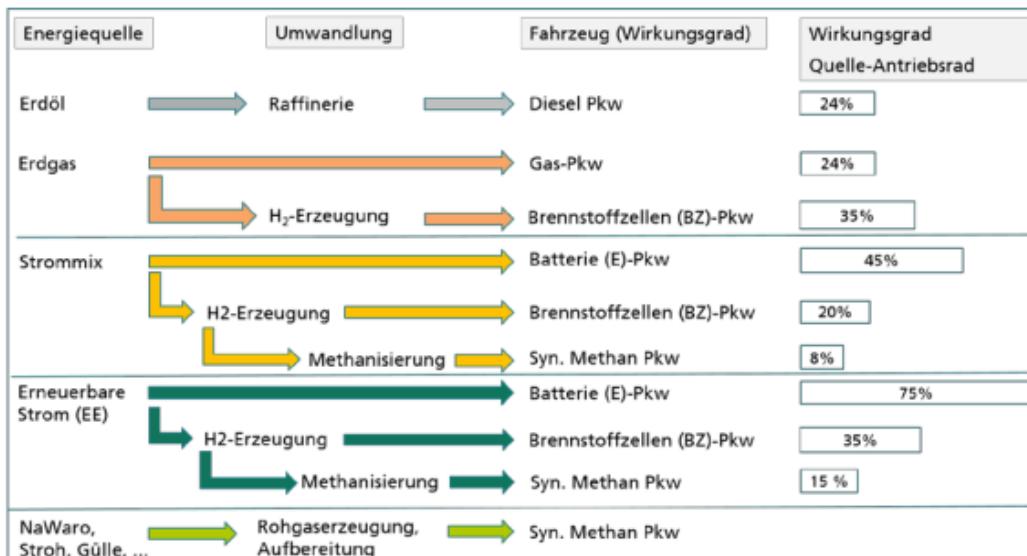


Abbildung 2-6: Übersicht über betrachtete Energiepfade und Antriebssysteme mit Gesamtwirkungsgraden

Der Energiekostenvergleich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für durchschnittliche Kraftstoff- bzw. Energieträgerpreise des 1. Quartals 2023 liefert folgende aktuelle Beträge für verfügbare Energieträger für Pkws:¹³

- Super E5 1,813 €/Liter, Super E10 1,757 €/Liter und Diesel B7 1,771 €/Liter,
- Strom 0,4978 € /kwh
- Erdgas H (CNG) 1,306 €/kg
- Autogas (LPG) 1,1101 €/Liter
- Wasserstoff (H₂) 13,51 €/kg.

5. Transportwege

Wasserstoff wird derzeit zum überwiegenden Teil in großtechnischen Anlagen in der Regel am Ort des Wasserstoffbedarfs betrieben. Nach Angaben von Synwoldt/Novak werden momentan 5 % der erzeugten Wasserstoffmengen gehandelt. Daher ist der Transport von Wasserstoff über größere Entfernung, oder die Verteilung an eine Vielzahl von Verbrauchern über größere Flächen derzeit noch von untergeordneter Bedeutung.¹⁴

¹³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2023). „Energiekostenvergleich für Pkws“, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html>

¹⁴ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff – Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Kapitel 3, Seite 93

Wasserstoff kann generell als Energieträger von der Erzeugungsstelle zum Ort seines Verbrauchs transportiert und verteilt werden. Dies kann über Leitungsnetze, sowie über die Straße und den Wasserweg mit geeigneten Transportmitteln und Speicherbehältern erfolgen:

- Mittels Transport über Leitungsnetze zum Verbraucher können angeschlossene Nutzer versorgt werden. Der Transport gilt als unflexibel und dessen Bau ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Vorteile sind die geringen laufenden Kosten, der Transport großer Mengen und die relativ geringen Energieverluste. Zudem besteht die Möglichkeit, das ausgebaupte Erdgasnetz für den Wasserstofftransport umzurüsten.¹⁵
- Der Transport des Wasserstoffs kann in komprimierter und flüssiger Form mit Hilfe von Lkws über das Verkehrsnetz erfolgen. Der Vorteil liegt in der Flexibilität. Nachteile sind die vergleichsweise hohen Kosten für relativ kleine Mengen. Zudem entsteht Energieaufwand für die Komprimierung und Kühlung.
- Flüssiger Wasserstoff kann ebenso mit Schiffen oder über das Schienennetz über weite Strecken transportiert werden.
- Mit Hilfe von flüssigen, organischen Wasserstoffträgern (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC¹⁶) kann zum Beispiel Wasserstoff in hoher Energiedichte in Form einer Diesel-ähnlichen Flüssigkeit unter Umgebungsbedingungen in existierenden Infrastrukturen für Kraftstoffe gespeichert, transportiert und auch an Bord von Fahrzeugen bereitgestellt werden. Die Forscher arbeiten daran, die Technologie mobil an Bord größerer Fahrzeuge, wie Schiffen, Zügen oder Lastwagen einzusetzen.¹⁷

¹⁵ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FFE) (2021). „Wie wird Wasserstoff transportiert?“, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-wasserstoff-wie-wird-wasserstoff-transportiert/>

Detaillierte Informationen unter: Schmidt, Th. (2020). „Wasserstofftechnik - Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft“, Carl Hanser Verlag München, 2020, Kapitel 6.1 bis 6.3

Siehe auch: Wissenschaftliche Dienste (2022). „Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur“, WD 8 - 3000 - 046/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/915112/d1a66b707de8458aa57fb107f240754d/WD-8-046-22-pdf-data.pdf>

¹⁶ LOHC sind chemische Energiespeicher für Wasserstoff. Diese organischen Verbindungen können durch chemische Reaktionen Wasserstoff aufnehmen und abgeben und deshalb als Speichermedien für Wasserstoff dienen. Sie ermöglichen die Langzeitspeicherung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff unter Umgebungsdruck und -temperatur. LOHC können in der Wasserstofflogistik und in Verbindung mit anderen Technologien der Wasserstoffherstellung und Wasserstoffnutzung als Energiespeicher zum Einsatz kommen.

Teichmann, D. et al. (2012). „Stabile Energieversorgung trotz unsteter Erzeugung : Konzept zur Speicherung und Nutzung von Erneuerbarer Energie durch flüssige Wasserstoffträger“ in „Solarzeitalter“: Politik, Kultur und Ökonomie erneuerbarer Energie. - 24 (2012), 1, Seite 70 - 77

Wissenschaftliche Dienste (2020). „Wasserstoffträgersysteme Einzelfragen zu Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/816048/454e182d5956d45a664da9eb85486f76/WD-8-058-20-pdf-data.pdf>

¹⁷ Ilg, P., Die Zeit (2019). „Wasserstoff in Dieselform“, <https://www.zeit.de/mobilitaet/2019-05/brennstoffzelle-wasserstoff-elektroautos-energiespeicher-mobilitaetswende-forschung>

Beim Transport sind zudem die Eigenschaften des Wasserstoffs zu berücksichtigen. Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. führt dazu aus: „Wasserstoff hat einige besondere Eigenschaften, die den Transport beeinflussen. Unter normalen Bedingungen ist er gasförmig und sehr leicht. Als sehr flüchtiges Gas entweicht er schnell und muss deswegen in besonders dichten Behältnissen gelagert werden. Wasserstoff hat eine dreimal höhere gravimetrische Energiedichte als Benzin. Das bedeutet, dass in einem Kilogramm Wasserstoff in etwa dreimal mehr Energie enthalten ist als in einem Kilogramm Benzin. Gleichzeitig hat er wegen seiner geringen Dichte eine sehr niedrige volumetrische Energiedichte unter normalen Bedingungen. Das heißt, in einem Liter Wasserstoff steckt nur sehr wenig Energie und der Transport benötigt sehr viel Raum. Um dies teilweise zu umgehen, kann der Wasserstoff komprimiert oder bei äußerst niedrigen Temperaturen verflüssigt werden. Vor allem Letzteres verursacht aber einen hohen Strombedarf.“¹⁸

Die Analysten der Studie „Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030“ kommen zu dem Schluss, dass Wasserstoff per Pipeline die günstigste Option für den Transport von reinem Wasserstoff ist und bereits in wenigen Jahren realisierbar wäre. Langfristig wäre der Transport von Wasserstoff per Schiff für die Experten eine wichtige Option. Während erneuerbares Ammoniak und synthetische Kohlenwasserstoffe kurzfristig verfügbar wären, bestünde bei synthetischen Kohlenwasserstoffen, die aus nicht-industriellen Kohlenstoffquellen hergestellt werden, noch erheblicher Entwicklungsbedarf.¹⁹

6. Kosten von Herstellung und Transport

Die Kosten für die Herstellung und den Transport wasserstoffbasierter Kraftstoffe hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. der Art des Kraftstoffs, der verwendeten Technologie, der Skalierung der Produktion, der Infrastruktur, den Energiepreisen und anderen lokalen Gegebenheiten. Beispielsweise lohnt sich der Transport über Pipelines bis 4000 km, für darüber hinausgehende Distanzen wird der Seetransport empfohlen.²⁰

Es folgen einige Anmerkungen zu Studien und Literaturquellen:

Die Autoren einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in Auftrag gegebenen Studie „Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger“ kommen zu dem Schluss:

Detaillierte Informationen unter: Schmidt, Th. (2020). „Wasserstofftechnik - Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft“, Carl Hanser Verlag München, 2020, Kapitel 6.5

¹⁸ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FFE) (2021). „Wie wird Wasserstoff transportiert?“, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-wasserstoff-wie-wird-wasserstoff-transportiert/>

Detaillierte Informationen zum Verdichten und zur Speicherung von Wasserstoff unter: TÜV Nord (2923). „Wasserstoffspeicherung: Möglichkeiten im Überblick“, <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/>

¹⁹ acatech (2022). „Analyse: Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege - Länderbewertungen - Realisierungserfordernisse“, <https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/download-pdf?lang=de>, Seite 63

²⁰ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff - Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Seite 353

„Die Kosten für die Bereitstellung strombasierter Energieträger wie Wasserstoff sowie von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen liegen jedoch sowohl heute als auch langfristig deutlich über den Kosten für vergleichbare fossile Energieträger. Zudem gilt für alle strombasierten Energieträger, dass die Gesamtproduktionskette bisher nicht großtechnisch realisiert wurde.“ Einzelheiten zur Kostenanalyse sind der Studie zu entnehmen.²¹

Im Rahmen einer von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende bei Frontier Economics in Auftrag gegebenen Studie zu Kostensenkungspfaden für synthetische Kraftstoffe und möglichen Standorten für die Erzeugung des benötigten erneuerbaren Stroms im In- und Ausland kommen die Autoren zu folgenden Ergebnissen: „Die in dieser Analyse vorgenommene Abschätzung der Kosten von importierten synthetischen Heiz- und Kraftstoffen zeigt, dass im Vergleich zur Herstellung mit Hilfe von Offshore-Windkraft in der Nord- und Ostsee ein Kostenvorteil durch Importe von günstigen Standorten für die Stromerzeugung auf Basis von Erneuerbaren Energien möglich ist. Zudem zeigt die Kostenabschätzung, dass mittel- bis langfristig von einer Annäherung der Kosten für synthetische und konventionelle Heiz- und Kraftstoffe auszugehen ist.“²²

Eine Arbeitsgruppe des Projekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) analysiert verschiedene Optionen für den Transport von grünem Wasserstoff und ihre Vor- und Nachteile. Sie führen Berechnungen zu den Kosten und Länderanalysen durch und betrachten in ihrer Studie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit.²³ Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse und detaillierte Informationen zu Transportwegen des Wasserstoffs finden sich in einer Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste über Wasserstoff für die Stahlherstellung.²⁴

Eine weitere Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste befasst sich insbesondere mit den Produktionskosten von grünem Wasserstoff. In der Arbeit werden die Produktionskosten von Wasserstoff, der im Inland mittels Strom auf der Grundlage von Wind- und Solarenergie erzeugt wurde, mit

²¹ Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie , Prognos AG (2020). „Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger“, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationspfade-fuer-strombasierte-energietaege.pdf?blob=publicationFile&v=4>

²² Agora Energiewende (2018). „Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe“, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf, Seite 95

Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf

²³ acatech (2022). „Analyse: Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege - Länderbewertungen - Realisierungserfordernisse“, <https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/download-pdf?lang=de>, Kapitel 3 und 4

²⁴ Wissenschaftliche Dienste (2022). „Verfügbarkeit und Transport von Wasserstoff zur Stahlherstellung“, WD 8 - 3000 - 031/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/915110/9baaa2ace9815f94d27f07ca3f8934a4/WD-8-031-22-pdf-data.pdf>, Kapitel 3

den Kosten von importiertem Wasserstoff, der im Ausland mit einem beliebigen Strommix hergestellt wurde, verglichen.²⁵

Eine ausführliche Abhandlung über den ökonomischen Rahmen zum Wasserstoff findet sich in Synwoldt/Novak.²⁶ Die Autoren beschreiben neue Entwicklungspfade der Herstellung und Logistik zur Kostenoptimierung sowie Einflussfaktoren, wie nationale CO₂-Bepreisung, EEG-Umlage, europäischer Emissionshandel, Rohstoffpreise und weitere Parameter. Sie ziehen u.a. das Fazit, dass „die aktuell noch hohen Kosten bei grünem Wasserstoff (bis zu 6,00 €/kg) gemäß den Prognosen um bis zu 70 % auf etwa 1,50 €/kg noch innerhalb der 2020er-Jahre sinken werden. Wobei die Transportkosten für Wasserstoff (von interkontinental bis lokal) aktuell zu den noch eher unbekannten Variablen bzgl. ihrer Entwicklung gehören.“²⁷

7. Technologien für wasserstoffbasiertes Kraftstoffe in der Mobilität und im Gebäudesektor

Die Energie aus wasserstoffbasierten Kraftstoffen kann durch verschiedene Technologien im Mobilitäts- und Gebäudesektor bereitgestellt werden.

Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb²⁸:

- Brennstoffzellen-Pkw
- Brennstoffzellen-Busse
- Brennstoffzellen-Schienenfahrzeuge
- Brennstoffzellen-Zweiräder
- Wasserstoffverbrennungsmotor (modifizierter Otto-Motor, der mit Wasserstoff betrieben wird)

²⁵ Wissenschaftliche Dienste (2020). „Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff“, WD 5-3000-029/20, https://www.bundestag.btg/Wissen/Dossiers/Ablage/10424/Ausarbeitung_10424_8.pdf.

²⁶ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff - Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Kapitel 6, Seite 353.

²⁷ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff - Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Seite 509.

²⁸ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff - Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Kapitel 5, Seite 291

Handelsblatt (2021). „Forscher: Wasserstoffbasiertes Pkw-Antrieb vorerst klimaschädlich“, <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/studie-forscher-wasserstoffbasiertes-pkw-antrieb-vorerst-klimaschädlich/27184214.html>

Ueckerdt, F. et al. (2021). Ariadne Project Policy Paper „Cornerstones of an adaptable hydrogen strategy“ (in German), <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfaehigen-wasserstoffstrategie/>

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2023). „Wasserstoff“, <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/>

Im Gebäudesektor kommen im Wesentlichen zwei Arten von wasserstoffbasierten Energieträgern zum Einsatz²⁹:

- Strom und Wärme aus Brennstoffzellenheizung (Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk)
- Verbrennung von Wasserstoff als Ersatz von Erdgas durch Wasserstoff in entsprechend technisch angepassten Heizungssystemen

Darüber hinaus kann Wasserstoff als flexibler Speicher von Strom aus Erneuerbaren Energien (auch in den Akkus von Elektrofahrzeugen) oder als Energieträger in der Industrie genutzt werden.

* * *

²⁹ Synwoldt, Ch., Novak D. (2022). „Wasserstoff - Technik, Projekte, Politik“, Wiley-VCH, Weinheim, 2022, Seite 388