

Potenziale von Wasserstoff und regenerativen Kraftstoffen in der zukünftigen Mobilität



Fraunhofer ISE
Ulf Groos
ulf.groos@ise.fraunhofer.de

Max Hadrich
max.julius.hadrich
@ise.fraunhofer.de

Dr. Ouda Salem
ouda.salem@ise.fraunhofer.de

DLR
Dr. Patrick Jochem
patrick.jochem@dlr.de

Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

FZ Jülich
Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Koch
thomas.a.koch@kit.edu

Prof. Dr. Jörg Sauer
j.sauer@kit.edu

ZSW
Dr. Ludwig Jörissen
ludwig.joerissen@zsw-bw.de

Klimaneutrale Mobilität wird zunächst eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens erfordern und im Sinne der Effizienzerhöhung eine Verringerung des motorisierten Individualverkehrs hin zur Mobilität zu Fuß, mit dem Fahrrad, dem ÖPNV und auf der Schiene erfordern.

Des Weiteren werden emissionsfreie Antriebstechnologien notwendig, die letztlich auf erneuerbaren Energien (EE) beruhen. Daher wird ein sehr dynamischer Ausbau von Wind- und Sonnenenergie erforderlich. Dies befördert einen globalen Handel mit EE in Form von Wasserstoff (H₂) und auf Wasserstoff basierenden Energieträgern, wobei sich Ländern mit einem hohen Potenzial für EE Exportchancen bieten und Industrieländer wie Deutschland auf Importe angewiesen sind.

Kostenanalysen zeigen, dass dieser globale EE-Transport langfristig unter 10 ct/kWh H₂ bzw. PtX darstellbar ist. Die regionale Verteilung von Wasserstoff mittels Pipelines erlaubt den Transport großer Energiemengen zu niedrigeren Kosten als mittels Stromtrassen. Auch der Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur für eine Massenmobilität ist technisch und ökonomisch gut darstellbar.

Gleichzeitig stehen wir heute erst am Beginn der Lernkurve für eine batterieelektrische Mobilität und eine belastbare Einschätzung der technologischen, volks- und betriebswirtschaftlichen Fragen ist noch nicht möglich. Von daher sollten unbedingt alternative, nachhaltige Antriebstechnologien, die z. B. auf Wasserstoff basieren, parallel zum Ausbau der batterieelektrischen Mobilität gefördert und beobachtet werden. Zudem gilt es, die politischen, sozialen und globalen Aspekte bei der Transformation unserer Mobilität zu untersuchen.

Der Pkw-Verkehr ist für 61 % der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich, der Straßenschwerlastverkehr für 28%. [1] Somit müssen sich kurz- und mittelfristig die Anstrengungen zur Emissionsreduktion im Verkehr auf diese beiden Segmente mit der größten Hebelwirkung konzentrieren. Detaillierte Analysen zeigen, dass Batteriefahrzeuge hinsichtlich der Wirkungsgradkette von der Kraftstoff-erzeugung bis zum gefahrenen Kilometer deutliche Effizienzvorteile aufweisen (► *Abbildung 1*). Im Vergleich zu einem batterieelektrischen Antrieb benötigt

ein Brennstoffzellen-elektrischer Antrieb ca. doppelt so viel eingesetzte EE und ein auf synthetischen Kraftstoffen beruhender verbrennungsmotorischer Antrieb ca. einen drei- bis vierfach höheren Einsatz von EE.

Betrachtet man die Ausbeute z. B. für eine lokale PV-Stromerzeugung in Deutschland und das Laden eines Batteriefahrzeugs im Vergleich zu einer PV-basierten Erzeugung von Wasserstoff in Nordafrika, Wasserstofftransport und Vertankung in einem Brennstoffzellenfahrzeug, dann zeigen Überlegungen, dass sich Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug annähern (J. Chatzimarkakis, Hydrogen Europe, NOW-Beirat, 2021).

Für die Klimawirkung eines Fahrzeugs sind letztlich seine Emissionen über den kompletten Lebenszyklus entscheidend. In diesen Lebenszyklusanalysen ist die o. g. Wirkungsgradkette nur ein Baustein und weitere Aspekte sind die Klimawirkungen von Produktion und Entsorgung. Lebenszyklus-Studien zeigen, dass batterie- und brennstoffzellenelektrische Antriebe für Mittelklasse-Pkw die CO₂-Emissionen gegenüber fossil betriebenen Verbrennungsmotoren auf ca. 1/5 senken können und auf Augenhöhe zueinander liegen [3]. Weitere Analysen weisen auf eine Gleichwertigkeit auch für Verbrennungsmotoren hin, die mit erneuerbaren, synthetischen Kraftstoffen betrieben werden [4].

Grundsätzlich muss jedoch beachtet werden, dass die gewählten Randbedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis von Lebenszyklusbetrachtungen (und Wirkungsgradketten) haben und die Bandbreite der Ergebnisse sehr groß sein kann. Dies zeigen z. B. Worst-Case und Best-Case-Betrachtungen (► *Abbildung 2*). Mit einer verfügbaren elektrischen Energie ist die Fahrzeugreichweite am größten, wenn diese direkt in einer Batterie eines reinen Elektrofahrzeuges gespeichert wird. Mit der Umwandlung in Wasserstoff halbiert sich die Reichweite. Bei einer Umwandlung in Kohlenwasserstoffe ist die Reichweite etwa um den Faktor 2 bis 3 geringer als bei einem reinen Elektrofahrzeug, wobei die gesamte Energiekette zugrunde gelegt werden muss.

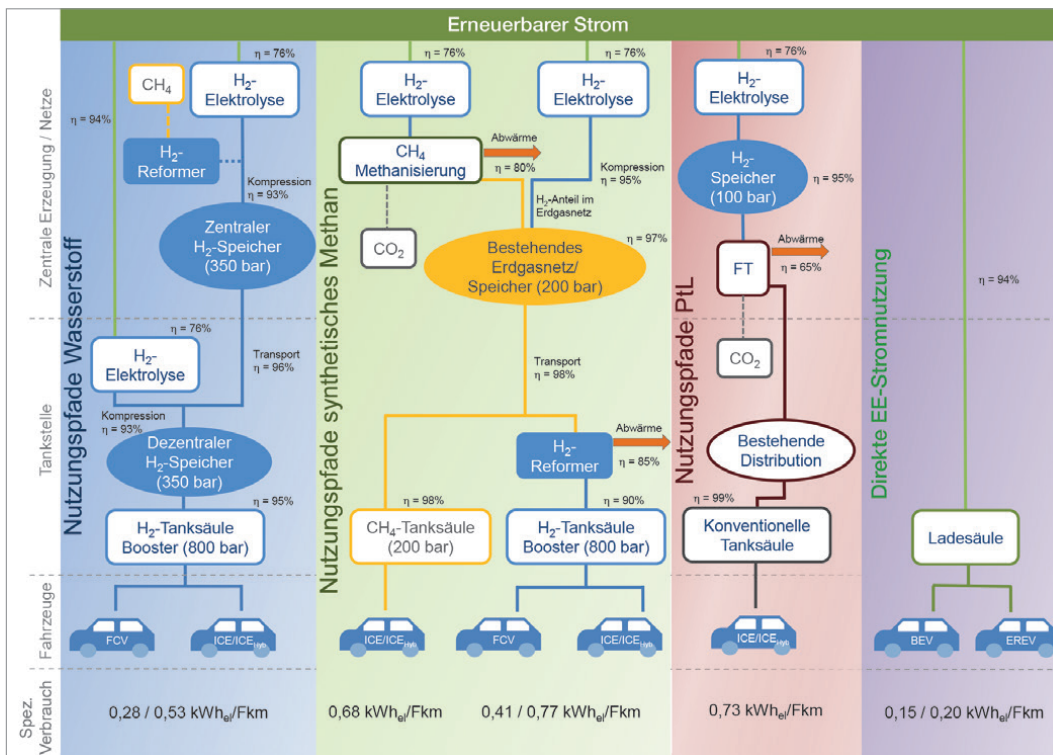


Abbildung 1
Einsatz von erneuerbarem Strom in verschiedenen Mobilitätskonzepten mit Energiebedarf pro gefahrenem km für Pkw mit verschiedenen Antriebstechnologien [2]:

- Batterie (Battery Electric Vehicle; BEV)
- Batterie mit Reichweitenverlängerer (Extended Range Electrical Vehicle; EREV)
- Brennstoffzelle (Fuel Cell Vehicle; FCV)
- Verbrennungsmotor (internal combustion engine; ICE) mit Wasserstoff, synthetischem Erdgas oder synthetischen Kraftstoffen

(Quelle: DLR)

Reiner Wasserstoff hat als Energieträger insbesondere aufgrund der regulatorisch definierten CO₂-Freiheit einen besonderen Charme und genießt hohe Attraktivität bei den Erstausrüstern (OEMs; Original Equipment Manufacturers). Studien zeigen einen sehr dynamisch ansteigenden Bedarf von Wasserstoff für die Mobilität: Ergebnisse einer Analyse der kostenoptimalen Transformation des deutschen Energiesystems gehen bereits für 2030 von 21 TWh aus; für das Jahr 2050 werden 145 TWh ermittelt (► **Abbildung 3**). Eine übergeordnete Auswertung verschiedener Studien bestätigt diese Annahmen [6.] Während der Wasserstoff in der Mobilität zunächst für Schiffe und den Flugverkehr sowie Lkw und Busse genutzt wird, könnte langfristig ein zunehmender Einsatz auch für den Pkw in Frage kommen [7].

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird dieser Wasserstoffbedarf aus technologischen und ökonomischen Gründen zumindest zu einem Teil über Importe gedeckt.

Die lokale Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse hat eine hohe Bedeutung, um zu einer hohen Volllaststundenzahl für die EE zu kommen, um eine gute Netzstabilität zu erreichen und um eine Technologie-demonstration für den Export zu ermöglichen. Aufgrund der kurzen Transportwege für eine lokale Nutzung kann lokal erzeugter Wasserstoff ähnlich niedrige Kosten erzielen wie in Übersee erzeugter Wasserstoff.

Aus globaler Sicht bieten sich für die Erzeugung und den Export von EE Länder mit einem hohen Potenzial für Volllaststunden aus Windkraft und Solarenergie an. Als Energieträger werden vorrangig Flüssigwasserstoff, Methanol (erzeugt aus Wasserstoff und CO₂ aus Industrieabgasen oder der Luft) und Ammoniak (erzeugt aus Wasserstoff und Luftstickstoff) diskutiert. Kostenanalysen weisen darauf hin, dass die Erzeugung und der globale Transport dieser stofflichen Energieträger von Australien, Namibia und Saudi-Arabien nach Europa langfristig zu Kosten von unter 10ct/kWh möglich ist (► **Abbildung 4**). Flüssigwasserstoff scheint im Vergleich zu Methanol oder Ammoniak etwas teurer zu sein, bietet aber prinzipiell die Möglichkeit der Kältenutzung im Hafen oder Fahrzeug und hat eine sehr hohe Reinheit. Entscheidend für die Wahl des Energieträgers werden daher die Anforderungen der nachfolgenden Anwendung sein.

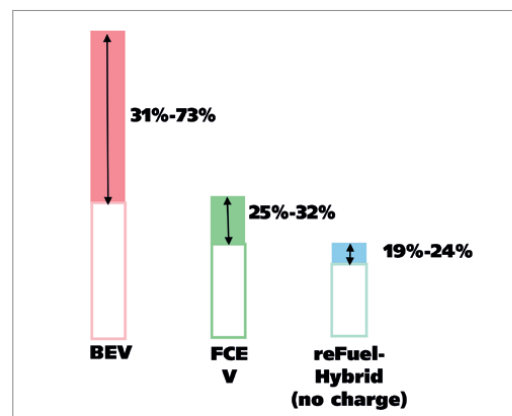
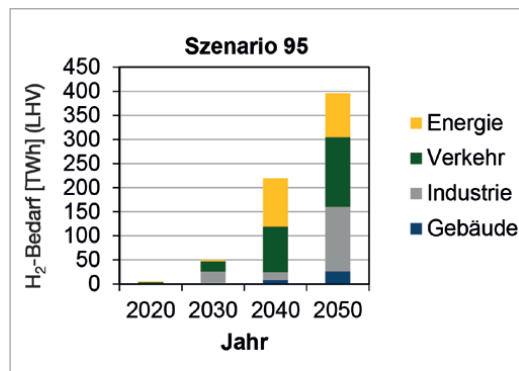


Abbildung 2
Analysen der Wirkungskette für verschiedene Fahrzeugtypen [5]

- batterieelektrisch (BEV)
- brennstoffzellen-elektrisch (FCEV)
- Verbrennungsmotor mit synthetischen Kraftstoffen (reFuel-Hybrid)

(Quelle: KIT)

Abbildung 3
Sektoraler Wasserstoffbedarf [7]
 (Quelle: FZ Jülich)



Als Rohstoff bietet Methanol einige Vorteile: Neben der hohen Energiedichte und leichten Speicher- und Betankungsmöglichkeiten ist Methanol eine der Grundchemikalien und Ausgangsstoff für die Weiterprozessierung zu spezifischen Kraftstoffen wie synthetisches Benzin, Diesel, Marinekraftstoff, Kerosin und weitere (► *Abbildung 5*).

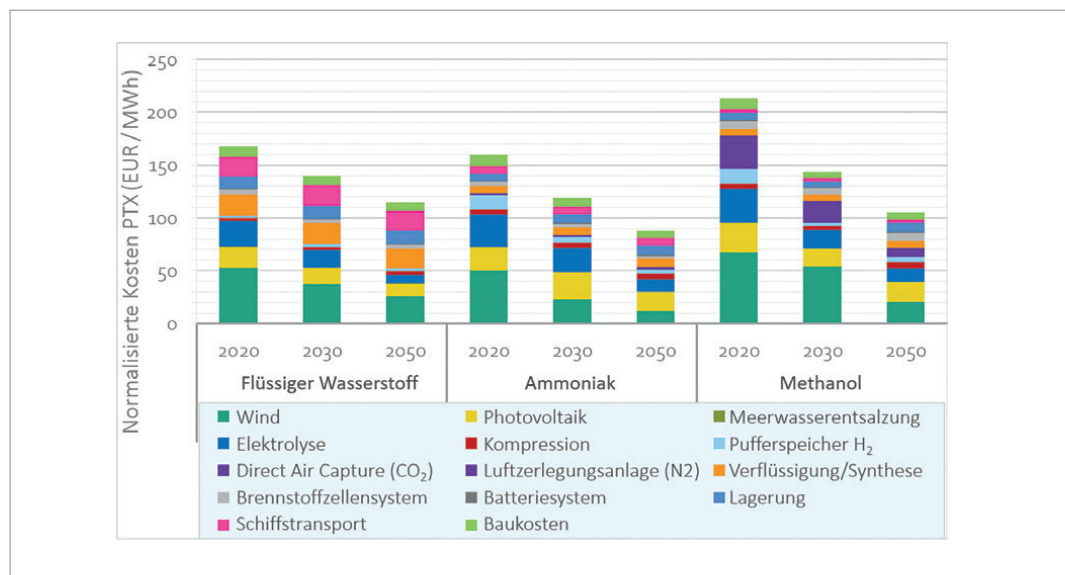
Die intrakontinentale Verteilung des Energieträgers Wasserstoff kann zum großen Teil über Umwidmung bestehender Erdgaspipelines sowie dem Neubau von Wasserstoff-Pipelines erfolgen [10]. Festzuhalten ist, dass Pipelines vor allem für sehr große Energiemengen und längere Strecken die gegenüber Stromtrassen günstigere Transportinfrastruktur sind. Berücksichtigt man bei einer Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen den Wirkungsgradverlust bei der Stromerzeugung im Fahrzeug, so ergeben sich für Stromtrassen und Wasserstoff-Pipelines vergleichbare Kosten.

Im Herbst 2021 waren in Deutschland ca. 14.000 Tankstellen (Statista, 2021) und 47,7 Mio. Pkw (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021) in Betrieb. Man kann annehmen, dass 1.000 bis 3.000 Wasserstoff-

Tankstellen eine ausreichende Tankstelleninfrastruktur für wasserstoff-betriebene Fahrzeuge darstellen würden [11]. Die Kosten einer mittelgroßen Wasserstoff-Tankstelle können mit ca. 1,5 Mio. EUR angesetzt werden [12]. Demzufolge ergeben sich Kosten für eine flächendeckende Versorgung mit Wasserstoff-Tankstellen in Höhe von 1,5 bis 4,5 Mrd. EUR. Im Vergleich dazu werden ca. 437.000 bis 843.000 öffentliche Ladepunkte bis zum Jahr 2030 mit 10 Mio. batterieelektrischen Fahrzeugen benötigt [13]. Diese verursachen Kosten in Höhe von ca. 3 Tsd. EUR pro öffentlichem Ladepunkt, also in Summe ca. 1,5 bis 3 Mrd. EUR.

Zusammenfassend zeigen die Analysen, dass eine Mobilität mit Wasserstoff oder mit auf Wasserstoff basierenden Kraftstoffen technologisch realistisch ist und sich ökonomisch vergleichbar zur batterieelektrischen Mobilität darstellt – eine auch zukünftig globale Energiewirtschaft vorausgesetzt. In Anbetracht der heute erst beginnenden Hochlaufphase der batterieelektrischen Mobilität mit ca. 1% batterieelektrischen Pkw im Bestand sowohl in Deutschland als auch Europa [14] und den damit sich ergebenden unzureichenden Erfahrungswerten wird dringend empfohlen, neben der Förderung des Ausbaus einer batterieelektrischen Mobilität alternative Antriebstechnologien, die auf Wasserstoff aufbauen, ebenfalls zu unterstützen.

Abbildung 4
Kostenfaktoren für Erzeugung und Transport nach Europa für Flüssigwasserstoff, Ammoniak und Methanol aus Neom/Saudi-Arabien[8]
 (Quelle: Fraunhofer ISE)



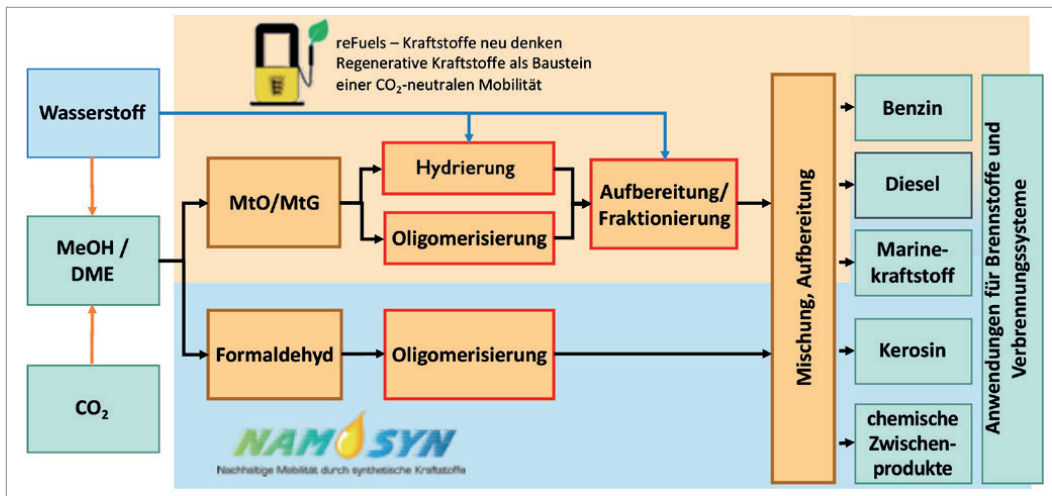


Abbildung 5

Erneuerbares Methanol:**Herstellung, Nutzung und Weiterprozessierung [9]**

- MeOH / DME = Methanol / Dimethylether
- MtO/MtG = [Methanol to Olefins (MTO) / Methanol to Gasoline (MTG)] = Methanol zu ungesättigten Kohlenwasserstoffen / Methanol zu Benzin

(Quelle: FZ Jülich)

Quellen

- [1] SRU, Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, Stellungnahme, 2021
- [2] DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende – Teil 2, 2020
- [3] ICCT, A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars, 2021
- [4] Sternberg, A.: LCA of an ICE vehicle using renewable electricity for fuel and vehicle production, 8th Int. Engine Congress 2021, Baden-Baden
- [5] T. Koch, KIT, 2021
- [6] Wietschel, M. et al. Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG (Hrsg.), 2021
- [7] Robinius, M., Markewitz, P., Caglayan, D., Stolten, D., Stenzel, P., Schöb, T., Grube, T., Heinrichs, H. u. a.: Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, 2020, ISBN 9783958064836
- [8] C. Hebling et al., The global dimension of hydrogen and its derivatives towards climate neutrality, Hydrogen Online Conference 2021
- [9] S. Schemme et al., H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production, Int J Hydrogen Energy. 2020;45(8):5395–414
- [10] Gas for Climate, European Hydrogen Backbone: Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen, 2021
- [11] LBST, Infrastrukturbedarf E-Mobilität, Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-PKW in Deutschland, 2020
- [12] Roland Berger, Potenzial der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg, 2020
- [13] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf, 2020
- [14] K. v. Knobelsdorff, NOW, Wasserstoffmobilität in der Verkehrswende, Deutsch-Schweizer Wasserstoff-Forum, 2021