

Wasserstofftechnologie und Fahrzeuge

Kostensituation von Wasserstoff (H₂)-getriebenen Fahrzeugen

In Studie [1] wurde untersucht, wie sich die Kosten für verschiedene elektrische Fahrzeugtypen bis 2050 entwickeln und wann sie Kostenparität mit Verbrennungsmotorfahrzeugen erreichen werden.

Unterstellt man, dass die Anzahl der elektrischen Fahrzeuge (EV) in den verschiedenen Ausprägungen (ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeuge, REEV: elektrische Fahrzeuge mit Range-Extender, PHEV: plug-in hybrid-elektrische Fahrzeuge, HEV: hybrid-elektrische Fahrzeuge, FCEV: elektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzelle, BEV: batterie-elektrische Fahrzeuge) anwächst, dann kann man über die Verdopplungskonstante der Produktion mittels einer Lernkurve die Kostenreduktion der verschiedenen Komponenten abschätzen. Da diese Verdopplung bereits in einer frühen Marktphase eintritt (bei niedrigen Gesamtzahlen umso einfacher), ist dieser Zeitraum wesentlich für die kostenmäßige Wettbewerbsfähigkeit der Fahrzeugkonzepte. Zur Analyse wurden verschiedene Fahrzeugklassen (PKW, Busse und LKW) und –unterklassen definiert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen [1], dass je nach Anwendungsfall bereits Kostenvorteile für elektrische Fahrzeuge in den Jahren 2021 bis 2031 erwartet werden – und das gilt in ähnlichem Maße für BEVs als auch für H₂-getriebene Fahrzeuge (► **Abbildung 1**). Letztere sind insbesondere bei größeren Fahrzeugen und/oder Fahrtstrecken vorteilhaft.

Primärenergiebedarf

Betrachtet man den aktuellen Primärenergiebedarf im Verkehr (769 TWh), so ist dieser größer als die gesamte elektrische Energieerzeugung in Deutschland (603 TWh). Diesen Bedarf zusammen mit den Bedürfnissen der anderen Sektoren vollständig mittels elektrischer Energie zu decken erscheint unrealistisch, obwohl die Herausforderung bei Fahrzeugen durch die ca. 4- bis 5-fach größere Effizienz von EV gegenüber ICEV etwas entschärft wird. Ein entsprechender Zubau von erneuerbarer elektrischer Energieerzeugung ist kurz- und mittelfristig schwer zu erreichen. Deshalb ist eine Importstrategie für umweltverträgliche Primärenergie unabdingbar.

Abschätzungen zur Effizienz von Energieketten und Antriebsstrang

Die Energieeffizienz einer fossilen Energiekette hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte deutlich verschlechtert, da Exploration und Transport immer aufwändiger und energieintensiver geworden sind. Das konnten zwar die Effizienzsteigerungen bei den fossilen Verbrennungsmotoren teilweise kompensieren, trotzdem erreichen nur ca. 18 % bis 33 % der im Rohöl gespeicherten Energie die Antriebsachse von Fahrzeugen.

Verwendet man komprimiertes H₂-Gas als Treibstoff in einem Wasserstoffmotor, so kann man ca. 27 % des Energiegehaltes auf der Antriebsseite CO₂-frei umsetzen; ersetzt man den Wasserstoffmotor durch die Kombination von Brennstoffzelle und e-Motor, so entfallen ca. >28 % auf der Antriebsachse.

Wird verflüssigter H₂ (LH₂) als Treibstoff eingesetzt, so erreichen - ohne weitere Systemverbesserung – über Brennstoffzelle und konventionellen e-Motor ca. 24 % des Energiegehaltes die Antriebsachse. Bei diesem Wert ist allerdings weder eine Nutzung der über den LH₂ beigestellten Gratskälte (ca. 18 %-Punkte des Energiegehaltes), noch eine Effizienzsteigerung des Antriebsstranges durch ein optimiertes Design berücksichtigt. Würde man nur 80 % der beigestellten Gratskälte nutzen, so würde die Energieketteneffizienz auf >38 % steigen (► **Abbildung 2**). Das ist eine sehr konservative Abschätzung. Größere Werte sind realistisch und möglich, weitere Steigerungen sind zu erwarten.

Die Brennstoffzelle im Fahrzeug

Wesentlich für eine Durchdringung der H₂-getriebenen Fahrzeuge ist eine Tankstellen-Infrastruktur. Stand 2020 gab es weltweit ca. 540 H₂-Tankstellen, die meisten in Japan, Deutschland, China und den USA. Zwar wächst die Anzahl, aber die Zuwachsrate schwankt jährlich. Die Anzahl der FCEV weltweit betrug Ende 2020 ca. 34800 Fahrzeuge, davon fahren ca. 2/3 in Asien.

Gegenstand aktueller Forschung ist die Nutzung von FCEV als mobiles sektorenkoppelndes Element zur dezentralen Versorgung von verschiedenen Gebäuden mit elektrischer und thermischer Energie.



KIT

Prof. Dr. Tabea Arndt
tabea.arndt@kit.edu

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

DLR

Dr. Michael Kröner
michael.kroener@dlr.de

Fraunhofer ISE

Ulf Groos
ulf.groos@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich

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

Dr. Remzi Can Samsun
r.c.samsun@fz-juelich.de

ZSW

Dr. Alexander Kabza
alexander.kabza@zsw-bw.de

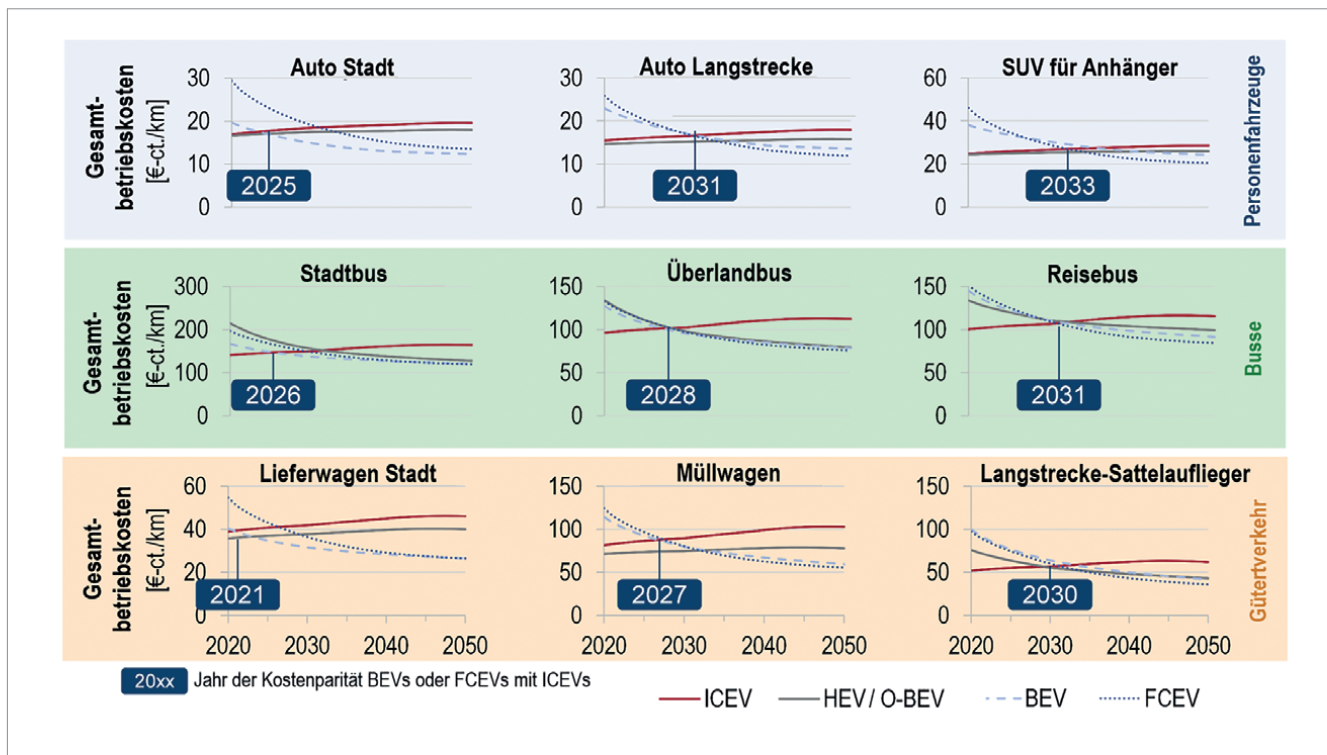


Abbildung 3

Kostenentwicklung verschiedener Fahrzeugklassen und Antriebssysteme mit Jahr ihrer Kostenparität gegenüber Verbrennern [1]

- ICEV: Verbrennungsmotorfahrzeuge (Referenzkurve)
- HEV: hybrid-elektrische Fahrzeuge
- O-BEV: Elektrofahrzeug mit Oberleitungsbatterie
 - BEV: batterieelektrische Fahrzeuge
 - FCEV: elektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzelle

Für Brennstoffzellen im Fahrzeug ist die Alltagstauglichkeit nachgewiesen, der realistische H₂-Verbrauch liegt bei ca. 1.2 kg/100 km, und erhöhte Wartungskosten gegenüber ICEV sind nicht zu erwarten. Eine Herausforderung ist noch die Kühlung der Brennstoffzelle (insbesondere in LKW, s.u.). Forschungsbedarf besteht noch bzgl. Kostenreduktionspotenzialen, Lebensdauer und Wirkungsgrad. Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Begünstigung der umweltrelevanten Systemeigenschaften (z. B. Mautbefreiung) erscheinen hilfreich und angebracht.

Wasserstoffmotoren im Fahrzeug

Bei Wasserstoffmotoren ist die ottomotorische Verbrennung auf dem Prüfstand demonstriert. Zum Erreichen eines hohen Wirkungsgrades müssen die fremd- und selbstzündende Verbrennung (auch für hochaufgeladene Motoren) weiterentwickelt werden. Ein Lebensdauernachweis (Materialverträglichkeiten) steht noch aus. Die NO_x-Emissionen sind bereits auf einem sehr niedrigen Niveau und können unter den geringsten Wert von EURO 6d Dieselmotoren reduziert werden. Eine politische Akzeptanz als Zero-Emission steht flächendeckend noch aus. Zwar erscheinen die Wartungskosten höher als bei einem elektrischen Antriebsstrang, jedoch kann man weitgehend auf etablierten Techniken zurückgreifen und der Wasserstoffmotor erscheint vorteilhaft für Hochlastanwendungen.

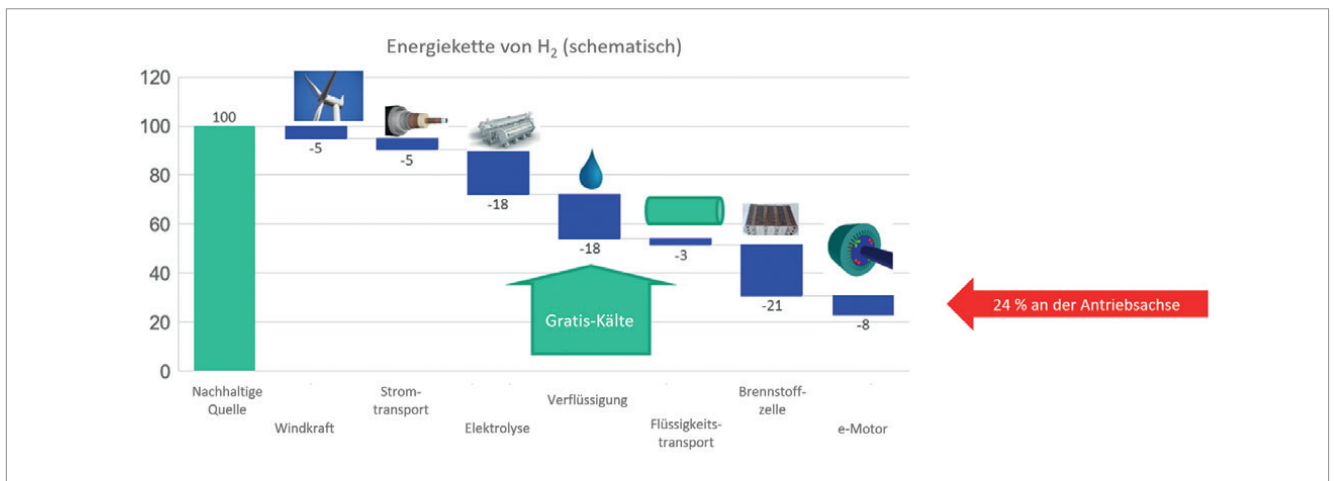
Wasserstoff & Antriebsstrang

In EV ist nicht nur die elektromagnetische Auslegung der Komponenten wichtig. Für eine hohe Effizienz ist insbesondere eine fortschrittliche Kühlstrategie relevant. Beispielsweise verfügt der aktuelle Audi e-Tron GT über vier koppelbare Kühlsysteme für Batterie, Leistungselektronik, e-Motoren, Ladetechnik und Klimaanlage. Deutlich wird die Bedeutung der Wärmeabfuhr auch im Verhältnis von Patenten zum elektromagnetischen Design zur Kühlung von e-Motoren (Recherche 2021): 3080 zu 63021. D.h., auf die Kühlung von e-Motoren wird ca. 20-fach mehr Entwicklungsaufwand als in die Elektromagnetik aufgewandt.

LH₂ kann diesen technischen Aufwand deutlich reduzieren, denn jeder Liter LH₂ kann bis zum Einsatz in der Brennstoffzelle ca. 0,09 kWh an Wärmeenergie aufnehmen. Rein rechnerisch bräuchte ein LH₂-betriebener LKW keine dedizierten Kühlsysteme mehr.

Wasserstoff & Hochtemperatursupraleitung

In vielfachen Demonstratoren wurde die überlegene Effizienz von elektrischen rotierenden Maschinen basierend auf Hochtemperatursupraleitern (HTS) gezeigt. Da HTS größte elektrische Stromdichten (bis zu >600 A/mm²) verlustfrei leiten, entsteht in diesen Maschinen keine ohmsche Abwärme. Der Stand der



Technik zeigt das bei realisierten Maschinen in Anwendungen von Generatoren und Schiffsmotoren, und kürzlich auch bei elektrischen Antriebsmaschinen für Flugzeuge. Besondere Systemvorteile werden erzielt, wenn man die elektromagnetischen Vorteile von HTS (größere nutzbare Stromdichten und Magnetfelder) auch im Design der Maschinen nutzt und so besonders effiziente und kompakte (high power-to-mass-ratio) rotierende Maschinen konstruiert. Verwendet man zur Abkühlung der e-Maschinen den Treibstoff LH₂, so benötigt man keine weitere Kühltechnik und kann die Verluste gegenüber konventionellen Maschinen um mehr als 80% reduzieren. Beispielhaft wurde für einen (etwas älteren, aber gut bekannten) e-Motor eines Honda Accord nur ein einfaches elektromagnetisches Basis-Design mit HTS durchgeführt, was bei ansonsten gleichen Betriebsdaten zu einer Steigerung der Leistungsdichte um den Faktor 10 führte (► *Abbildung 3*).

der Energieketten und Fahrzeuge deutlich steigern. Weiterhin bietet LH₂ ein optimales „Habitat“ für Hochtemperatursupraleiter (HTS), die nicht über andere Techniken auf niedrigem Temperaturniveau gehalten werden müssen, und die aufgrund der verlustfreien hohen Stromdichte zu einer weiteren beträchtlichen Effizienz- und kompakten Leistungssteigerung im Antriebsstrang führen.

- Eine tiefe Marktdurchdringung dieser Technologien sollte über politische Rahmenbedingungen gestützt werden, die das gesamte Vorteilsportfolio würdigen (z. B. CO₂-freie(r) Mobilität und Transport über Mautbefreiungen).

Abbildung 2
Energieeffizienz-kette für flüssigen Wasserstoff (LH₂) in elektrischen Fahrzeugen

Literatur

[1] Kraus, S. et al. – „Vehicle Cost Analysis for Road Vehicles until 2050“, Proceedings of 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2021

Fazit

- Abhängig von Produktionssteigerung und Fahrzeugtyp werden FCEV und BEV in den Jahren 2021–31 günstiger als ICEV [1].
- Ein Ausbau der H₂-Tankstelleninfrastruktur und weitere rechtliche Rahmenbedingungen erscheinen sinnvoll.
- Fahrzeuge mit grünem H₂ als Kraftstoff tragen zum Umbau und zur Entlastung eines nachhaltigen elektrischen Energiesystems bei und fügen sich in eine nachhaltige Energieversorgungsstrategie unter den Randbedingungen der Sektorkopplung und einschließlich Primärenergieimporten ein.
- Der Wasserstoffmotor findet eine Option in Hochlastanwendungen.
- Die Nutzung von LH₂ nicht nur als Treibstoff sondern auch als „Gratis-Kühlung“ kann die Effizienz

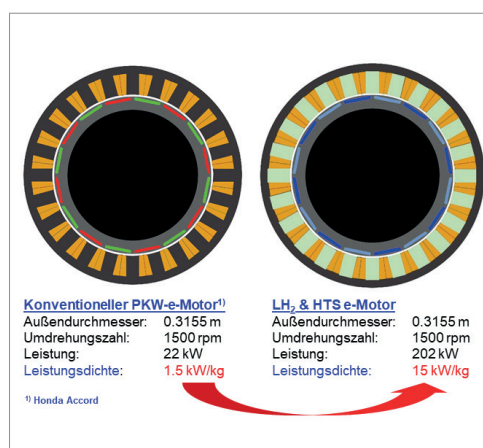


Abbildung 3
Leistungsdichtensteigerung von e-Motoren (hier: Honda Accord) durch Einsatz von Flüssigwasserstoff (LH₂) und Hochtemperatursupraleitern (HTS)