

Chancen der Brennstoffzellentechnologie im Schwerlastverkehr

Ulf Groos, Christopher Hebling, Thomas Jungmann, Stefan Keller, Matthias Klingele, Timo Kurz
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Ulrike Beyer, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer
Straße 88, 09126 Chemnitz

Der Straßenschwerlastverkehr ist für 28% der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich¹ und muss seinen CO₂-Ausstoß im Vergleich zu 2019 bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30% senken – so schreibt es die CO₂-Gesetzgebung der Europäischen Union vor². Somit müssen kurz- und mittelfristig die Anstrengungen zur Emissionsreduktion im Verkehr neben den Pkw auch auf dieses Segment ausgeweitet werden. Hierfür kommen grundsätzlich Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge (FCEV) und auf Wasserstoff oder regenerativen, synthetischen Kraftstoffen beruhende verbrennungsmotorische Antriebe (H₂-ICE bzw. eFuel-ICE) in Betracht.

Aufgrund einer direkten Nutzung haben BEV Vorteile hinsichtlich ihres Wirkungsgrads. Dies gilt auch noch, wenn gegenüber optimalen Betrachtungen Verluste beim Schnellladen und der Batterie- bzw. Fahrzeugklimatisierung berücksichtigt werden³. Diese Vorteile kommen zum Tragen, wenn Strom aus erneuerbaren Energien direkt genutzt werden kann, also Erzeugung und Bedarf räumlich und zeitlich übereinstimmen. Für eine umfassende Beurteilung des Fahrzeugbetriebs sind Well-to-Wheel-Analysen (WtW) notwendig, bei denen der Gesamtwirkungsgrad von der Energieerzeugung über die Energieübertragung bis zur Energienutzung betrachtet wird. Bei FCEV fließt somit die Wandlung der erneuerbaren Energien zu Wasserstoff, seine Speicherung und Rückwandlung zu Strom in der Brennstoffzelle und die damit verbundene zweifache Energiewandlung in die Energieeffizienz ein, während bei einem BEV idealerweise der Strom aus erneuerbaren Energien direkt zum Laden genutzt werden kann. Daher liegt der WtW-Wirkungsgrad von FCEV bei einem Wert von ca. 34 Prozent und damit ca. halb so hoch wie bei BEV¹. Wenn wie in Fahrzeugen häufig der Fall die Abwärme der Brennstoffzelle komplett oder teilweise genutzt werden kann, liegt der systemische Wirkungsgrad entsprechend höher. H₂-ICE benötigen wegen des geringen Wirkungsgrads von Verbrennungsmotoren einen entsprechend größeren Energieeinsatz wie ein FCEV.

Gegenüber den Verhältnissen in Deutschland und größtenteils in Europa sind Weltregionen wie Middle East & North Africa (MENA), Chile, Australien und weitere durch mehrfach höhere Potenziale für Volllaststunden erneuerbarer Energien (EE) gekennzeichnet. Dies eröffnet diesen Ländern neue Chancen für einen globalen Handel von erneuerbaren Energien. Während ein direkter Stromimport aus Nordafrika technologisch denkbar wäre, ist dies aus weiter von Deutschland entfernten Weltregionen nicht mehr realisierbar. Daher muss dann erneuerbarer Strom in ein handelbares Gut gewandelt werden, d.h. einen stofflichen Energieträger wie Wasserstoff oder aus Wasserstoff hergestellte synthetische Energieträger. Die Erzeugung von grünem Wasserstoff aus EE mittels Elektrolyse und die anschließende Umwandlung in global transportierbaren Flüssigwasserstoff, in Methanol, Ammoniak oder der Transport mithilfe eines Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) und Vertankung verursachen weitere Wirkungsgradverluste. Allerdings können diese Verluste zu einem großen Teil durch die oben beschriebene, wesentlich höhere Energieausbeute der EE an diesen optimalen Standorten ausgeglichen werden. Plakativ gesprochen kann mit einem Photovoltaik (PV)-Modul gegebener Größe, anschließender Wasserstoffherzeugung, -transport und Nutzung in einem FCEV eine ähnliche Reichweite wie mit einem

¹ SRU, Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, Stellungnahme, 2021

² Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj>, veröffentlicht am 25.07.2019, abgerufen am 25.04.2022

³ Deloitte: Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation Volume 1

BEV erzielt werden, das von demselben PV-Modul allerdings mit Standort in Deutschland geladen wird⁴.

Hinsichtlich der Umwelt- und Klimawirkung sind Betrachtungen des Fahrzeuglebenszyklus (Life-Cycle-Analysis, LCA) „von der Wiege bis zur Bahre“ (Cradle to Grave, CtG) geeignet, um verschiedene Technologien zu vergleichen. In diesen Lebenszyklusanalysen ist die Wirkungsgradkette ein Baustein von mehreren. Weitere wichtige Aspekte sind die Klimawirkungen von Produktion und Entsorgung. Hierbei sind auch kritische Rohstoffe zu betrachten. Hinsichtlich der Brennstoffzelle beschränken sich diese im Wesentlichen auf Platin, welches wie bei den heutigen Abgaskatalysatoren mit hoher Quote zurückgewonnen werden kann. LCA-Studien zeigen, dass der Einsatz batterie- und brennstoffzellenelektrischer Antriebe für Mittelklasse-Pkw die CO₂-Emissionen gegenüber fossil betriebenen Verbrennungsmotoren auf ca. ein Fünftel senken können und beide Antriebe auf Augenhöhe zueinander liegen⁵. Allerdings gilt es zu bedenken, dass LCA sehr komplexe Betrachtungen sind und die jeweiligen Ergebnisse stark von den angenommenen Rahmenbedingungen geprägt sind.

Heutige Schwerlastkraftwagen (Sattelzugmaschinen mit einem Gesamtgewicht bis 40 t) verwenden überwiegend Diesel-betriebene Verbrennungskraftmaschinen. Dies ermöglicht Reichweiten von mehr als 1000 km bei gleichzeitig kurzen Tankzeiten und somit eine hohe Flexibilität in der Routenplanung für die Speditionen. Eine Antriebsstrang-Systemkonfiguration für diese Reichweite erfordert beim FCEV eine Wasserstoff-Betankung von ca. 100 kg⁶. Das Tanksystem für Wasserstoff wird schwerer als das für Diesel, während die Massen für die Antriebsstränge mit Brennstoffzellensystem oder Verbrennungsmotor ähnlich sind. Insgesamt ermöglichen FCEV somit vergleichbare Fahrdaten und Zuladungen wie ICE.

Eine Tankinfrastruktur für Wasserstoff ist sowohl für die Wasserstoff-Verbrennung als auch für die Nutzung in einer Brennstoffzelle notwendig. Deutschland hat derzeit 91 Tankstellen im ganz überwiegenden Teil für Pkw im Betrieb, 6 weitere sind im Bau bzw. Test⁷. Damit hat Deutschland heute bereits eine führende Position hinsichtlich Wasserstoff-Tankstellen. Bis zum Jahr 2026 sollen zusätzliche 250 Wasserstofftankstellen mit besonderem Fokus auf Lkw in Deutschland, Österreich und Dänemark errichtet werden⁸. Die europäische Verordnung für alternative Kraftstoffe schlägt zudem vor, dass bis Ende 2030 europaweit mindestens alle 150 Kilometer Tankstellen für gasförmigen und alle 450 km für flüssigen Wasserstoff vorhanden sein sollten⁹. Wesentliche Marktteilnehmer wie Daimler, IVECO, Linde, OMV, Shell, TotalEnergies und Volvo haben sich unter dem Namen H2 Accelerate zusammengeschlossen, um den Aufbau der Infrastruktur voranzutreiben. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass bis 2030 etwa 400 Lkw-Tankstellen in Deutschland aufgebaut werden.¹⁰

⁴ J. Chatzimarkakis, Facilitating deployment of renewable H₂, Hydrogen Forum, 18.06.2021, "Hydrogenewables" – A perfect couple, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45992/attachments/6/translations/en/renditions/>, abgerufen am 25.04.2022

⁵ ICCT, A global comparison of the life-cycle green-house gas emissions of combustion engine and electric passenger cars, 2021

⁶ VDE: Logistik, Energie und Mobilität 2030, veröffentlicht im Dezember 2020, <https://www.vde.com/resource/blob/2013758/3e6f90ce5a2bf8baee20f0056bc4f3b9/studie-logistik-mobilitaet-und-energie-2030-data.pdf>, abgerufen am 25.04.2022

⁷ www.h2.live, abgerufen am 03.03.2022

⁸ Phillips 66, Phillips 66 and H2 Energy Europe to develop hydrogen refueling network in Germany, Austria and Denmark, <https://h2energy.ch/2022/02/08/phillips-66-und-h2-energy-europe-entwickeln-wasserstofftankstellennetz-in-deutschland-oesterreich-und-daenemark/>, veröffentlicht am 07.02.2022, abgerufen am 25.04.2022

⁹ Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, COM/2021/559 final, veröffentlicht am 14.07.2021, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:52021PC0559>, abgerufen am 25.04.2022

¹⁰ H2Accelerate, Whitepaper, Expectations for the fuel cell truck market, veröffentlicht im August 2021, <https://h2accelerate.eu/wp-content/uploads/2021/08/H2A-Expectations-for-the-fuel-cell-truck-market-whitepaper-Final.pdf>, abgerufen am 25.04.2022

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind für die Betreiber insbesondere für Lkw die Gesamtbetriebskosten (TCO) entscheidend. Hier zeigen Studien, dass FCEV insbesondere für Schwerlastanwendungen wettbewerbsfähig zu fossil betriebenen ICE oder BEV sein können^{11 12}. Entscheidend dafür ist die Entwicklung der Strom- und Wasserstoffkosten. Angesichts der stark forcierten Ausbaupläne der EU für EE und Wasserstoff können gegenüber den heute vorliegenden Studien spürbar sinkende Kosten angenommen werden. Dies gilt auch für die Brennstoffzellensysteme, da sie aktuell nur in kleinen Stückzahlen gefertigt werden und damit allein durch die Produktionsskalierung ein großer Hebel zur Senkung der Herstellungskosten gegeben ist.

Wenn es gelingt, internationaler Vorreiter in der Entwicklung von Wasserstofftechnologien zu werden, können Null-Emissions-Technologien neue Wertschöpfungs- und Exportpotenziale für die deutsche und europäische Wirtschaft schaffen. Auf diese Weise kann Deutschland einerseits zur Defossilisierung in anderen Regionen der Welt beitragen, andererseits die heimische Wirtschaft stärken¹³. Aus Sicht des Nationalen Wasserstoffrates (NWR) ist der Zeitraum bis zum Jahr 2030 die entscheidende Etappe für den Klimaschutz und die industrielle Wettbewerbsfähigkeit bei der Skalierung der Produktion, in den Bereichen Brennstoffzelle und Elektrolyse. Der NWR ist überzeugt, dass im landgebundenen Verkehr der Schwerpunkt auf batteriebetriebenen Fahrzeugen und gleichzeitig solchen mit Wasserstoff- und Brennstoffzellenantrieben liegt. Entscheidende, globale Wirtschaftsnationen und -regionen wie Australien, China, die EU, Japan, USA und viele mehr haben in ihren Wasserstoff-Strategien die Brennstoffzelle für den straßengebundenen Schwerlastverkehr identifiziert und unterstreichen damit die Bedeutung dieses Marktsegments.

Zusammenfassung:

Brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge bieten gute Chancen für ein zukünftig marktrelevantes Antriebssystem im Fernverkehr^{14, 15, 16}. In technologischer Hinsicht bietet die Brennstoffzelle zu den heutigen fossilen Antriebstechnologien ähnliche Volumen- und Gewichtszuladungen bei vergleichbaren Reichweiten und Tankzeiten. Damit bietet sich den Speditionen die heute gewohnte Flexibilität im Lkw-Einsatz. Gerade im Schwerlastverkehr sind FCEV betriebs- wie volkswirtschaftlich und auch ökologisch wettbewerbsfähig – einen erfolgreichen Markthochlauf vorausgesetzt. Über importierten Wasserstoff kann die Belastung des heimischen Strommarktes aus erneuerbaren Energien begrenzt werden.

¹¹ B. Sharpe, H. Basma (ICCT), A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks, Working Paper 2022-09, veröffentlicht im Februar 2022, <https://theicct.org/publication/purchase-cost-ze-trucks-feb22/>, abgerufen am 25.04.2022

¹² C. Hunter et al. (NREL), Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks, veröffentlicht im September 2021, <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/71796.pdf>, abgerufen am 25.04.2022

¹³ Nationaler Wasserstoffrat: Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2022 – 2025, veröffentlicht im Juli 2021, https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025_WEB-Bf.pdf, abgerufen am 25.04.2022

¹⁴ Roland Berger, Potenzial der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg, Februar 2020

¹⁵ VDE: Logistik, Energie und Mobilität 2030, veröffentlicht im Dezember 2020

¹⁶ IAV: Hydrogen Powertrains in Competition to Fossil Fuel based Internal Combustion Engines and Battery Electric Powertrains, die beim 42nd International Vienna Motor Symposium im September 2021