

Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven

Kurzfassung

Dr. Oliver Ehret
Center of Automotive Management (CAM)

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

**Wasserstoffmobilität:
Stand, Trends, Perspektiven**

Kurzfassung

Januar 2020

DVGW-Förderkennzeichen G 201910

Gesamtüberblick

Die vorliegende Studie untersucht Stand, Trends und Zukunftsperspektiven der wasserstoffbasierten Mobilität hinsichtlich der Leitfrage, inwieweit zukünftig lukrative Märkte für die Hersteller und Transporteure von Wasserstoff (H₂) entstehen könnten. Daneben wird eine Reihe spezieller technischer, ökonomischer und ökologischer Erkenntnisinteressen verfolgt.

Es zeigt sich, dass eine substanzielle politische Unterstützung und zunehmende Dynamik der H₂-Mobilität in der EU, Deutschland und weiteren untersuchten Ländern besteht. Durch Technologieförderprogramme unterstützt, bauen privatwirtschaftliche und öffentliche Akteure Flotten mit Brennstoffzellen (BZ) betriebener Fahrzeuge sowie H₂-Infrastrukturen aus.

Regulative Vorgaben der EU insbesondere zur Begrenzung des Ausstoßes von Kohlendioxid (CO₂) von PKW und LKW sowie zur Beschaffung CO₂-armer bzw. CO₂-freier Fahrzeuge wirken als starke Treiber der H₂-Mobilität. Zentrale Anforderungen sind derzeit nur durch brennstoffzellen- oder batterieelektrische Fahrzeuge zu erfüllen. Der Einsatz erneuerbarer und CO₂-armer Kraftstoffe inklusive von H₂ ist gefordert.

Weltweit sind um die 18.000 BZ-PKW im Einsatz und asiatische Hersteller bauen ihre Produktionskapazitäten deutlich aus. Im April 2019 waren in der EU etwa 1.500 BZ-PKW in Betrieb und die Beschaffung weiterer 1.400 Fahrzeuge geplant. BZ-Busse werden in größeren Stückzahlen betrieben. Voraussichtlich kommen in den nächsten Jahren über 2.000 schwere BZ-LKW in der Schweiz und den USA zum Einsatz. Die heute noch hohen Kosten von BZ-Fahrzeugen werden Studien und Stakeholdern zufolge durch Skaleneffekte deutlich sinken.

Mitte Januar 2020 sind in Deutschland 81 Tankstellen für BZ-PKW in Betrieb und 24 Anlagen in Realisierung. Bei zunehmender Nachfrage kann das Netz in den nächsten Jahren auf 400 Tankstellen wachsen. Im April 2019 waren EU-weit 173 Tankstellen einsatzbereit und 50 in Realisierung. Tankanlagen für Busse werden bedarfsgerecht aufgebaut. Die H₂-Versorgung per Wasserelektrolyse spielt hierbei eine zunehmend wichtige Rolle.

Studien ermitteln einen zukünftig stark steigenden H₂-Bedarf und gehen für Deutschland von mehreren hundert Terawattstunden bis 2050 aus. Für Europa werden H₂-Volumina im Petawattstundenbereich erwartet. Davon entfallen jeweils beträchtliche Anteile auf die H₂-Mobilität.

Ein Potenzialvergleich der H₂-basierten und der Gasmobilität zeigt in vielerlei Hinsicht eine ähnliche Zukunftsfähigkeit der Technologien. Beispielsweise verursachen beide über den Lebenszyklus nur sehr geringe Treibhausgasemissionen. Die oben genannten regulativen Vorgaben verschaffen der H₂-Mobilität aber wesentliche zukunftsgerichtete Vorteile.

Der für die Marktperspektiven der H₂-Mobilität wichtige regulative Rahmen ist relativ weit entwickelt. Während die Rahmenbedingungen der Marktentwicklung insgesamt förderlich sind, wird dennoch die Behebung verschiedener Defizite empfohlen.

Die Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität beginnt erst, entfaltet aber eine zunehmende Dynamik. Aller Voraussicht nach werden für die Hersteller und Transporteure von H₂ mittelfristig attraktive Märkte entstehen. Diese könnten durch den Aufbau von Erzeugungsanlagen für erneuerbaren H₂ oder die Bereitstellung von Infrastrukturen für Herstellung und Verteilung des H₂ für den Verkehr bedient werden.

Wasserstoffmobilität in Europa

Die Europäische Union (EU) ist hinsichtlich von Technologieförderung und Gesetzgebung von zentraler Bedeutung für die H₂-basierte Mobilität und wird, zusammen mit Deutschland und vier weiteren Nationen untersucht. Für die Jahre 2014 bis 2020 ist ein EU-Budget von mindestens 1,3 Milliarden Euro für die Förderung von H₂- und BZ-Technologien vorgesehen, von dem etwa die Hälfte der H₂-Mobilität zugutekommt. Damit werden Demonstrations- und F&E-Projekte in den Bereichen BZ-betriebene PKW, Busse und LKW, sowie H₂-Infrastruktur gefördert und die Beschaffung technisch reifer Produkte subventioniert. Im April 2019 waren in der EU etwa 1.500 BZ-PKW in Betrieb und die Beschaffung weiterer 1.400 Fahrzeuge geplant, flankiert von 173 einsatzbereiten und 50 in Realisierung befindlichen H₂-Tankstellen.

Deutschland ist in Europa ein Vorreiter der H₂-Mobilität und stellt durch das seit 2006 laufende *Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* für den Zeitraum 2016 bis 2026 voraussichtlich 1,4 Milliarden Euro für die Technologieförderung zur Verfügung. Der Verkehrsbereich absorbiert einen Großteil des Budgets und umfasst Demonstrations- und F&E-Projekte ebenso wie Maßnahmen der Marktaktivierung. Im Leuchtturmprojekt *Clean Energy Partnership* wurden bis 2016 über 100 BZ-PKW und Busse samt H₂-Infrastruktur erprobt; die Industrieinitiative *H₂ Mobility* baut heute das früh-kommerzielle Tankstellennetz für BZ-PKW weiter aus. Die umfassende öffentliche Förderung und das Engagement der Unternehmen entfalten ihre Wirkung im Entstehen einer respektablen und in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigten Technologielandschaft. Die politischen Zielgrößen der Bundesregierung zur Anzahl von BZ-Fahrzeugen und Tankstellen werden mit dem Stand im April 2019 verglichen und wesentliche Akteure und Fördermaßnahmen genannt.

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	keine strategischen Zielgrößen, jedoch starke politische Unterstützung und ambitionierte Ziele in Einzelprojekten	505 in Betrieb	Einzelakteure, Flottenbetreiber ²⁾	NIP-Kaufzuschuss Flottenfahrzeuge
BZ-Busse		21 in Betrieb	Einkaufsgemeinschaften, Städte	Kaufzuschuss NIP (auch EU-Mittel)
BZ-LKW ¹⁾		2 in Betrieb	Einzelakteure ²⁾	F&E-Förderung NIP
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	keine Zielgrößen	nicht bekannt	H ₂ Mobility	NIP-Zuschuss für Bau / Elektrolyseur
700 bar angeliefert	100 bis 2019 ²⁾ 400 bis 2023 ²⁾	64 in Betrieb, weitere 27 geplant		NIP-Zuschuss für Bau (EU-Mittel)
350 bar vor-Ort	keine Zielgrößen	nicht bekannt	Einzelakteure, Anlagenbetreiber ²⁾	NIP-Zuschuss für Bau (EU-Mittel) ²⁾
350 bar angeliefert				
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Zielgrößen für Tankstellen Stand 2018			

Die Untersuchung der EU und ausgewählter Länder zeigt ein insgesamt starkes Engagement für die H₂-basierte Mobilität, dass sich jedoch keineswegs mit der Innovationsdynamik Asiens messen kann: Japan und Südkorea liefern bislang fast alle kommerziell vertriebenen BZ-PKW und China steigt zu einem neuen Leitmarkt der H₂-Mobilität auf. Die Regierungen dieser Länder verfolgen ambitionierte Zielsetzungen für den Markthochlauf und unterstützen die Industrie durch attraktive Förderangebote für Fahrzeuge und Betankungsinfrastruktur. Ohne zusätzliche Anstrengungen wird die deutsche Industrie im Wettbewerb hinter Asien zurückbleiben.

Vertiefende Untersuchung der H₂-Mobilität

Ein zentrales Erkenntnisinteresse der Studie gilt Stand, Trends und Zukunftsperspektiven von Brennstoffzellen-Fahrzeugen verschiedenster Klassen. Beispielfhaft werden im Folgenden einige Ergebnisse zu PKW und LKW dargestellt und illustriert.

PKW werden v.a. von asiatischen Automobilunternehmen kommerziell auch in Deutschland angeboten. *Hyundai* fertigt das Modell *Nexo* und hat bislang rund 3.800 Fahrzeuge weltweit veräußert. Bis 2022 werden die Produktionskapazitäten auf 40.000 pro Jahr ausgebaut und sollen bis 2030 auf 700.000 steigen. *Toyota* setzte bis heute 10.000 Exemplare der BZ-Limousine *Mirai* weltweit ab und stellte ein Nachfolgemodell vor, von dem 30.000 Stück pro Jahr gebaut werden sollen. *Honda* vertreibt den BZ-PKW *Clarity Fuel Cell* außerhalb Deutschlands und kündigte ein Nachfolgemodell an. *Daimler* bietet das Modell *GLC F-CELL* an. Mit der Ausweitung der Produktion von BZ-Fahrzeugen sind deutliche Kostenreduzierungen zu erwarten



- 700 bar H₂-Tanks
- Verbrauch 1,0 kg/H₂ auf 100 km
- Leistung BZ 114 kW
- Leistung E-Motor 114 kW
- Höchstgeschwindigkeit 178 km/h
- Reichweite 480 km
- Kaufpreis 78.600 €

Toyota Mirai. Bildquelle: www.toyota-media.de

Busse gelten als besonders attraktive Anwendung für BZ-Antriebe und zeichnen sich neben ihrer Emissionsfreiheit durch geringe Infrastrukturanforderungen aus. Sie werden von Herstellern wie *Van Hool*, *Solaris* und *Daimler* gebaut und in Europa überwiegend im Rahmen von EU-Projekten mit einem Zielbestand von 1.000 Fahrzeugen im Jahr 2023 betrieben. In Deutschland werden BZ-Busse derzeit v.a. in Köln, Wuppertal und Frankfurt eingesetzt. Die Anschaffungskosten sind kontinuierlich gesunken und sollten in wenigen Jahren auf 400.000 Euro fallen. Das aktuelle Busangebot kann die Nachfrage nicht befriedigen.

BZ-betriebene leichte und schwere LKW gelten als vielversprechende Zukunftstechnologien. Gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen bestehen deutliche Vorteile hinsichtlich höherer Reichweiten und kürzerer Betankungszeiten. Der deutsche Elektrofahrzeugbauer *StreetScooter* fertigt Lieferfahrzeuge mit BZ-Range-Extender und verkauft mehrere hundert Exemplare an Kunden. *Hyundai* stellte einen 18-Tonnen-BZ-LKW vor und kündigte an, ein schweizer H₂-Konsortium zwischen Ende 2019 und 2025 mit 1.600 schweren BZ-Nutzfahrzeugen zu beliefern. Das amerikanische Start-Up *Nikola* entwickelt verschiedene Versionen eines 40-t-BZ-LKW und beginnt 2020 mit der Auslieferung von 800 Fahrzeugen. Sowohl *Hyundai* wie auch *Nikola* zielen auch auf Gesamteuropa als Markt.



- Gesamtgewicht 18 t
- mit Anhänger 34 t
- H₂-Tanks: 33 kg H₂ / 350 bar
- Betankungszeit H₂ 7 Minuten
- Leistung BZ 190 kW (2 x 95 kW)
- Antriebsleistung 350 kW
- Reichweite 400 km

Hyundai Truck. Bildquelle: H₂ Energy AG

Das Tankstellennetz für BZ-PKW wird in Deutschland von H₂ Mobility ausgebaut und umfasst Mitte Januar 2020 insgesamt 81 im Betrieb und 24 im Aufbau befindliche Stationen. Es soll bis 2021 auf 140 und bis 2023 auf 400 Tankstellen erweitert werden, wobei letzteres Ziel auch vom Flottenzuwachs der BZ-Fahrzeuge abhängig gemacht wird. Durch die eingesetzte 700-bar-Technologie wird eine PKW-Betankung in drei Minuten möglich. Die Kosten einer deutschlandweiten H₂-Infrastruktur für PKW liegen Studien zufolge im Endausbau deutlich unter denen einer Ladeinfrastruktur für eine vergleichbare Anzahl von Batterieautos.

Tankstellen für BZ-Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge werden stets bedarfsgerecht aufgebaut und ermöglichen eine befriedigende Kraftstoffversorgung bei geringem infrastrukturellem Aufwand. Während die Anlagen standardmäßig auf 350-bar-Druckwasserstoff ausgelegt sind, gilt die 700-bar-Technologie zumindest bei LKW als interessante Zukunftsoption. Eine Tankstelle zur Versorgung von 50 Bussen setzt täglich etwa 1.300 kg H₂ um und kostet rund 5 Millionen Euro. Einem Forschungsprojekt zufolge können den Kraftstoffkosten von Dieselnbussen vergleichbare H₂-Bereitstellungskosten von 4 bis 6 €/kg erreicht werden.

ENDE 2018: 55 IN BETRIEB ENDE 2019: AUSBAU AUF 100 2021: ERWEITERUNG AUF 140



Legende: Grüne Punkte: in Betrieb Blaue Punkte: in Realisierung
Tankstellennetz für BZ-PKW in Deutschland. Bildquelle: H₂ Mobility

Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage

Mehrere Studien und Roadmaps schätzen die zukünftigen Wasserstoffnachfrage verschiedener Verbrauchssektoren in Deutschland und Europa ab. Alle ermitteln einen zukünftig stark steigenden H₂-Bedarf und gehen für Deutschland von mehreren hundert Terawattstunden (TWh) bis 2050 aus. Für Europa werden H₂-Volumina im Petawattstundenbereich erwartet. Davon entfallen jeweils beträchtliche Anteile auf die H₂-Mobilität.

Eine vom *Forschungszentrum Jülich* 2019 veröffentlichte Studie nimmt *kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050* in den Blick und spricht H₂ eine wesentliche Rolle für die erforderliche Dekarbonisierung zu. Zwei Szenarien werden modelliert und ermitteln für 2050 H₂-Volumina von 145 bzw. 399 TWh über alle Sektoren hinweg. Im Verkehrsbereich entfallen 33 bzw. 36 Prozent des Kraftstoffbedarfs von PKW und 46 bzw. 72 Prozent der Nachfrage des Güterverkehrs auf H₂.

Die 2019 vorgestellte *Hydrogen Roadmap Europe* analysiert die zukünftig in Europa zu erwartenden H₂-Nachfragen anhand von Szenarien. Bei ambitionierten Annahmen kann H₂ bis 2050 einen Anteil von 24 Prozent am Gesamtenergiebedarf der EU bzw. 2.251 TWh erreichen und unter anderem 45 Millionen PKW und 2 Millionen schwere Nutzfahrzeuge mit Kraftstoff versorgen. Bei bloßer Fortsetzung bisheriger Trends wären die H₂-Anteile mit insgesamt 780 TWh und geringerer Verkehrsnachfrage aber wesentlich moderater.

Abgleich Potenziale H₂ mit anderen Gasen

Ein Vergleich der Zukunftspotenziale der H₂-basierten und der Gasmobilität zeigt zunächst Vorteile der mit Erd- und Biogas betriebenen Fahrzeuge: Die aktuelle Verfügbarkeit von Gasfahrzeugen übertrifft die vergleichbarer BZ-Fahrzeuge bei weitem und die Kosten ersterer Fahrzeuge sind deutlich niedriger. Hinsichtlich der technischen Reife besteht jedoch nur noch bei LKW ein klarer Vorsprung der Gasmobilität.

Derzeit stehen für gasbetriebene PKW etwa elfmal so viele Tankstellen wie für BZ-Autos zur Verfügung, aber schon 2023 könnte der Vorsprung auf Faktor zwei schrumpfen. Während Gastankstellen bislang bezüglich Kosten und Zuverlässigkeit punkten, sind diesbezügliche Verbesserungen bei H₂-Tankstellen zu erwarten.

Die H₂- und die Gasmobilität können die aus Nachhaltigkeitsgründen gebotene Integration erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor gleichermaßen gewährleisten. Allerdings erfüllen nur BZ-Fahrzeuge die Anforderungen zur Verminderung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen in Gänze. Die Treibhausgasemissionen sowohl von BZ- wie auch Gasfahrzeugen liegen auf einem vergleichbaren und sehr niedrigen Niveau.

Die Bewertung der Eignung der H₂- und Gasmobilität zur Erfüllung regulativer Vorgaben ergibt, dass nur BZ-Antriebe profitieren: Sowohl die EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen wie auch die *Clean Vehicles Directive* (CVD) zur Beschaffung emissionsarmer und -freier Nutzfahrzeuge schaffen Märkte für BZ-Fahrzeuge, schließen aber Gasfahrzeuge vom Wettbewerb aus. Dies fördert die H₂-Mobilität maßgeblich, benachteiligt aber die Gasmobilität aufgrund der ausschließlichen Berücksichtigung während der Fahrt anfallender Abgase.

Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H₂-Mobilität

Die H₂-basierte Mobilität bietet große ökologische und ökonomische Potenziale, die jedoch aufgrund noch nicht wettbewerbsfähiger Kosten bislang nur ansatzweise realisiert werden können. Als eine insbesondere für schwere Fahrzeuge mit hohen Reichweiten- und Leistungsanforderungen vorteilhafte Antriebsalternative ist die H₂-Mobilität eine für die Erreichung klimapolitischer Zielsetzungen unerlässliche Technologieoption. Daher analysiert die Studie den regulativen Rahmen und stellt einerseits fest, dass dieser schon relativ weit entwickelt ist, legt andererseits aber auch die nachfolgenden Handlungsempfehlungen nahe.

EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen legen strenge Grenzwerte für Fahrzeuge fest. Überdies verpflichtet die CVD die öffentliche Hand zur Beschaffung von Niedrig- und Nullmissionsfahrzeugen ab 2021. Zentrale Anforderungen der Maßnahmen sind nur durch brennstoffzellen- oder batterieelektrische Fahrzeuge zu erfüllen. Der Einsatz erneuerbarer und CO₂-armer Kraftstoffe inklusive von H₂ ist gefordert. Während dies als starker Treiber der H₂-Mobilität wirkt, ist die den Gesetzen zugrundeliegende *Tank-to-Wheel*-Methodik aufgrund ihrer Vernachlässigung bedeutsamer Umweltbelastungen problematisch. Die Zugrundelegung von *Well-to-Wheel*- oder *Lebenszyklusansätzen* wird empfohlen, welche eine vollständigere Erfassung von Umweltwirkungen ermöglichen.

Auch zur Erfüllung der ehrgeizigen EU-Regularien ist eine weitere Unterstützung der Marktaktivierung und Technologieentwicklung von BZ-Fahrzeugen vonnöten. Die Reduzierung von Kosten und die Bedienung verbleibender F&E-Erfordernisse bedarf einer fortgesetzten Förderung durch die öffentliche Hand. Daher empfiehlt die Studie, die auf europäischer und deutscher Ebene bestehenden Förderangebote für Fahrzeuge fortzuführen. Speziell zur Realisierung von Skaleneffekten wird nahegelegt, den Markthochlauf durch öffentliche Beschaffungsprogramme und Einkaufsgemeinschaften zu unterstützen.

H₂-Infrastrukturen bedürfen einer den Fahrzeugen vergleichbaren Unterstützung. Daher wird empfohlen, die einschlägigen Förderangebote fortzusetzen. Zur Reduzierung der Kosten mittels Wasserelektrolyse und erneuerbarer Energien hergestelltem H₂ wird vorgeschlagen, neben Investitionskosten auch Betriebskosten zeitlich befristet zu fördern und so die Mehrkosten gegenüber aus Erdgas gewonnenem H₂ auszugleichen. In Deutschland gelten hohe auf die elektrolytische H₂-Herstellung erhobene Umlagen, Abgaben und Steuern als ein zentrales Hindernis für den Betrieb von PtX-Anlagen. Daher empfiehlt diese Studie, die damit verbundenen finanziellen Belastungen erheblich zu reduzieren.

Schlussfolgerungen

Die Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität läuft in Deutschland und Europa erst an, entfaltet sich aber dynamisch in einem innovationsförderlichen Kontext: Insbesondere begünstigen klimapolitische Anforderungen und starker Wettbewerbsdruck aus Asien den Marktritt, während sich gleichzeitig die Technologie und Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen wie auch Infrastruktur verbessert. Als Konsequenz entwickelt die H₂-Mobilität eine zunehmende und von allen untersuchten Technologiedimensionen getragene Dynamik. Aller Voraussicht nach werden für die Hersteller und Transporteure von erneuerbarem H₂ attraktive Märkte entstehen. Die Gasindustrie könnte insbesondere durch die kommerzielle Verwertung ihrer *Power-to-X*-Kompetenzen und langfristigen Weiterbetrieb bestehender Pipelinenetzwerke profitieren.