

## BUND-Hintergrund

# Ist Wasserstoff die Zukunft im PKW?

LV Schleswig-Holstein  
Landesgeschäftsstelle  
Lorentzendam 16  
24103 Kiel

Fon 0431-66060-0  
Fax 0431-66060-33

bund-sh@bund-sh.de  
[www.bund-sh.de](http://www.bund-sh.de)

Erstellt vom:  
LAK Energiewende  
im März 2020

### Einleitung

Dieser Hintergrund geht der Frage nach, ob der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzelle im Pkw geeignet ist, die Probleme zu lösen, die der Verbrennungsmotor verursacht: Verbrennung endlicher Ressourcen, CO<sub>2</sub>-Emission, Luftverschmutzung in den Städten, Lärm.

Anlass für die Frage „Ist Wasserstoff die Zukunft im Pkw?“ war, dass Teile der Wirtschaft dies bejahen und große Teile der Bevölkerung ebenso. Eine Konsequenz dieser Haltung ist, dass die Abkehr vom Verbrennungsmotor ins Stocken gerät, weil viele Nutzer preiswerte Brennstoffzellenautos abwarten wollen, die es nicht geben wird. Damit ist dem Klimaschutz nicht geholfen.

Grundsätzlich zählt das Brennstoffzellenauto, das aus Wasserstoff und Sauerstoff Strom herstellt, der einen Elektromotor antreibt (Fuel Cell Electric Vehicle = FCEV) genauso zur Elektromobilität wie ein batterie-elektrisches Auto (BEV). Dieses Papier behandelt nicht die Elektromobilität generell. Dazu gibt es bereits eine große Zahl seriöser Studien (z.B. Agora Verkehrswende, Ökoinstitut e.V., IFEU, Fraunhofer ISI). Dieser Hintergrund ist auch kein umfassendes Verkehrskonzept. Die Elektromobilität ist aber ein wesentlicher Bestandteil eines klimaschonenden Verkehrskonzeptes. Neben einem flexibilisierten ÖPNV, intensiviertem Fahrradverkehr u.a.m. wird es auch in Zukunft motorisierten Individualverkehr geben. Für den BUND bietet sich der Einsatz der Brennstoffzellen-/Wasserstoff-Technologie im Pkw-Bereich nicht an. Ausschlagend ist der sehr hohe Bedarf CO<sub>2</sub>-freien Stroms für die Herstellung des grünen Wasserstoffs und die sehr hohe Komplexität des Brennstoffzellenautos.

### Einige Fakten vorweg

Ein Wasserstoffatom besteht aus nur einem Proton im Kern und einem Elektron in der Hülle. Es ist damit unter allen Elementen das einfachste und kleinste Atom. Wasserstoffgas besteht in aller Regel aus Molekülen mit 2 Wasserstoffatomen, kurz: H<sub>2</sub>. Was-

Wasserstoff kommt auf der Erde praktisch nie in reiner Form vor, sondern als Molekül in einer Verbindung mit anderen Elementen. Ein Kilogramm Wasserstoff hat einen Energieinhalt von 33,33 Kilowattstunden (kWh) — gut dreimal so viel wie ein Kilogramm Benzin. Es hat allerdings ein Volumen von 11 m<sup>3</sup>. Für den Transport muss das Volumen also stark reduziert werden. Entweder durch Druck auf 200 bis 700 bar oder Verflüssigung durch Abkühlung auf minus 253 °C.<sup>1</sup>

### **Wie wird Wasserstoff heute hergestellt?**

Weltweit wird rund 98 % des Wasserstoffs durch ein Verfahren hergestellt, das Dampfreformierung genannt wird.<sup>2</sup> Ausgangsstoff ist immer ein Kohlenwasserstoff (in der Regel Methan, also Erdgas), der in Wasserstoff und Kohlenstoff aufgespalten wird. Dabei wird so viel CO<sub>2</sub> frei, als wenn das Erdgas verbrannt wird. Deshalb wird dieser so hergestellte Wasserstoff auch „grauer“ Wasserstoff genannt.

### **Wie sollte Wasserstoff zukünftig hergestellt werden?**

Ein CO<sub>2</sub>-freies Verfahren, und damit klimafreundlich, ist die Elektrolyse von Wasser als Ausgangsstoff. Dabei entsteht Wasserstoff und Sauerstoff. Wegen des hohen Energiebedarfs wird dieses Verfahren bislang kaum eingesetzt. Für die Herstellung von einem Kilogramm Wasserstoff in einem Elektrolyseur werden 55 kWh Strom benötigt<sup>3</sup>. Der für das Verfahren und die Komprimierung verwendete Strom müsste ebenfalls CO<sub>2</sub>-frei erzeugt werden. Erst dann ist das Prädikat „grüner“ Wasserstoff gerechtfertigt.

### **Wofür wird Wasserstoff eingesetzt?**

Wenn in der aktuellen Diskussion von Wasserstoff die Rede ist, denken viele Menschen zuerst an das „Wasserstoffauto“.

Tatsächlich jedoch werden über 50 % der weltweit produzierten Wasserstoffmenge (30 Mio. Tonnen pro Jahr<sup>4</sup>) für die Ammoniak-Synthese verwendet zur Produktion von synthetischem Stickstoffdünger<sup>5</sup> und zahlreicher weiterer chemischer Produkte und Grundchemikalien. Andere Einsatzgebiete für Wasserstoff sind: Verhüttung von Erzen, Kohlehydrierung und Fetthärtung.

### **Wie hängen Wasserstoff und Energiewende zusammen?**

Gemeinsames Ziel vieler Bemühungen, den weltweiten Temperaturanstieg (Klimawandel) abzubremsen, ist die Decarbonisierung. Gemeint ist die Abkehr von fossilen koh-

1 <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoff>

2 [https://www.the-linde-group.com/de/images/HydrogenBrochure\\_DE\\_tcm16-10196.pdf](https://www.the-linde-group.com/de/images/HydrogenBrochure_DE_tcm16-10196.pdf)

3 <https://cleanenergypartnership.de/faq/wasserstoffproduktion-und-speicherung/?scroll=true>

4 <https://industrie.airliquide.de/warum-ist-wasserstoff-so-besonders>

5 <https://mb.cision.com/Public/115/2728917/8c86ae7516d968ab.pdf>

lenstoffgebundenen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas, denn bei der Energiegewinnung aus ihnen wird der Kohlenstoff zu CO<sub>2</sub> verbrannt. CO<sub>2</sub> ist der Haupttreiber des Klimawandels<sup>6</sup>.

Deshalb wird die Stromproduktion auf Wind- und Sonnenenergie umgestellt; auch die Herstellung von Strom aus Biomasse sowie Wasserkraft ist so gut wie CO<sub>2</sub>-frei. Wind und Sonne liefern zwar unbegrenzt Energie, die zu elektrischer Energie umgewandelt werden kann. Da Strom aus Wind und Sonne aber nicht immer zum Zeitpunkt des Verbrauchs erzeugt wird (nicht bei Windstille oder Dunkelheit), muss Strom aus Wind und Sonne zu Zeiten des Überschusses in großen Mengen gespeichert werden. Dafür wird vielfach die Umwandlung in Wasserstoff für geeignet gehalten. Dieser CO<sub>2</sub>-frei erzeugte Wasserstoff kann den „grauen“ Wasserstoff, der in der Chemie- und Stahlindustrie verwendet wird, ersetzen. Er kann aber auch in der Mobilität eingesetzt werden.

### **Vergleich beim Einsatz im Pkw**

Wasserstoff kann grundsätzlich auch in der Mobilität eingesetzt werden. Hier soll nur der Einsatz im Pkw betrachtet werden, nicht aber der Einsatz in Lkw, Bussen, Zügen, Schiffen oder Flugzeugen, denn offenbar denken viele Menschen primär an den Einsatz im Pkw-Bereich. Die intensive öffentliche Diskussion über den Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft führt durch diese verengte Betrachtung bei vielen Leuten zu einem Warten auf das „Wasserstoffauto“ und damit zu einer spürbaren Zurückhaltung beim Einstieg in die (Batterie-)Elektromobilität und damit letztlich oft zu einem Festhalten am Benzin- oder Dieselauto.

#### **1. Wasserstoffverbrennung in einem Verbrennungsmotor**

BMW hatte 2009 hundert Exemplare eines BMW 760i auf Wasserstoffverbrennung in einem Otto-Motor umgerüstet. Mit 8 kg Wasserstoff betrug die Reichweite rund 200 km. Der Grund für den hohen Verbrauch (3,6 kg/100 km) lag prinzipbedingt in der Ineffizienz des Verbrennungsmotors, der eben vor allem Wärme produziert und nur zu einem geringeren Teil die Energie in Bewegung umsetzt. 8 kg Wasserstoff ließen sich in einem Pkw aus Platzgründen nicht mehr in einem Drucktank unterbringen. Erst verflüssigt bei -253 °C hat Wasserstoff den geringstmöglichen Platzbedarf: 1 kg Flüssig-Wasserstoff hat ein Volumen von 14 Litern<sup>7</sup>. Es musste also ein super-isolierter Kryo(Kälte)-Tank mit 114 l Netto-Volumen eingebaut werden. Unvermeidlich verdampft hieraus ständig Wasserstoff, der einen ständig steigenden Druck im Kryotank aufbaut und deshalb kontrolliert abgelassen werden muss, da

6 [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/IPCC\\_AR5\\_WGIII\\_FAQ\\_deutsch-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/IPCC_AR5_WGIII_FAQ_deutsch-1.pdf)

7 <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung>

der Kryotank nicht druckbeständig ist. Er würde anderenfalls platzen. Innerhalb von 9 Tagen leerte sich ein halbvoller Flüssig-Wasserstofftank vollständig<sup>8</sup>.

Die aus physikalischen Gründen nicht zu lösenden Probleme (hoher Verbrauch, der zur Mitnahme verflüssigten Wasserstoffs zwang, der sich aber schnell verflüchtigte, und großer Platzbedarf) führten 2009 zur Einstellung des Versuchs, Wasserstoff in einem Motor zu verbrennen.

## 2. Umsetzung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle und elektrischem Antrieb

Seit über 50 Jahren wird versucht, praxistaugliche Versionen von Brennstoffzellenautos (FCEV) auf den Markt zu bringen. Dem Einsatz der Brennstoffzelle liegen also bereits über 50 Jahre Forschung zugrunde, ohne dass bis heute (2020) ein Durchbruch auf dem Markt erkennbar wäre.

Für ein FCEV spricht:

- die kurze Tankdauer, die allerdings bei vielen Wasserstoff-Tankstellen nur dann kurz ist, wenn nach dem vorangegangenen Tankvorgang mindestens 30 Minuten Wartezeit vergangen sind, in der die Tankanlage den nötigen Druck von über 700 bar erneut aufbaut und der Tankstutzen wieder enteist ist,
- die Reichweite, die im Vergleich zum batterie-elektrischen Auto viel größer sein soll, und
- das angeblich viel geringere Gewicht eines FCEV.

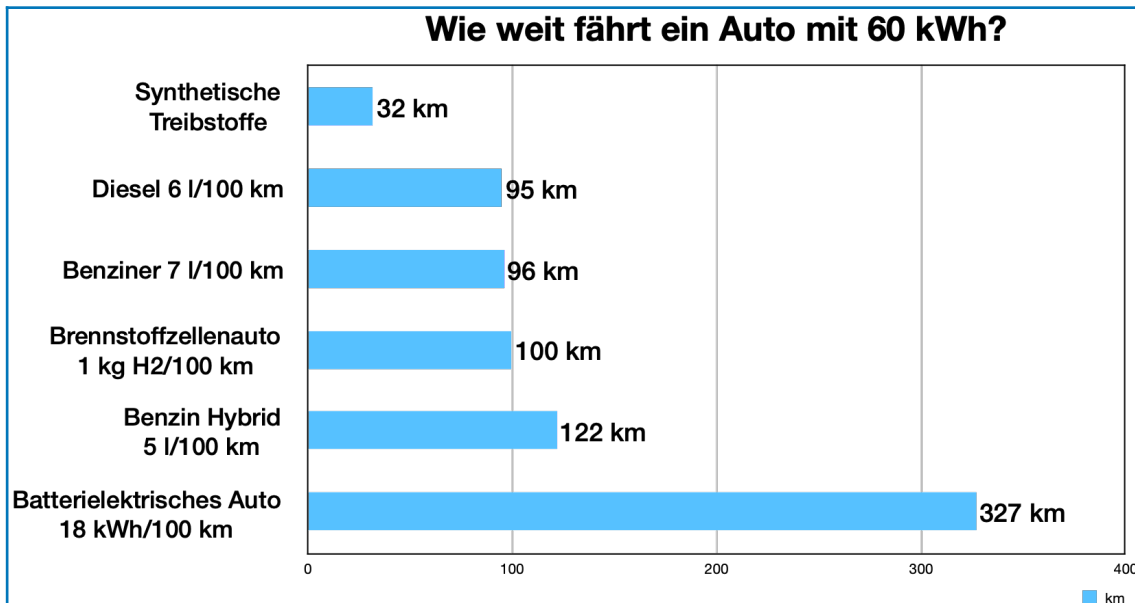
Gegen ein FCEV spricht:

- die sehr schlechte Energie-Effizienz: Für eine gemäßigte Fahrt über 100 km wird etwa 1 kg Wasserstoff benötigt. Für dessen Herstellung und Komprimierung auf über 700 bar müssen mindestens 60 kWh elektrische Energie aufgewendet werden (siehe Fußnote 3). Mit derselben Energiemenge von 60 kWh fährt ein batterie-elektrisches Autos (BEV) über 300 km. Ein FCEV braucht also für dieselbe Fahrstrecke mehr als dreimal soviel elektrische Energie wie ein BEV. Dies ist kein zu vernachlässigendes Problem, sondern hat gravierende Konsequenzen. Solange Energie, vor allem CO<sub>2</sub>-frei erzeugte, knapp und teuer ist, ist ein effizienter Umgang damit unverzichtbar. Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung<sup>9</sup> betont zu Recht die hohe Bedeutung der Energie-Effizienz. Der gesamte deutsche Pkw-Bestand würde bei Umstellung auf Brennstoffzelle zusätzliche 423 TWh „grünen“ Strom für sich beanspruchen. Allerdings hat Deutschland in 2018 nur 225,7 TWh „grünen“

8 [https://de.wikipedia.org/wiki/BMW\\_Hydrogen\\_7](https://de.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7)

9 <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>

Strom produziert<sup>10</sup>. Diese Menge müsste also fast verdreifacht werden, käme der „grüne“ Strom für die Herstellung von Wasserstoff für FCEV noch obendrauf.



**Abb. 1** WTW Well-to-wheel-Betrachtung: von der Quelle zum Rad. Ausnahme Benzin und Diesel: Tank-to-wheel  
Quellen: PricewaterhouseCoopers, eigene Berechnungen

Nähme man den deutschen Strommix mit seinem Kohlestromanteil, dann lägen die Treibhausgasemissionen des FCEV nach 150.000 km um 75 % über denjenigen eines Batteriefahrzeuges mit derselben Kilometerleistung<sup>11</sup>. Möglicherweise würde wegen des außerordentlich hohen Strombedarfs des „Wasserstoffautos“ der Ruf nach Weiterbetrieb von Kohle- oder Kernkraftwerken wieder laut.

- Eine aktuelle Untersuchung von Agora Verkehrswende zeigt die Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Bilanz über die gesamte Lebensdauer bei einem Fahrzeug der Kompaktklasse mit gemischter (Stadt/Land/Autobahn) Nutzung als Diesel (ICEV Diesel), Benziner (ICEV Benzin), Batterie-elektrisch (BEV), Brennstoffzelle/Wasserstoff (FCEV) und als Diesel mit synthetischem Diesel (ICEV PtL Diesel). Die aus der Akkuherstellung resultierende höhere CO<sub>2</sub>-Emission hat das BEV gegenüber dem Benziner nach gut 40.000 km, gegenüber dem Diesel nach gut 80.000 km egalisiert. Nach 200.000 km hat das BEV gegenüber dem Benziner ca. 16 to CO<sub>2</sub> weniger verursacht, gegenüber dem Diesel rund 8,5 to CO<sub>2</sub> weniger. Gegenüber dem FCEV beträgt der Vorsprung nach 200.000 km rund 26 to CO<sub>2</sub>. Das FCEV hat gegenüber dem BEV zu keinem Zeitpunkt der Autolebensspanne eine geringere CO<sub>2</sub>-Emission. Das liegt daran,

<sup>10</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>

<sup>11</sup> [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz\\_Batteriefahrzeugen/32\\_Klimabilanz\\_strombasierten\\_Antrieben\\_Kraftstoffen\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf)

dass die Herstellung der Brennstoffzelle rund 2,9 to CO2 und die Herstellung des Drucktanks rund 2 to verursachen.

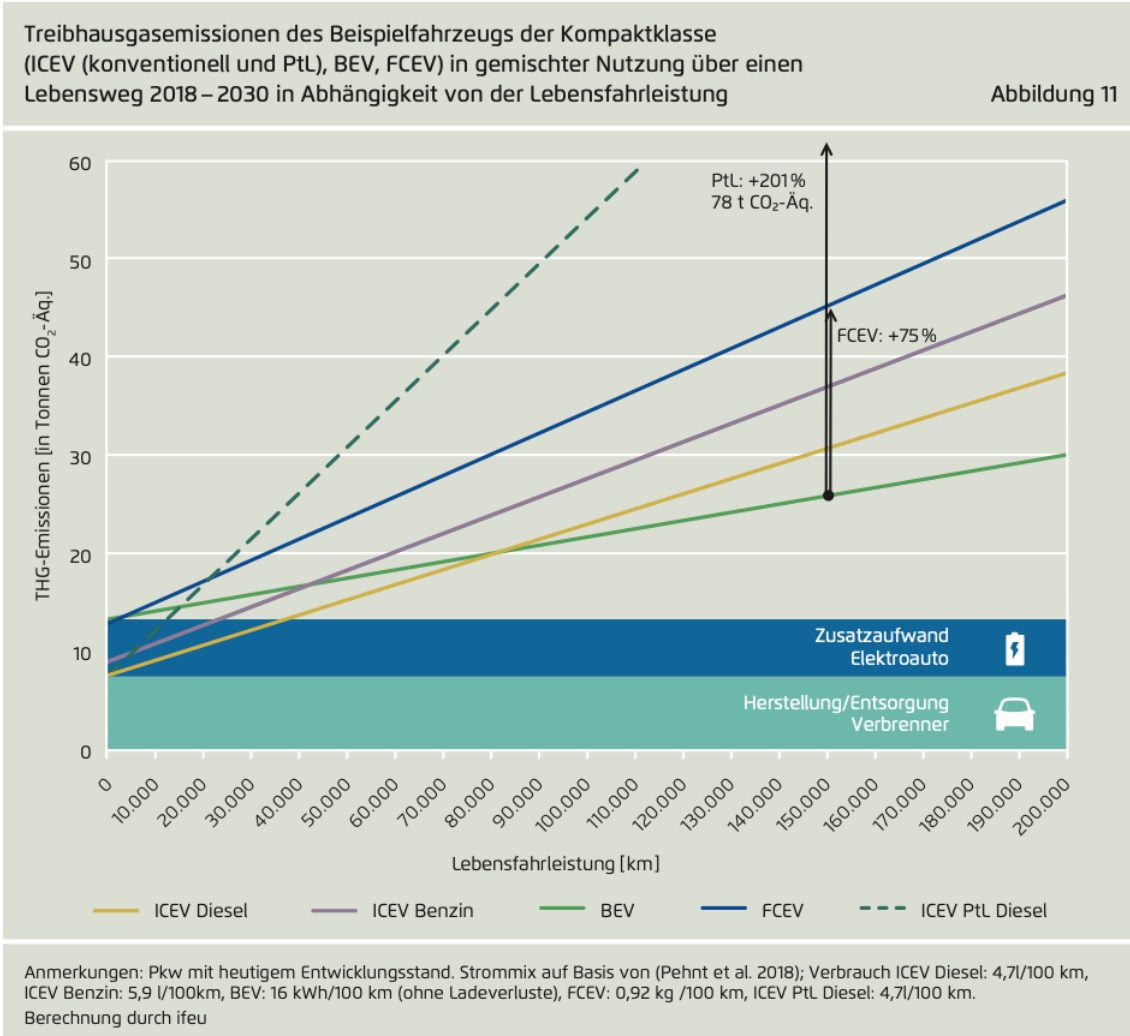


Abb. 2 Quelle: Agora Verkehrswende (2019): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen.

Glossar: ICEV Diesel: Dieselmotor, ICEV Benzin: Benzinmotor, BEV: batterie-elektrisches Auto, FCEV: Brennstoffzellenauto, ICEV PtL Diesel: Dieselmotor betrieben mit synthetisch hergestelltem Diesel

- Auch die Nutzung des im Rahmen des Einspeisemanagements abgeregelten Stroms für die Herstellung von Wasserstoff — was ja zunächst als eine gute Lösung erscheint — ist nicht mehr als ein Tropfen auf den heißen Stein. 5,4 TWh wurden 2018 abgeregelt<sup>12</sup>. Diese Strommenge wäre gerade ausreichend, um Wasserstoff für weniger als 1,3 % des deutschen Pkw-Bestandes herzustellen. Diese Strommenge wurde abgeregelt, weil das Netz sie zum Zeitpunkt der Produktion nicht aufnehmen konnte. Daraus folgt, dass dieser Strom, sollte er produziert werden, direkt an der Windkraftanlage mit einem Elektrolyseur in Wasserstoff umge-

<sup>12</sup> [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht\\_Energie2019.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5)

wandelt werden müsste und von dort per Lkw oder Pipeline zu den Bedarfsorten transportiert werden müsste, da an den Produktionsorten selbst weder Bedarf an Wasserstoff noch an zusätzlichem Strom besteht.

Rund die Hälfte des im Rahmen des deutschen Einspeisemanagements abgeregelten Stroms fällt in Schleswig-Holstein an. Hier läuft derzeit erfolgreich der Netzausbau, so dass die Menge des abgeregelten Stroms leicht gesunken ist<sup>13</sup>. Damit kann der Strom direkt zum Verbraucher gelangen — ohne den Umweg der Speicherung in Form von Wasserstoff und Rückverwandlung in Strom, was bereits wegen der sehr schlechten Energie-Effizienz der Elektrolyse und der Brennstoffzelle ausscheidet. Zumal sich im Pkw-Sektor eine dreimal effizientere Technik — direkter Einsatz von Strom im BEV — auf dem Markt gerade durchsetzt.

- Ein weiteres Gegenargument zur Nutzung von Wasserstoff im Pkw ist der Preis: Sowohl Anschaffung als auch Betrieb eines FCEV sind deutlich teurer als bei vergleichbaren BEV. Die beiden einzigen frei verkäuflichen FCEV auf dem deutschen Markt, der Toyota Mirai und der Hyundai Nexo, kosten rund 80.000 bzw. 70.000 €. Ein vergleichbarer Tesla Model 3 kostet knapp 54.000 € und hat eine Reichweite von 560 km.

Der Preis für 1 kg Wasserstoff beträgt seit Jahren, subventioniert, 9,50 €. Das reicht für knapp 100 km. Bei einem BEV fallen 5,40 € an bei einem Verbrauch von 18 kWh/100 km mit einem Strompreis von 30 ct/kWh. Sowohl Anschaffungs- als auch Betriebskosten sind also bei einem BEV deutlich niedriger.

- Gegen ein FCEV spricht auch der komplexe technische Aufbau, verglichen mit einem BEV. Ein FCEV braucht mindestens einen, häufig mehrere schwere Hochdrucktanks. Im Falle des Toyota Mirai wird ein 125 kg schwerer Tank benötigt, um 5 kg Wasserstoff mit 700 bar zu transportieren. Dazu kommt eine Brennstoffzelle mit Leistungselektronik, die in der Regel den gesamten Motorraum ausfüllt. Da die Brennstoffzelle bei niedrigen Temperaturen aufgeheizt werden muss, bevor sie starten kann, und weil sie schnelle Leistungsänderungen, zum Beispiel beim Anfahren, nicht bewältigt, ist ein zusätzlicher Akku notwendig. Das führt in der Summe dazu, dass Toyota für den Mirai 1.925 kg Leergewicht benennt, 125 kg mehr als ein Tesla Model 3, einem BEV. Im BEV können Akku, Motor und Leistungselektronik wegen des geringen Platzbedarfs im Unterboden integriert werden, so dass je ein Kofferraum vorne und hinten und ein großer Fahrgastraum möglich sind.

<sup>13</sup> [https://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Strom/\\_documents/einspeisemanagement.html](https://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Strom/_documents/einspeisemanagement.html)



- Gegen ein FCEV spricht die nur in Ansätzen vorhandene, sehr teuer aufzubauende Tank-Infrastruktur. Eine Wasserstoff-Tankstelle kostet ab 1 Mio. €. Heimlösungen stehen nicht zur Verfügung und sind wegen der Sicherheitsanforderungen auch nicht vorstellbar. Demgegenüber kostet eine professionelle öffentliche Ladesäule für BEV mit 2 Steckdosen einschließlich Anschluss an das öffentliche Stromnetz zwischen 5.000 und 10.000 €, und Heimlösungen gibt es ab 400 € plus Installation. Das Handling des Wasserstoffs konzentriert sich mindestens europaweit auf nur zwei Firmen: Linde und Air Liquide, so dass Konkurrenz und Wettbewerb allenfalls sehr schwach ausgeprägt sein dürften.

Stromleitungen liegen in jedem Fußweg, Strom ist in jedem Gebäude verfügbar. Strom kann durch Photovoltaik auf sehr vielen Dächern selbst und dezentral erzeugt werden. Es gibt tausende von großen und kleinen Stromproduzenten in Deutschland, so dass Wettbewerb und Versorgungssicherheit sichergestellt sind.

**Fazit:**

Wasserstoff wird voraussichtlich für die Energiewende als Speichermedium für zur Unzeit produzierten Strom benötigt. Er kann mit CO<sub>2</sub>-freiem Strom in einem CO<sub>2</sub>-freien Verfahren erzeugt werden und — soweit er nicht zur Rückverstromung benötigt wird — den großen Bedarf der Industrie, der heute mit „grauem“ Wasserstoff gedeckt wird, teilweise CO<sub>2</sub>-frei decken. Möglicherweise bietet sich auch ein Einsatz im Bereich des Schwer- und Fernverkehrs auf der Straße, der Schiene, auf dem Wasser oder in der Luft an. Der Einsatz im Pkw-Bereich bietet sich aus den beschriebenen Gründen nicht an, insbesondere wegen des ineffizienten Energiebedarfs, und er ist aktuell sogar kontraproduktiv im Klimaschutz.

Dies sollte öffentlich vermittelt werden, denn mit dem grundsätzlich richtigen Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft verbindet die Allgemeinheit weithin ausschließlich den Einstieg in das „Wasserstoffauto“ und hält bis auf weiteres am Benzin- oder Dieselauto fest und stellt den Umstieg auf Elektromobilität zurück.