

Brennstoffzelle oder Batterie?

Herkömmliche Verbrennungsmotoren haben bald ausgedient, denn der Autoverkehr muss klimafreundlicher werden. Doch was kommt danach?

von HARTMUT NETZ



Das Rennen scheint gelaufen. Während mit der Corona-Pandemie der Absatz von klassischen Diesel- und Benzin-Pkw einbrach, erlebte der batterie-elektrische Antrieb seinen Durchbruch. Für 2021 haben die deutschen Hersteller ein Vielzahl neuer Elektroauto-Modelle angekündigt – mehr als je zuvor. Allein der Volkswagen-Konzern, zweitgrößter Autobauer der Welt, drängt mit zehn neuen Stromern auf den Markt. Daimler will bis Jahresende vier neue E-Autos vorstellen. Und auch BMW hat die elektrische Schlagzahl erhöht. Die Hersteller scheinen sich einig: Die Zukunft gehört Fahrzeugen mit Elektromotor und Batterie.

Doch es geht ein tiefer Riss durch die Automobilindustrie. Klar ist, dass der Ver-

kehr klimaneutral werden muss. Aber der Weg dorthin führt nicht zwangsläufig über batterie-elektrische Antriebe. Auch Autos, die ihre Energie aus wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen beziehen, fahren emissionsfrei, falls der dafür nötige Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird. Die Frage, welcher Antrieb der bessere ist, Batterie oder Brennstoffzelle, spaltet die Branche. Tesla-

KOMPAKT

- Die Verkaufszahlen für batterie-elektrische Fahrzeuge steigen in Deutschland stark an.
- Doch vor allem bei Lkw könnte letztlich die Brennstoffzellen-Technik die Nase vorn haben.
- Sogenannte E-Fuels kranken an einer schlechten Energieeffizienz.

Chef Elon Musk beispielsweise, dessen Batterie-Autos den etablierten Autokonzernen das Fürchten lehrten, beantwortet sie, indem er „fuel cell“, den englischen Begriff für Brennstoffzelle, zu „fool cell“ verballhornt, was so viel bedeutet wie „Idioten-Zelle“.

In Asien ist man anderer Ansicht. Toyota in Japan und Hyundai in Südkorea haben bereits seit einigen Jahren Serienfahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle im Programm. Der Toyota Mirai, ein Pkw der oberen Mittelklasse, wurde erstmals 2014 der Öffentlichkeit vorgestellt. Inzwischen ist die zweite Generation auf dem Markt. Hyundai zog 2018 mit dem SUV Nexo nach. Beide Fahrzeuge wurden vom ADAC als alltagstauglich eingestuft, kosten allerdings mit knapp 65.000 (Mirai)



Der elektrisch angetriebene Semi-Truck von Tesla soll mit einer Batterieladung bis zu 1000 Kilometer schaffen.

und über 77 000 Euro (Nexo) etwa doppelt so viel wie ein vergleichbares Batterie-Auto. Beide Hersteller wollen die Produktion ihrer Wasserstoff-Autos in den nächsten Jahren hochfahren. Gleichzeitig sollen die Preise sinken.

Wettkampf der Technologien

Auch in Deutschland stehen sich zwei Lager gegenüber. Einerseits bezeichnet VW-Chef Herbert Diess, zu dessen Konzern neben Pkw-Marken wie Seat, Audi oder Porsche auch die Lkw-Hersteller MAN und Scania gehören, bei jeder sich bietenden Gelegenheit die Brennstoffzelle als Irrweg. Andererseits haben sich mit Daimler Trucks aus Deutschland und der Volvo-Group aus Schweden zwei weltweit führende Lkw-Hersteller im Gemeinschafts-

unternehmen Cellcentric zusammengesetzt, um ihre Schwerlasten mit Brennstoffzellen fahren zu lassen. Damit sind sie nicht allein: Bosch, größter Automobilzulieferer der Welt, hat 2019 rund 50 Millionen Euro in die Vorserienfertigung von Brennstoffzellen gesteckt. Mithilfe eines neuartigen Brennstoffzellen-Stacks soll die Technik schon bald serienreif sein. Bei Bosch hofft man, dass sich der neue Geschäftszweig bis 2030 zum Milliarden-geschäft entwickelt.

Auch Opel setzt auf die Zelle. Der Autobauer aus Rüsselsheim, der neben Fiat, Chrysler, Citroën und Peugeot zum multinationalen Stellantis-Konzern gehört, will noch vor Ende dieses Jahres den Transporter Vivaro-e, der bereits als reine Batterie-Version erhältlich ist, in einer Klein-

serie mit wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen-Technik auf den Markt bringen. Der Opel Vivaro-e Hydrogen soll mit einer einzigen Tankfüllung über 400 Kilometer weit fahren können. Die dafür nötige Energie liefert eine Brennstoffzelle mit 45-Kilowatt Leistung. Einen Preis für den Wasserstoff-Transporter hat Stellantis noch nicht bekanntgegeben – wohl aber, dass geplant ist, den von Opel entwickelten Wasserstoff-Antrieb auch in Transportern anderer Marken des Konzerns einzusetzen.

Der feine Unterschied

Doch vom Preis abgesehen, worin unterscheidet sich ein Batterie- von einem Wasserstoff-Auto? Wer von einem E-Auto spricht, meint in der Regel die batterie-



Unterschied im Innenleben:
der batterie-elektrische VW
ID4 (links) und der Toyota
Mirai mit Brennstoffzelle.



elektrische Variante, also ein Fahrzeug mit Elektromotor, der von einer Batterie aus parallel und seriell zusammengeschalteten Akkumulatoren gespeist wird. Doch auch unter der Haube von Wasserstoff-Autos arbeitet ein Elektromotor, der seinen Fahrstrom – zumindest in Teilen – per Batterie bezieht. Den Unterschied macht nur die Art und Weise, wie die jeweilige Batterie geladen wird.

Batterie-Autos werden unterwegs an einer Ladestation oder zu Hause an der

„Wallbox“ geladen. Das geschieht ähnlich wie das Laden eines Handys. Man verbindet Batterie und Wallbox per Ladekabel – und der Strom fließt, die Batterie lädt. Das ist einfach, dauert aber. Denn Elektroauto-Batterien benötigen Gleichstrom. Doch aus normalen Ladestationen fließt Wechselstrom, den der Lade-Controller der Batterie erst in Gleichstrom umwandeln muss. Deshalb hängt das E-Auto an normalen Ladestationen stundenlang am Kabel. Anders an Schnellladestationen,

die mit Gleichstrom betrieben werden: Da der Umwandschritt entfällt, verkürzt sich der Ladevorgang auf etwa eine halbe Stunde.

Beim Tanken punktet Wasserstoff

Das ist vergleichsweise schnell, aber nicht schnell genug, um mit einem Wasserstoff-Auto mithalten zu können. Auch der Wasserstofftank wird an speziellen Tankstellen befüllt, die den Treibstoff in Hochdruckspeichern bevorraten. Der Tankvorgang ähnelt im Wesentlichen dem Tanken an einer konventionellen Benzin- oder Dieselsäule. Der Kunde klinkt die Kupplung des Zapfschlauchs in den Tankstutzen seines Fahrzeugs und drückt den Startknopf. Wasserstoff beginnt zu fließen.

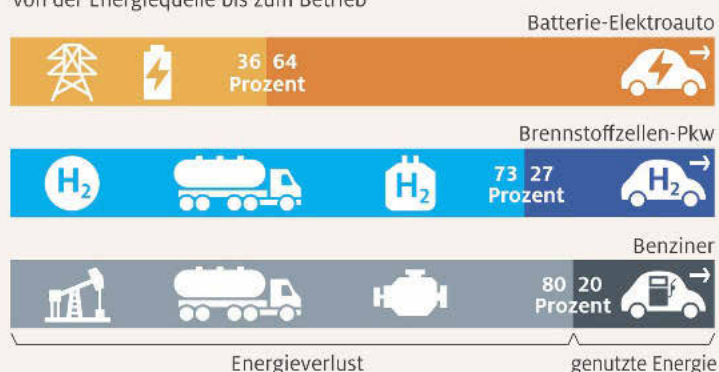
Doch bevor der Treibstoff in den Tank gelangt, muss er verdichtet werden – je stärker die Verdichtung, desto größer die Reichweite. Das erledigt eine vorgeschaltete Verdichtereinheit, die den Wasserstoff auf einen Vordruck von 900 Bar komprimiert. Beim Überströmen in den Tank entspannt sich der Wasserstoff auf den für Pkw üblichen Druck von 700 Bar. Zum Vergleich: Der Luftdruck, also der Druck, den die Luftmasse der Atmosphäre auf die Erdoberfläche ausübt, beträgt im Mittel 1 Bar.

Allerdings: Wird Wasserstoff entspannt, entsteht Wärme, die abgeführt werden muss. Um trotzdem schnelles Tanken zu ermöglichen, kühlt ein spe-

Elektroautos: Musterknaben der Energieeffizienz

Beim Ausnutzen der Energie – von der Gewinnung bis zum Betrieb des Fahrzeugs – sieht der herkömmliche Verbrennungsmotor alt aus. Betrachtet man alle Verluste auf diesem Weg, bleiben nur 20 Prozent der Energie übrig. Vor allem der Elektroantrieb schneidet in dieser Hinsicht deutlich besser ab.

Wirkungsgrade verschiedener Antriebsarten –
von der Energiequelle bis zum Betrieb



zielles Kälteaggregat den Treibstoff auf minus 40 Grad Celsius herunter.

Von der komplexen Technik hinter der Wasserstoff-Zapfsäule bekommt der Kunde nichts mit. Alles in allem dauert so ein Tankvorgang nur wenige Minuten und damit kaum länger als bei einem klassischen Diesel- oder Benzin-Auto. Aus getanktem Wasserstoff und zugeführter Luft erzeugt eine Brennstoffzelle an Bord des Fahrzeugs Strom und – als Abfallprodukt – Wasser, das als Dampf dem Auspuff entweicht. Der Rest des Antriebs ist nahezu identisch mit dem eines reinen E-Autos: Der erzeugte Strom speist ebenfalls eine – wenn auch deutlich kleinere – Batterie, die wiederum einen Elektromotor antreibt.

Strom aus der kalten Verbrennung

Brennstoffzellen sind also keine Energiespeicher, sondern Wandler, die aus chemischer Energie elektrische machen. Genau besehen besteht die gewöhnlich in Autos verbaute sogenannte Proton Exchange Membrane-Fuel Cell (PEMFC) aus mehreren Hundert einzelnen Brennstoffzellen, die zu einem „Stack“, dem Herzstück des Brennstoffzellen-Antriebs, gestapelt und in Reihe geschaltet werden. In jeder Zelle des Stacks wird mithilfe der sogenannten kalten Verbrennung aus der chemischen Reaktionsenergie von Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrischer Strom gewonnen. Dadurch erreichen PEM-Brennstoffzellen Leistungen im zwei- bis dreistelligen Kilowatt-Bereich.

Die Tatsache, dass Brennstoffzellen bislang bloß in recht kleinen Stückzahlen gefertigt werden, zeigt, dass die Technologie noch erhebliches Entwicklungspotenzial birgt. „Mit leistungsfähigeren Zellen wird sich der Platzbedarf der Stacks noch um einiges verringern“, meint Tom Smolinka, Leiter der Abteilung Chemische Energiespeicherung am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg. Auch der Wasserstoff-Verbrauch pro Kilometer lasse sich noch reduzieren, ist der Wissenschaftler überzeugt.

Fahren mit Methanol

Statt mit Wasserstoff lassen sich Brennstoffzellen allerdings auch mit Methanol füttern, einem niedermolekularen Alkohol. Wird dieser klimaneutral erzeugt,



Schicker Flitzer mit Alkohol im Tank: Der Ingolstädter Ingenieur Roland Gumpert hat den Sportwagen „Nathalie“ entworfen (oben), der mit Methanol betankt wird. Daraus wird Wasserstoff gewonnen, der Brennstoffzellen betreibt (links und unten).

fahren auch Methanol-Autos emissionsfrei. Der Ingolstädter Ingenieur Roland Gumpert hat einen solchen Antrieb bei Audi entwickelt. Sein zweisitziges Sportcoupé „Nathalie“, laut Gumpert 550 PS stark und bis zu 300 Kilometer pro Stunde schnell, soll mit einer Tankfüllung eines Methanol-Wasser-Gemischs rund 800 Kilometer weit fahren können.

Prinzipiell funktioniert der Antrieb genauso wie der eines wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-Autos. Allerdings ist zusätzlich ein Reformierverbaut, der das Methanol-Wasser-Gemisch erhitzt, den Wasserstoff extrahiert und damit die Brennstoffzelle versorgt. Neu ist die Idee nicht: Unter der Haube des Necar 3, eines 1997 von Daimler vorgestellten Pkw mit Methanol-Brennstoffzelle war dieselbe Antriebstechnik verborgen. Über die Testphase kam das Methanol-Auto damals jedoch nicht hinaus.

Gegenüber Wasserstoff bietet Methanol einige Vorteile: Es lässt sich ähnlich schnell tanken wie Benzin oder Diesel, kommt dabei ohne komplizierte Technik



im Hintergrund aus und ist zudem leicht zu lagern. „Ein Kanister aus Plastik genügt“, sagt Ralf Peters, der am Forschungszentrum Jülich das Institut für Energie- und Klimaforschung leitet. Gumperts Sportcoupé kommt deshalb mit einem gewöhnlichen, auf Flüssigkeiten ausgelegten Tank zurecht. In Wasserstoff-Autos werden dagegen kohlenstofffaserverstärkte Drucktanks genutzt.

Bescheidene Aussichten

Trotzdem schätzt Peters die Zukunftschancen des Methanol-Antriebs als recht gering ein: „Der Wirkungsgrad liegt etwa zehn Prozent unter dem eines wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-Antriebs“, gibt er zu bedenken. Zudem seien die Abbauprodukte von Methanol hochgiftig:



Bei der Firma Cellcenter werden Brennstoffzellen in kleinen Stückzahlen gefertigt.

„Aus diesem Grund ist Methanol als Kraftstoff der Öffentlichkeit in heutigen Zeiten kaum zu vermitteln.“

Alles offen bei den Lastwagen

Doch der motorisierte Individualverkehr ist nur eine von mehreren Facetten in der Debatte um die Antriebe der Zukunft. Für Pkw sei „der Zug wohl schon aus dem Bahnhof“, konstatiert Eric Sax, Experte

für Autonomes Fahren am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). „Da wird sich die Batterie durchsetzen.“ Anders im Transportsektor: „Im Schwerlastverkehr könnten Methanol-Brennstoffzellen eine interessante Alternative zum wasserstoffbasierten Antrieb sein“, argumentiert der Wissenschaftler. Schließlich müsse die für die Versorgung von Wasserstoff-Fahrzeugen nötige Infrastruktur

erst noch aufgebaut werden. „Wir sollten uns auf keine bestimmte Technologie versteifen, sondern möglichst technologieoffen bleiben“, rät Sax. „Aus dem Mix heraus wird sich die Zukunft gestalten.“

Unübersichtliche Lage

Tatsächlich ist die Lage im Schwerlastverkehr noch ziemlich unübersichtlich. Elektromotoren seien zwar am effizientesten, erläutert Ralf Peters vom Forschungszentrum Jülich: „Der Wirkungsgrad von E-Antrieben liegt zwischen 65 und 75 Prozent.“ Doch das Netz an Ladesäulen ist noch lückig. „Außerdem sind die Reichweiten batterie-elektrischer Lkw zu gering“, stellt der Wissenschaftler fest. In diesem Punkt seien Wasserstoff-Lkw deutlich überlegen, kämen aber wegen der Umwandlungsverluste lediglich auf Wirkungsgrade zwischen 35 und 45 Prozent. Zum Vergleich: Der Wirkungsgrad – also der Anteil des zugeführten Kraftstoffs, den der Antrieb in kinetische Energie umsetzt – beträgt unter Berücksichtigung des Produktionspfades bei einem Diesel bis zu 40, bei einem Benzinern knapp 30 Prozent.

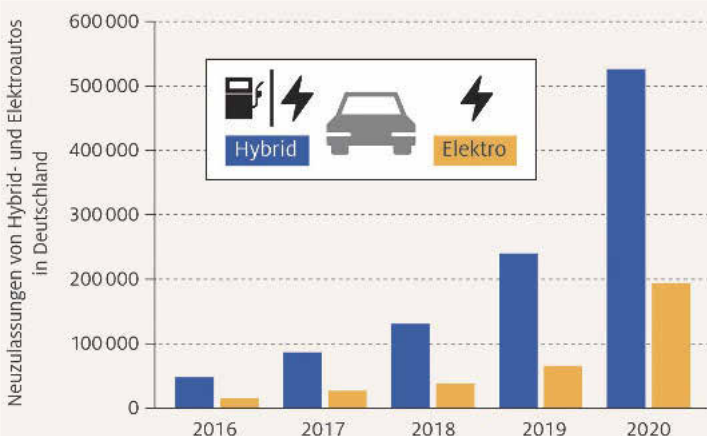
Bei MAN, der Lkw-Tochter des VW-Konzerns, die noch 2020 eine neue Modellgeneration mit Dieselantrieb vorstellte, setzt man inzwischen auf den Elektromotor. Ab 2024 will MAN im Münchner Stammwerk die Serienproduktion von E-Lkw starten. Die Schwerlasten sollen 500 Kilometer weit fahren können, bis sie zum Nachladen an die Säule müssen. Im Vergleich zum Diesel, der mit einer Tankfüllung gut 1000 Kilometer durchhält, ist das allerdings recht bescheiden. Der Semi-Truck von Tesla, für den Konzern-Chef Musk 800 Kilometer Reichweite verspricht, ist da deutlich näher dran. Die darin verbauten Batteriezellen will Tesla weiter optimieren. Dann wären laut Musk sogar 1000 Kilometer drin. Einen konkreten Liefertermin für den Semi-Truck hat er bislang allerdings noch nicht genannt.

Zehn Tonnen schwere Batterien

KIT-Wissenschaftler Eric Sax überzeugt das nicht: „Geht man davon aus, dass ein Lkw mit einer Nutzlast von 40 Tonnen pro Kilometer 1,5 bis 2 Kilowattstunden elektrischen Strom verbraucht, muss allein die Batterie zehn Tonnen wiegen“,

Mit den Verkaufszahlen für Elektroautos geht es steil bergauf

Seit einigen Jahren steigen die Verkaufszahlen elektrisch betriebener Automobile in Deutschland kräftig an. Gefragt sind vor allem Hybrid-Fahrzeuge, die sowohl einen Elektro- als auch einen Verbrennungsmotor besitzen.





Einige Forscher sehen die Zukunft des Güterverkehrs in E-Lkw an der Oberleitung.

gibt er zu bedenken. „Das ist wirtschaftlich unattraktiv.“ Bei Daimler sieht man das ähnlich. Der Konzern will nach dreijähriger Testphase im Alltagsverkehr noch 2021 in die Serien-Produktion des E-Actros einsteigen. Die beiden flüssigkeitsgekühlten Elektromotoren auf der Hinterachse des 20-Tonnners leisten permanent 330 Kilowatt. Als Spitzenleistung gibt Daimler 400 Kilowatt an.

Doch für Langstrecken ist der E-Actros, der in zwei Ausführungen mit drei oder vier Batteriepaketen mit einer Kapazität von jeweils 105 Kilowattstunden erhältlich ist, nicht gedacht. Unter Idealbedingungen sind damit Etappen von 400 Kilometern am Stück zu schaffen – eine Reichweite, die den Lkw für den schweren Verteilerverkehr prädestiniert. Das Aufladen der Batterien von 20 auf 80 Prozent soll an einer Schnellladestation etwas länger als eine Stunde dauern.

Spannung über der rechten Spur

Um den Elektroantrieb auch für die Langstrecke fit zu machen, favorisiert das Öko-Institut in Freiburg Oberleitungs-Lkw. Eine Studie des Instituts kommt zum Schluss, dass Oberleitungen, gespannt über die rechte Spur von Autobahnen, die derzeit kostengünstigste Variante wären, um die Reichweite batterie-elektrischer Lkw zu steigern. Mit Stromabnehmern ausgerüstete Hybrid-Lkw würden dort im

E-Betrieb ihren Fahrstrom zapfen und beim Verlassen der Autobahn auf Dieselmotor umschalten. Auf diese Weise könnten Schwerlast große Strecken zurücklegen, weitgehend unabhängig vom aktuell noch zu grobmaschigen Ladesäulennetz. Derzeit werden sogenannte O-Lkw auf drei Teststrecken in Hessen, Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein im Alltagsverkehr erprobt.

Laut Öko-Institut würde es genügen, etwa ein Drittel des 12000 Kilometer um-

Wasserstoff-Lkw: Alltags-test in der Schweiz

fassenden Autobahnnetzes zu überspannen. Denn der Schwerlast-Fernverkehr in Deutschland konzentrierte sich auf nur wenige Strecken, heißt es in der Studie. Selbst beim derzeitigen Strommix könne ein Oberleitungs-Lkw im Vergleich zu einem herkömmlichen Diesel seinen CO₂-Ausstoß bis 2025 mehr als halbieren, rechnen die Studienautoren vor. Das wäre ein Vorsprung beim Klimaschutz, der sich mit einem steigenden Anteil an „grünem“ Strom im Netz kontinuierlich vergrößern würde. Damit hätten O-Lkw laut den Experten am Öko-Institut neben batterie-elektrischen Schwerlastwagen das größte

Potenzial, die Klimagas-Emissionen des Güterverkehrs zu mindern.

Doch bei Daimler Trucks hält man Oberleitungs-Lkw für einen Irrweg. Die Antriebsstrategie des Konzerns für die Langstrecke lässt sich auf die einfache Formel bringen: Je weiter der Weg und je schwerer die Fracht, desto mehr spricht für den Wasserstoff-Lkw. „Der wasserstoffbasierte Brennstoffzellen-Antrieb wird im klimaneutralen Lkw-Fernverkehr der Zukunft unverzichtbar sein“, ist Daimler Trucks-Chef Martin Daum überzeugt. Der Konzern ist aktuell dabei, seinen 2020 der Öffentlichkeit vorgestellten Prototyp Mercedes Benz GenH₂ Truck weiterzuentwickeln. Der Wasserstoff-Schwerlast soll mit einer Tankfüllung an Flüssigwasserstoff mindestens 1000 Kilometer weit fahren können. Für 2023 sind erste Tests im Alltagsverkehr geplant, ab 2027 soll der 40-Tonner in Serie vom Band rollen.

In der Schweiz ist man schon weiter. Dort hat der Hyundai-Konzern im Herbst 2020 damit begonnen, serienmäßig hergestellte Wasserstoff-Lkw auszuliefern. Mit einer Ladekapazität von knapp über zehn Tonnen und Reichweiten von mehr als 400 Kilometern eignen sich die kompakten Laster vor allem zum Beliefern des Einzelhandels. Per Anhänger lässt sich die Ladekapazität auf 36 Tonnen steigern, was die Reichweite allerdings deutlich drücken dürfte. Zu den Kunden, die den

Wasserstoff-Lkw im Alltagsbetrieb testen wollen, gehören die Schweizer Post sowie die Lebensmittelhändler Coop, Migros und Schwab-Guillod. Allerdings: Für die H₂-Flotte, die bis 2025 auf 1500 Fahrzeuge anwachsen soll, muss das bislang noch weitmaschige Tankstellennetz massiv ausgebaut werden.

Es mangelt an Zapfsäulen

Die mangelhafte bis nicht vorhandene Versorgungsinfrastruktur ist die Achillesferse der Wasserstoff-Mobilität. Denn während Elektroauto-Fahrer ihre Fahrzeuge an derzeit deutschlandweit über 25 000 Ladestationen nachladen können,

gibt es für Wasserstoff-Autos gerade mal knapp 100 Tankstellen, an denen sich zwar Pkw, nicht jedoch Lastwagen betanken lassen. „Die meisten davon eignen sich nicht oder nur bedingt für Lkw“, heißt es in einer Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI), „da sie weder die benötigten Mengen noch eine zügige Betankung sicherstellen können.“

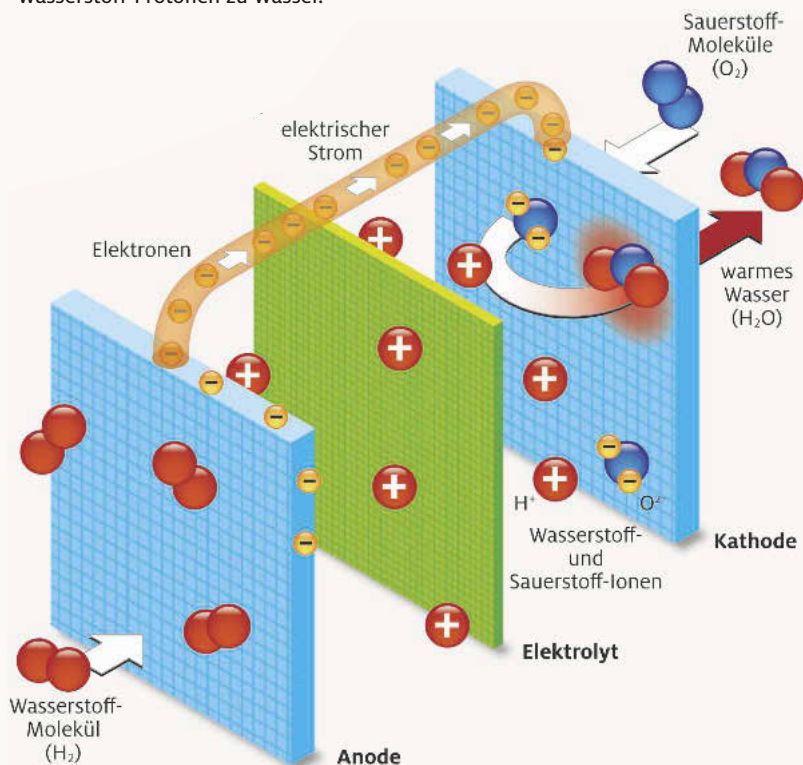
„Es ist ein typisches Henne-Ei-Problem“, stellt ISE-Wissenschaftler Tom Smolinka fest: „Ohne Tankstellennetz fertigt kein Hersteller Wasserstoff-Autos in Serie. Andererseits brauchen die Tankstellen Abnehmer, um Geld zu verdienen.“ Dieses

Dilemma will das Industriekonsortium H2 Mobility, zu dem neben Daimler und Hyundai die Energiekonzerne Shell, Total und OMV sowie die Industriegashersteller Linde und Air Liquide gehören, auflösen. In den nächsten drei Jahren sollen weitere 300 H₂-Tankstellen gebaut werden, deutlich größer als die bestehenden und auch für Nutzfahrzeuge wie Busse und Schwerlasten ausgelegt.

Für den klimaneutralen Straßengüterverkehr wäre das ein enormer Sprung nach vorn. Das Fraunhofer ISI hat ein Szenario durchgerechnet, in dem alle schweren Lkw auf deutschen Straßen mit Brennstoffzellen-Antrieb fahren. Das Ergebnis: Bereits ein Netz aus 140 Tankstellen – errichtet an Autobahnen, Transitrouten und in Industrieregionen – würde reichen, um den gesamten Wasserstoffbedarf der Lkw von etwa 1,3 Millionen Tonnen pro Jahr zu decken. Das ist ein Szenario mit Zukunftschancen, denn im Schwerlastverkehr gelten andere Gesetze als im Individualverkehr. „Speditionen arbeiten im Flottenbetrieb und mit detailliert durchgeplanten Betriebsabläufen“, erläutert Tom Smolinka. „Sollte sich die Brennstoffzelle im Lkw-Bereich durchsetzen, wird es schon bald viele betriebseigene Wasserstoff-Tankstellen geben.“

Das Prinzip der Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle besteht, vereinfacht gesagt, aus Anode, Membran und Kathode. Die Anode spaltet kontinuierlich zugeführten Wasserstoff in Protonen und Elektronen auf. Während die Protonen problemlos durch die Membran diffundieren und weiter zur Kathode fließen, ist den Elektronen dieser Weg versperrt. Sie sind daher gezwungen, den Umweg über einen elektrischen Kreislauf zu nehmen, auf dem sie die Pufferbatterie des Brennstoffzellen-Antriebs mit Strom versorgen. An der Kathode angekommen, reduzieren sie den zugeführten Sauerstoff. Die danach negativ geladenen Sauerstoff-Ionen reagieren schließlich mit den positiv geladenen Wasserstoff-Protonen zu Wasser.



Eine Zukunft für Verbrenner?

Das Rennen um den Antrieb der Zukunft bleibt also spannend. Doch was macht das mit dem Verbrennungsmotor? Ist damit das Ende klassischer Diesel- und Benzin-Antriebe eingeläutet? Die Antwort lautet: Noch nicht ganz, denn auch ein Auto mit Verbrennungsmotor fährt emissionsfrei, wenn die Tankfüllung klimaneutral hergestellt wurde. E-Fuels heißen solche Kraftstoffe, die mithilfe von Strom synthetisch erzeugt werden. Dafür spaltet man per Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Reagiert Wasserstoff anschließend mit CO₂, entstehen synthetische Brenn- oder Kraftstoffe wie Gas, Heizöl, Benzin, Diesel oder Kerosin.

Entzieht man das für die Reaktion nötige CO₂, das beim Verbrennungsvorgang wieder frei wird, der Atmosphäre, ist der CO₂-Kreislauf geschlossen. Stammt zudem der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen, sind synthetische Treibstoffe weitgehend klimaneutral.



Rollt hier die Zukunft an Land? Hyundai liefert neue Wasserstoff-Lkw aus.

Der Vorteil von E-Fuels: Die Motortechnik bliebe so gut wie unverändert, denn die chemische Zusammensetzung von synthetischem Benzin oder Diesel gleicht der ihrer fossilen Pendanten. Auch die Versorgungsinfrastruktur wäre mit dem bestehenden Tankstellennetz bereits vorhanden. Der Automobilindustriever-

band VDA befürwortet deshalb den Einsatz von E-Fuels als die am schnellsten wirkende Maßnahme, um den Straßenverkehr auf Klimakurs zu bringen.

Doch E-Fuels haben auch einen entscheidenden Nachteil: Ihr Wirkungsgrad beträgt nur 15 bis 20 Prozent. Das treibt den Wasserstoff- und damit den Strom-

bedarf in die Höhe. Im Straßenverkehr sei die direkte Nutzung von Elektrizität wirtschaftlich sinnvoller als der Einsatz von E-Fuels, heißt es daher in einer Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. „Wasserstoffbasierte Kraftstoffe sollten besser Sektoren vorbehalten bleiben, die nicht elektrifiziert werden können“, schreiben die Forscher aus Potsdam, „etwa der Luftfahrt oder bestimmten industriellen Prozessen wie der Stahlerzeugung.“ Allerdings hätten E-Fuels das Potenzial, die nach 2040 noch verbliebenen fossilen Kraftstoffe zu ersetzen.

An Optionen, den Straßenverkehr klimaneutral zu machen, mangelt es also nicht. Doch egal, ob E-Fuels, Batterie oder Brennstoffzelle – alle diese Technologien verharren bis auf Weiteres im Stadium der Verheißung. Denn damit betriebene Fahrzeuge fahren zwar CO₂-frei, aber nicht klimaneutral. Sie verlagern den Klimaschaden nur in die Produktion der Antriebsenergie. Schließlich stammt der hiesige Strommix noch immer zur Hälfte aus fossilen Quellen. Und Wasserstoff wird bislang vor allem aus Erdgas gewonnen. Beides ist alles andere als klimaneutral. ■



Bei der Herstellung von synthetischen Treibstoffen, den „E-Fuels“, kommt man ohne Rohöl aus. Sie werden klimaschonend aus Wasser, CO₂ und Strom erzeugt.



HARTMUT NETZ

hält den Ansatz für klug, den Schwerlast-Verkehr batterie-elektrisch und den Fernverkehr mit Brennstoffzellen zu betreiben.