

Der nachfolgende Text ist ein wissenschaftspolitischer Beitrag des Autors. Er ist, wie alle Meinungsäußerungen von Wissenschaftlern, kein offizielles Statement der Hochschule.

Einleitung

Wer die aktuelle Tagespresse in Deutschland verfolgt, kommt zu dem Eindruck, dass der Wettbewerb der zukünftigen Energiespeichertechnologien für Pkws in vollem Gange sei. Auf der einen Seite stehen die Batterien (BEV = Battery Electric Vehicle), die aber als langsam zu laden und umweltschädlich gelten. Auf der anderen Seite stehen Brennstoffzellen (FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle), die scheinbar keine schädlichen Rohstoffe benötigen und nur reines Wasser erzeugen.

Bei genauerer Betrachtung fallen diese Vorstellungen jedoch vollständig in sich zusammen: In Wirklichkeit gibt es gar keinen Wettbewerb.

Wegen der schlechten Wirkungsgradkette haben Fahrzeuge mit Brennstoffzellen einen hohen Primärenergiebedarf und benötigen eine aufwändige Infrastruktur. Sind bei weitem nicht so umweltfreundlich, wie es oft dargestellt wird. Tatsächlich sind batterieelektrische Fahrzeuge heute umweltfreundlicher als Brennstoffzellen-Pkws – selbst mit dem aktuellen deutschen Strommix, der immer noch rund ein Drittel Kohlestrom enthält. Umweltfreundlicher als Pkws, die fossile Rohstoffe verbrennen, sind sie sowieso.

Lithium-Ionen-Batterien unterscheiden sich in ihrer elektrochemischen Funktionsweise deutlich von allen andern, vorher bekannten Batterietechnologien. Ihre Technologie ist viel jünger, aus den 1970/80er Jahren. Sie wurden erst ab den 1990er Jahren kommerzialisiert und das erste mit Lithium-Ionen-Batterie ausgerüstete Elektroauto fuhr erst nach der Jahrtausendwende.

Die Technologie entwickelt sich rasant weiter, die physikalisch/chemischen Grenzen sind noch lange nicht erreicht. Laufend werden neue Materialien und neue Herstellungsverfahren mit verbesserten Eigenschaften entwickelt. Die Forschergruppen sind voller Ideen, von denen es in Zukunft bestimmt nicht alle, aber sicher einige in die Massenproduktion schaffen. Das gilt übrigens genauso für Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe, insbesondere von Lithium - auch hier besteht Verbesserungspotential sowohl hinsichtlich Kosten als auch beim Umweltschutz. Das können, müssen und werden wir in Zukunft ausschöpfen.

Die physikalisch/chemischen Eigenschaften von Wasserstoff sind gegeben und werden sich auch in einer Million Jahren nicht verändern. Es geht bei allen heutigen und zukünftigen Entwicklungen lediglich darum, Apparate und Anlagen zu verbessern, die mit diesen Eigenschaften zurechtkommen. Brennstoffzellen sind seit den 1950er Jahren bekannt und das erste Auto fuhr damit bereits 1966. Nach einer so langen Entwicklungszeit ist das weitere Entwicklungspotenzial begrenzt.

Nachfolgend werden der aktuelle Stand und die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten von Batterie- und Brennstoffzellentechnologie für die Anwendung im Pkw schlaglichtartig dargestellt. Beide haben ihre Daseinsberechtigung, aber die Brennstoffzelle in ganz anderen Anwendungsfeldern.

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs)

Infrastruktur

Mit höchstens **25% zusätzlicher Stromproduktion** kann man die gesamte Pkw-Flotte in Deutschland vollständig elektrisch betreiben¹. Das ist in einem Zeitraum von 20 bis 30 Jahren ein realistisches Ziel.

Die Infrastruktur zur Energieversorgung mit Strom und die Ladeinfrastruktur für Pkws kann sukzessive weiter ausgebaut werden und mit dem zunehmenden Bedarf wachsen. Die benötigte Technik ist bestens bekannt, etabliert und preiswert.

Eine Ladestation für daheim (11 kW Wallbox) inklusive der benötigten Leitungsschutzeinrichtung wird inzwischen für 400 € Endkundenpreis angeboten². Hinzu kommt nur noch die Verkabelung. Eine solche Wallbox muss beim Netzbetreiber nicht genehmigt, sondern nur angemeldet werden, da lediglich 16 A Strom fließen. Damit lassen sich selbst die Batterien der größten heutigen Elektroautos mit über 500 km Reichweite problemlos in einer Nacht aufladen.

Und wer keine eigene Wallbox hat, der lädt sein Auto ein- oder zweimal in der Woche beim Arbeitgeber, beim Einkaufen oder bei Freizeitaktivitäten (Sporthalle oder ähnliches). Man kann Straßenlaternen in Wohngebieten vergleichsweise einfach und preiswert zu Ladepunkten ausbauen – in Berlin ist ein Pilotprojekt für die Nachrüstung von 1.000 Laternen bereits gestartet³.

Für größere Fahrtstrecken (Urlaub, Geschäftsreisen) werden Schnellladesäulen auf Rastplätzen entlang der Autobahnen benötigt. Die Firma Tesla Motors betreibt in Europa aktuell (Stand Herbst 2019) ein Netz von rund 450 Standorten mit jeweils typisch 4 bis 8 Ladepunkten. Die Firma Ionity plant, bis Ende 2020 europaweit 400 Standorte in Betrieb haben. Derzeit sind schon rund 160 Standorte aktiv⁴. Hinzu kommen weitere, meist regionale Anbieter wie zum Beispiel Fastned oder EnBW.

Das Stromtankstellenverzeichnis GoingElectric⁵ listet europaweit bereits 400 allgemein zugängliche Standorte von Schnellladesäulen über 100 kW Leistung mit insgesamt rund 1600 Anschlüssen auf – Tendenz stark steigend.

Ein weiterer Aspekt ist die dezentrale Netzstabilisierung durch Elektroautos. Üblicherweise stehen Pkws wesentlich länger auf Parkplätzen, als dass sie gefahren werden. Während dieser Zeit kann ein Teil der in der Batterie gespeicherten Energie als Pufferspeicher verwendet werden (Primärregelleistung und Minutenreserve). Dazu ist es erforderlich, dass der Fahrzeugbesitzer einen Nutzungsvertrag mit einem Netzbetreiber abschließt. Außerdem wird ein bidirektionales Netz benötigt (Smart-Grid). Beides ist in Deutschland noch Zukunftsmusik, aber die benötigte Technologie ist bereits entwickelt und grundsätzlich einsatzbereit.

Natürlich wird man nur einen kleinen Teil der Batteriekapazität für diese Regelung nutzen, um die Lebensdauer nicht zu beeinträchtigen und um die Fahrtüchtigkeit des Fahrzeugs aufrecht zu erhalten. **Schon mit vier Millionen Elektroautos kann man in etwa so viel Regelleistung und Speicherenergie bereitstellen, wie alle Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland liefern⁶.**

Lebensdauer

Die Lebensdauer heutiger Fahrzeugbatterien ist wesentlich größer als beispielsweise die von Handyakkus. Das liegt zum einen an der veränderten chemischen Zusammensetzung der internen Komponenten. Zudem ist das Batteriemanagement von Autobatterien ausgefeilter. Beim Laden und Entladen werden die maximalen Ströme in Abhängigkeit von Ladezustand, Temperatur und Alterung genau kontrolliert. Der Ladezustand jeder einzelnen Zelle wird ständig überwacht und bei Abweichungen ausgeglichen. Fahrzeugbatterien haben auch immer einen internen Puffer, so dass nie zu 100 % geladen oder zu 0 % entladen wird.

Audi, Mercedes, Tesla und VW geben beispielsweise eine Garantie von 8 Jahren oder bis zu 160.000 km auf die Batterie. Bei BMW gelten die 8 Jahre sogar ohne Kilometerbeschränkung. Es gibt Berichte von Elektroautos, die mit nur zwei Batteriewechseln rund 650.000 km gefahren sind⁷.

Recycling und 2nd-Life

Groß im Kommen sind die Themen Recycling und 2nd-Life von Akkus⁸. In Zukunft wird es eine Vielzahl von gebrauchten Fahrzeugbatterien geben, die zwar nicht mehr den hohen Leistungsanforderungen in einem Auto genügen, die sich aber weiterhin zur stationären Speicherung von elektrischer Energie eignen. Die Aufbereitung und der Weiterverkauf dieser Zellen wird sich zu einem Milliardengeschäft entwickeln. Dadurch werden beispielsweise die Preise für elektrische Heimspeicher wesentlich sinken. Auch große Anlagen zur Netzstützung mit vielen hundert MWh Kapazität kann man aus 2nd-Life Zellen kostengünstig aufbauen.

Recycling von Batterien ist aufgrund des einfachen Zellaufbaus, der nur wenigen Komponenten enthält, ebenfalls gut möglich und wird sich zu einem weiteren Milliardengeschäft entwickeln. Auch wenn noch nicht alle Probleme gelöst sind, insbesondere ist der hohe Energieaufwand beim Recycling zu beachten, scheint es realistisch zu erwarten, dass wir in mittelfristiger Zukunft einen wesentlichen Teil des Lithiums für neue Zellen aus Sekundärmaterial erhalten.

Übrigens: 2nd-Life und Recycling sind bei Wasserstoff-Anlagen nicht so einfach möglich, denn die Technik ist prinzipiell komplex mit vielen kleinteilig höchst unterschiedlichen technischen Komponenten (Hochdruckpumpen und Motoren, Rohrleitungen, Filter, Ventile, Dichtungen, Stellantriebe, Sensoren, Steuerungen usw.).

Brandgefahr

Grundsätzlich gilt für jedweden Transport von elektrochemisch gebundener Energie, dass eine Brandgefahr vorhanden ist. Das trifft auf Benzin, Diesel, Batterien und Wasserstoff gleichermaßen zu.

Es stellt sich die Frage, ob batterieelektrische Fahrzeuge gefährlicher sind als Pkws mit fossilen Brennstoffen. In westlichen Ländern mit hohem Lebensstandard brennen pro Jahr rund 1 Promille des Pkw Bestands. Für Deutschland sind das pro Jahr ca. 40.000 Pkw Brände, davon 15.000 schwere Brände. Es kommt immer wieder zu schweren Bränden unmittelbar nach Unfällen, bei denen die Insassen nicht gerettet werden können.

Batterien für Pkws müssen hohen Sicherheitsanforderungen genügen und vor einer Zulassung aufwändige Crashtests bestehen. Für das Brandrisiko von Elektroautos gibt es aufgrund

der relativ geringen Verbreitung und dem relativ jungen Alter der Fahrzeuge bisher keine gesicherten Statistiken. Betrachtet man nur die Fahrzeuge der Marke Tesla, die am weitesten verbreitet sind, dann ist das Brandrisiko derzeit um rund eine Größenordnung kleiner als das von konventionellen Pkws.

Spontane Brände nach schweren Unfällen sind bisher nicht bekannt geworden. Vor jedem Batteriebrand gab es ein mehrminütiges Zeitfenster, innerhalb dessen die Insassen gerettet werden können.

Nachteilig ist, dass Batterien auch nach längerer Lagerung des Unfallfahrzeugs (bis zu fünf Tage) noch zu brennen anfangen können. Batteriebrände sind auch etwas schwerer zu löschen, als Brände von herkömmlichen Pkws. Man benötigt dazu größere Mengen an Wasser. Im Inneren des Brandes können geringe Mengen an Flusssäure entstehen, welche außerordentlich gefährlich ist. Allerdings ist das Innere eines Brandherdes sowieso gefährlich und wird von Feuerwehrleuten wohl kaum betreten. Ein erhöhtes Risiko für Unfalld Helfer ist bei Elektroautos jedenfalls bisher nicht bekannt.

Feinstaub

Elektroautos ermöglichen eine wesentliche Verbesserung bei der innerstädtischen Feinstaubbelastung. Nicht nur, dass die Feinstaubemissionen der Verbrennungsmotoren entfallen, auch der Bremsenabrieb ist wesentlich geringer als bei konventionellen Pkws. Der Grund ist die Rekuperation, also die Motorbremse. Die mechanische Bremse wird nur noch zum Halten des Fahrzeugs gegen Wegrollen benötigt (Feststellbremse). In Summe können Elektroautos die Feinstaubbelastung des Straßenverkehrs um etwa 40% reduzieren. Das sind 10% der gesamten Feinstaubemissionen⁹.

Ein weiterer positiver Nebeneffekt der Rekuperation ist, dass die Alufelgen von Elektroautos nicht durch Bremsenabrieb schwarz werden und mit der normalen Autowäsche ganz einfach zu reinigen sind.

Rohstoffe

Lithium ist in großen Vorkommen in allen Erdteilen vorhanden. Die heute bekannten Reserven und Ressourcen reichen für eine vielfache Ausrüstung aller weltweit fahrenden Pkws (1,2 Mrd.) mit großen Batteriespeichern (75 kWh) aus¹⁰.

Hinzu kommt zukünftig die Nutzung von recyceltem Sekundärlithium, wodurch sich die Reichweite weiter erhöht. Außerdem findet sich Lithium auch in unvorstellbar großen Mengen im salzhaltigen Meerwasser. Befürchtungen hinsichtlich einer grundsätzlichen Knappheit von Lithium sind völlig unbegründet.

Kobalt

Die Nutzung von Kobalt in Autobatterien nimmt immer weiter ab. In mittelfristiger Zukunft wird es kaum noch benötigt: Tesla Motors hat Mitte 2018 angekündigt, für die nächste Batteriegeneration weitgehend auf Kobalt zu verzichten. Schon heute enthalten moderne NMC811-Autobatterien ca. 2/3-weniger Kobalt als ältere Zellen und LiFePo Batterien für Heimspeicher sind gänzlich frei von Kobalt.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) kontrolliert regelmäßig die Mienen im Kongo gemeinsam mit einer Reihe anderer, international tätiger Organisationen. Nach ihrer Aussage werden 80 bis 90% des Kobalts von großen, internationalen Unternehmen abgebaut, die sich in der Regel an die weltweit gültigen Vorschriften halten¹¹. Von diesen Unternehmen beziehen alle namhaften Batteriehersteller ihr Kobalt.

Kinderarbeit gibt es in den übrigen, illegalen Familienbetrieben im Kleinbergbau, deren Kobalt überwiegend in chinesischen no-name Billigprodukten aus dem Bereich der Jubelelektronik landet. Aber selbst dort hat die BGR nach eigener Aussage nur selten schwere Kinderarbeit gefunden.

Zudem liefert der Kongo lediglich 60% der weltweiten Fördermenge an Kobalt. In anderen Abbaugebieten (vor allem in Australien) gibt es keine nennenswerten Probleme mit Kinderarbeit.

Lithium

Lithium wird heute aus einer Salzlauge gewonnen, die man in großen Mengen aus der Erde pumpt und dann verdunsten lässt. Dabei besteht die Gefahr der Absenkung des Grundwassers, wenn zu viel entnommen wird.

Im Vergleich verbraucht die Herstellung von Benzin und Dieselmotorkraftstoff aber ebenfalls sehr viel Wasser und die 21 Millionen Liter täglicher Wasserverlust in den Lithiumminen in Chile sind nur ein Dreißigstel der Menge an Wasser, die im Lausitzer Braunkohlerevier täglich abgepumpt werden muss. In Chile gibt es außerdem drei Monate Regenzeit mit einem Wasserüberstand von bis zu einem halben Meter, was den Verlust mehr als ausgleicht. Ausführliche Details zur Umweltproblematik von Lithiumabbau in Chile und Argentinien enthält ein Artikel des Handelsblattes¹².

Ein Forscherteam des irischen Institute of Technology Carlow kommt nach eingehender Beschäftigung mit der Umweltproblematik der Rohstoffförderung zu dem Schluss, dass der moderne Bergbau Mineralien ohne große Umwelteffekte abbauen kann¹³. Der Lithiumabbau hat "einen vergleichsweise kleinen Umwelteffekt, auch verglichen mit dem Abbau von Platin und Seltenen Erden."

Die größten Lithium-Abbaugebiete befinden sich übrigens gar nicht in Chile, sondern wieder in Australien¹⁴. Weitere Lithium-Vorkommen sind in vielen Ländern in allen Kontinenten vorhanden, unter anderem werden in Portugal 1 bis 2 % des weltweiten Lithium-Bedarfs gewonnen.

Zukünftig wird man einen wesentlichen Teil des Bedarfs aus Sekundärlithium (Recycling) decken können, so wie heute schon bei Kupfer.

Bei der Diskussion über die Umweltproblematik von Lithium und Kobalt wird gerne vergessen, welche enormen Umweltschäden durch die Förderung und den Transport von Rohöl entstehen. Greenpeace bezeichnet diesen Stoff als „schwarze Pest“. Einzelne Länder, zum Beispiel Nigeria, sind vollständig von den großen Ölkonzernen abhängig. Internationale Umweltstandards werden hier weitgehend missachtet. Die Lebenserwartung von Millionen von Menschen sinkt dadurch um rund 10 Jahre¹⁵. Das alles können wir durch Elektromobilität beenden.

In Summe kann man feststellen, dass der ökologische Fußabdruck von Elektroautos mit ihren Batterien viel kleiner ist als der von Autos, die fossile Energiequellen nutzen.

Es sei noch erwähnt, dass Wasserstoffautos mit Brennstoffzellen ebenfalls eine recht große Batterie benötigen. Ein Daimler GLC F-Cell Plug-In hat sogar eine Lithium-Ionen-Batterie mit 13,5 kWh Kapazität. Die Batterie wird für den Kaltstart des Brennstoffzellensystems, für die schnelle Leistungsbereitstellung bei starker Beschleunigung und vor allem für die Rekuperation benötigt, denn ansonsten geht die Bremsenergie von Brennstoffzellenfahrzeugen wie bei konventionellen Pkws verloren.

Man muss außerdem anmerken, dass Kobalt und Lithium selbstverständlich auch in allen anderen Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien benötigt werden, insbesondere in großer Menge in Smartphones und Laptops sowie in Rasierapparaten, elektrischen Zahnbürsten, kabellosen Elektrowerkzeugen und so weiter. Tatsächlich ist der Lithiumbedarf für Handys und Laptops derzeit sogar noch größer als der für Elektroautos. Wer Elektroautos aufgrund der Rohstoffproblematik ablehnt, muss auf diese und ähnliche Produkte ebenso verzichten.

CO₂-Footprint in der Produktion

Bedingt durch die in den letzten Jahren stark gestiegene Energiedichte und den damit gesunkenen Herstellungsaufwand von Batteriespeichern nähert sich der CO₂-Footprint von Brennstoffzellensystemen und Batterien immer weiter an. Diese Entwicklungen vollziehen sich so rasch, dass sie in kaum einer aktuellen Studie vollumfänglich berücksichtigt sind.

Die Emissionen für den Aufbau einer großen **75 kWh Batterie** mit über 500 km WLTP-Reichweite liegen derzeit bei näherungsweise **7 tCO₂¹⁶**, die für ein in der Reichweite vergleichbares **Wasserstoffsystem bei rund 3,3 tCO₂¹⁷**.

Hinzu kommen die riesigen Aufwendungen für eine Wasserstoff-Infrastruktur, die ebenfalls die CO₂-Bilanz verschlechtern. Diese Überlegungen fehlen in allen dem Autor bekannten Studien. Durch 2nd-Life und Recycling wird der CO₂-Footprint von Batteriesystemen in Zukunft sogar besser werden als der von Brennstoffzellensystemen.

Aus Strom hergestellter Wasserstoff und mehr noch E-Fuels (synthetische Flüssigkraftstoffe aus elektrischer Energie) sind wegen des hohen Energiebedarfs und der aufwändigeren Anlagentechnik weit stärker mit CO₂-Emissionen belastet als der Strom für batterieelektrische Fahrzeuge.

Wichtig: Auch regenerative Stromerzeugung (PV, Wind) verursacht aufgrund der benötigten Anlagentechnik CO₂-Emissionen! Die Gewohnheit, E-Fuels und Wasserstoff aus regenerativem Strom mit Null-Emissionen anzunehmen ist rein politisch bedingt und entspricht keinesfalls der physikalischen Realität oder dem Stand der Wissenschaft. Wenn zukünftig viele Fahrzeuge mit alternativen Antrieben unterwegs sind, wird man diese politische Vereinfachung hoffentlich zugunsten der physikalischen Realitäten korrigieren.

Tatsächlich stammt der heute an H₂-Tankstellen angebotene Wasserstoff sogar überwiegend aus Erdgasdampfreformation. **Ein Wasserstoffauto verursacht damit kaum weniger CO₂-Emissionen als ein herkömmlicher Diesel-Pkw¹⁸.**

Hinsichtlich der CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase liegen batterieelektrische Fahrzeuge weit vorne. **Gerechnet mit dem mittleren deutschen Energiemix aus 2018, also unter Berücksichtigung der Stromproduktion aus Kohlekraftwerken, sparen Elektroautos rund 40% CO₂-Emissionen verglichen mit typischen Diesel-Pkws und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEVs).** Lokale Emissionen hinsichtlich der Luftbelastung in den Städten entfallen vollständig.

Der **CO₂-Rucksack der Batterieproduktion** eines typischen, mittelgroßen BEV (500 km / 75 kWh) gegenüber durchschnittlichen Fahrzeugen mit Dieselmotor ist nach heutigem Stand nach rund der **halben Autolebensdauer** (80 bis 90 tkm) egalisiert¹⁹. Gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen ist der CO₂-Mehraufwand schon nach gut einem Drittel der Lebensdauer (50 bis 60 tkm) egalisiert²⁰. Am Ende der Lebensdauer eines typischen Pkw (160.000 km) hat das BEV gegenüber einem Dieselfahrzeug etwa 6 t_{CO2} eingespart und gegenüber einem Brennstoffzellenfahrzeug immerhin noch 3,8 t_{CO2}.

Diese Abschätzungen basieren auf dem heutigen Emissionsfaktor für elektrischen Strom in Deutschland, also mit rund einem Drittel Kohlestrom. Während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge wird sich dieser Faktor erfahrungsgemäß weiter verbessern. Durch Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, durch 2nd-Life und Recycling kann man die CO₂-Einsparungen wesentlich vergrößern.

Der Emissionsvorteil von BEVs gegenüber FCEVs bleibt übrigens auch bei rein regenerativer Stromerzeugung vollständig erhalten, denn wie oben bereits angemerkt verursachen auch Windenergie- und PV-Anlagen bei ihrer Herstellung und Errichtung CO₂-Emissionen, die auf die Anlagenlebensdauer abgeschrieben werden müssen²¹. Hinzu kommen die Aufwände für die H₂-Infrastruktur, wodurch sich der Vorteil von BEVs weiter vergrößert.

Brennstoffzellen-Pkws (FCEVs)

Energiedichte

Wasserstoff ist ein höchst flüchtiges Gas mit einer geringen volumetrischen Energiedichte. Daher muss man zum Transport und zur Lagerung entweder auf extrem tiefe Temperaturen (-255 °C – fast wie im Weltraum) oder auf extrem hohe Drücke (700 bis 1000 bar – wie am Meeresgrund des Marianen Grabens) ausweichen. Die dazu erforderliche Anlagentechnik ist unvermeidlich aufwändig und somit teuer. Außerdem sind die Wirkungsgrade grundsätzlich schlecht, weil viel Energie zur Erzeugung dieser extremen Bedingungen benötigt wird. Da diese Zusammenhänge physikalisch bedingt sind, ändert sich daran auch in ferner Zukunft und auch mit beliebig hohem Forschungsaufwand gar nichts.

Die in technischen Anlagen erreichbare und **nutzbare volumetrische Energiedichte** von kaltem, flüssigen Wasserstoff, also einschließlich Tanks und Hilfseinrichtungen, ist etwa **halb so groß wie die von konventionellen Flüssigkraftstoffen** (Benzin, Diesel)²².

Infrastruktur

Das bedeutet ganz konkret: Für eine Umstellung des Pkw-Verkehrs auf Wasserstoff müssten wir die gesamte heutige Infrastruktur für Lagerung, Verteilung und Verkauf komplett neu bauen. Und zwar wegen der geringeren Energiedichte nahezu doppelt so groß, also doppelt so viele Tankschiffe, doppelt so große Zwischenlager, doppelt so viele Tank-Lkws und doppelt so viele Bodentanks in den Tankstellen. Außerdem müssen wir alles in Kryotechnik für Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt bauen, wodurch die Kosten noch einmal in etwa verdoppelt. Und dann brauchen wir auch noch die Produktionsanlagen: Für die Erzeugung des Stroms, für die Elektrolyse und für die Verflüssigung.

Eine **gasförmige Verteilung von Wasserstoff im Großmaßstab**, das heißt für hunderttausende oder gar Millionen von Pkws, **ist vollkommen unmöglich**. Die technisch erreichbare volumetrische Energiedichte von gasförmigem Wasserstoff ist nochmals um knapp eine Größenordnung (Faktor 10) niedriger als die von flüssigem Wasserstoff. Dementsprechend würden die Aufwendungen für die Infrastruktur ins Unermessliche steigen.

Bedingt durch die schlechte Wirkungsgradkette²³, ausgehend vom Off-Shore Windpark bis zum Elektromotor im Auto einschließlich flüssiger Verteilung und Hochdruckbetankung, ist der Bedarf an Primärenergie für die Erzeugung von Wasserstoff für Brennstoffzellen in Pkws rund **5- bis 6-fach höher**²⁴ als bei Batteriefahrzeugen.

Es ist leicht abzuschätzen, dass der Strombedarf für den Wasserstoffbetrieb aller 47 Mio. Pkws in Deutschland rund 1,5-fach größer ist als die gesamte heutige Stromproduktion²⁵. Daher müssten wir die derzeitig erzeugte Menge an Strom also **mehr als verdoppeln**. Gleichzeitig wollen wir auch noch alle Kern- und Kohlekraftwerke abschalten und durch regenerative Stromerzeugung ersetzen - wie soll das gehen?

Die Kosten für den Aufbau einer Infrastruktur für die Erzeugung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff sind schier unvorstellbar und betragen alleine für Deutschland über hundert Milliarden Euros. Genaue Zahlen sind unbekannt und nicht seriös anzugeben, da die erforderlichen Einrichtungen noch niemals in einer entsprechenden Größe und Menge gebaut wurden.

Auch eine **lokale Produktion von Wasserstoff** im Großmaßstab für Millionen von Fahrzeugen an Tankstellen ist wegen den schlechten Wirkungsgraden und den damit sehr hohen lokalen Strombedarfen unmöglich. Zwar fiel dann die Verflüssigung weg, wodurch sich der Kettenwirkungsgrad etwas verbessert. Aber der zusätzliche Strombedarf wäre immer noch rund genauso hoch wie die derzeitige Produktionsmenge²⁶ und zusätzlich müsste der Strom nun an tausende lokale Tankstellen verteilt werden. Das bedeutet praktisch eine **Verdoppelung der Stromerzeugung und der Kapazität des gesamten Hoch- und Mittelspannungsnetzes**.

Gasmotoren

Manchmal wird die Idee ins Spiel gebracht, man könnte das aus Elektrolyse an den Windkraftanlagen gewonnene Wasserstoffgas (H_2) zu Methangas (CH_4) weiterverarbeiten. Dieses Methan könnte dann ins Erdgasnetz eingespeist und später in herkömmlichen Pkws mit CNG-Verbrennungsmotoren (CNG = Compressed Natural Gas = Erdgas mit rund 200 bar

Tankdruck) genutzt werden. Erdgas-Pkws gibt es schon millionenfach. Sie sind unter anderem in Südamerika beliebt.

Auf diese Weise würden die Infrastrukturkosten geringer. Die Klimabilanz wäre neutral, denn für das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid wird zuvor bei der Methanisierung Kohlendioxid aus der Luft verbraucht.

Wie zuvor abgeschätzt benötigt man etwa die 1,5-fache heutige Stromproduktion, um genug Wasserstoff für alle Pkws mit Brennstoffzellen zu erzeugen. Würde man aus dem Wasserstoff Methangas herstellen, so entfiel zwar die Verflüssigung des Wasserstoffs für die Verteilung an tausende Tankstellen, aber dafür hat man den aufwändigen Methanisierungsprozess, der bei Temperaturen um 300 bis 700 °C abläuft und ähnliche Wirkungsgrade wie die Wasserstoffverflüssigung aufweist²⁷. Zusätzlich sinkt der Wirkungsgrad im Auto, denn der CNG-Verbrennungsmotor ist etwas ineffizienter als ein Brennstoffzellensystem²⁸. **In Summe steht man damit vor dem genau gleichen, unlösbaren Problem der Erzeugung der benötigten Strommengen.**

Dazu kommt, dass der Methanisierungsprozess große Mengen an Kohlendioxid benötigt²⁹, der Volumenanteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre beträgt aber nur 0,04 %³⁰. Man müsste daher große Mengen an Luft filtern, um genügend CO₂ zu erhalten.

Um das beispielhaft zu konkretisieren: Pro 100 km Fahrtstrecke (typischer Pkw-Verbrauch 4 kg_{CNG}/100km) muss man 140 tsd. Liter Luft filtern, um das benötigte Kohlendioxid zu erhalten. Das entspricht dem Volumen eines 56 m² großen Büros.

Für den gesamten jährlichen Pkw-Verkehr in Deutschland (rund 630 Mrd. Pkw-km) müssten 880 Mrd. Kubikmeter Luft gefiltert werden, vorausgesetzt, die Extraktion des Kohlendioxids gelingt zu 100 %. Das entspricht dem Luftvolumen über der gesamten Fläche der Bundesrepublik Deutschland (360 Mrd. m²) vom Erdboden bis in 2,5 Meter Höhe.

Dafür wird außerdem eine erhebliche Menge an Energie benötigt, etwa in der Größenordnung von 160 Mrd. kWh³¹.

Alleine für die Gewinnung des Kohlendioxids für den Methanisierungsprozess benötigt man also rund ein Drittel der derzeit in Deutschland produzierten Strommenge. Das ist schon wesentlich mehr, als für die gesamte Elektromobilität erforderlich wäre, und dabei ist die Erzeugung des Wasserstoffs noch nicht einmal eingerechnet.

Auch alle sonstigen Ideen zur CO₂-Gewinnung (Abscheidung aus den Abgasen von Kohlekraftwerken usw.) sind nicht im Großmaßstab für eine Flotte von Millionen von Pkws realisierbar.

Und auch die Einsparung der Wasserstoffinfrastruktur bei Umwandlung von H₂ in Methangas ist zu hinterfragen. Eine einfache Überschlagsrechnung zeigt, dass man rund ein Drittel mehr Erdgas als heute benötigen würde, um alle Pkws mit CNG-Verbrennungsmotoren zu betreiben³². Es stellt sich die Frage, was gewonnen ist, wenn das Erdgasnetz um ein Drittel ausgebaut werden muss gegenüber einem Ausbau des Stromnetzes um rund ein Viertel für die Elektromobilität.

CNG-Verbrennungsmotoren erzeugen lokal kaum weniger Abgase als herkömmliche Verbrennungsmotoren mit Dieselkraftstoff. Die Luftverschmutzung und die Feinstaubbelastung der Innenstädte kann man auf diese Weise nicht wesentlich verbessern.

Auch die Mischung von Erdgas mit Wasserstoff (HCNG) wird diskutiert. Der Wasserstoffanteil kann 20 bis 50 %_{vol} betragen. Durch den Wasserstoffanteil werden die Verbrennung verbessert und der Schadstoffausstoß verringert. Entsprechende Tankstellen und Fahrzeuge gibt es bereits in Norwegen und in Kanada.

Problematisch sind die Nutzung von fossilen Kraftstoffen (Erdgas), der weiterhin vorhandene lokale Schadstoffausstoß und die Aufwände bei der Herstellung des Wasserstoffs. Die Kosten für den Ausbau der Infrastruktur kommen ebenfalls hinzu, denn das heutige Erdgasnetz kann – je nach Alter der Anlagen – nur 1 bis 10 %_{vol} Wasserstoffgehalt aufnehmen³³. Eine nachhaltige Lösung für eine zukünftige, große Pkw-Flotte ist HCNG sicher nicht.

Wasserstoff- und batterieelektrische Pkws im direkten Vergleich

Der weltweite Bestand an rein-elektrischen Pkws (BEVs) wird Ende 2019 rund 7 Mio. Stück erreichen. Hinzu kommen noch einmal rund 4 Mio. Plug-In-Hybride (PHEVs)³⁴. Die weltweite Anzahl an Brennstoffzellen-Pkws (FCEVs) liegt rund drei Größenordnungen darunter bei rund 15 Tsd. Fahrzeugen.

Derzeit werden auf dem Weltmarkt gerade einmal zwei Brennstoffzellen-Pkws aus Kleinserienproduktion im freien Verkauf angeboten: Ein großes SUV und eine Limousine der oberen Mittelklasse³⁵. Der Markt an batterieelektrischen Pkws ist hingegen breit gefächert und umfasst weltweit bereits weit über 200 verschiedene Typen aller Fahrzeugklassen.

Fahrzeuggewicht

Es wird allgemein erwartet, dass man zukünftig den Materialaufwand von Batteriesystemen weiter reduzieren und die Herstellungsverfahren weiter vereinfachen kann. Neue Materialien und neue Herstellungsverfahren für Anode, Kathode und, vor allem, beim Elektrolyten ermöglichen immer höhere Energiedichten. Diese Entwicklungen finden schon seit einigen Jahren weitgehend unbemerkt von der Öffentlichkeit in raschem Tempo statt. In Folge hat sich die **Energiedichte von Batteriesystemen in serienproduzierten Pkws in den letzten rund 5 bis 7 Jahren bereits verdoppelt**³⁶.

Die realistische physikalische Grenze der Lithium-Ionen-Batterietechnologie liegt in etwa bei 700 Wh/kg. Die heutigen Serienzellen erreichen 250 Wh/kg, Vorserienzellen bereits über 400 Wh/kg³⁷. Hier gibt es also noch ein großes Potential für zukünftige Entwicklungen. Mit Lithium-Luft Technologie lassen sich theoretisch sogar bis zu 13.000 Wh/kg erreichen, das ist mehr als bei Benzin und Diesel. Allerdings wird diese Technologie vermutlich nie in Serienreife kommen, denn die Zellen sind instabil.

Aus heutiger Sicht scheint eine Energiedichte auf Systemebene, also Zelle plus Gehäuse, Kühlung, Batteriemanagement, Sicherheitstechnik, Stecker und so weiter, von 300 Wh/kg mittelfristig (Zeithorizont 5 Jahre) und 500 Wh/kg langfristig (Zeithorizont > 10 Jahre) erreichbar.

Die Energiedichte des Wasserstoffsystems in einem aktuellen SUV liegt um 400 Wh/kg³⁸. Tendenziell gilt, dass die Leistungsdichte bei kleineren Fahrzeugen mit weniger Tankvolumen

(untere Mittelklasse, Kompaktklasse) schlechter wird und bei größeren Fahrzeugen (Lkws) etwas besser.

Allerdings benötigen BEVs bei vergleichbarer Reichweite nur gut die Hälfte an Energie wie FCEVs, weil zum einen die Energiequelle effizienter ist und zum anderen die Außenabmessungen bezogen auf gleiche Innenraumgröße kleiner sind, was geringere Fahrzeugverluste zur Folge hat³⁹.

Für eine Gewichtsgleichheit müssen Batteriesysteme daher bei gut 200 Wh/kg Energiedichte ankommen. Das ist mit der aktuellen Batteriegeneration schon fast erreicht, denn die besten BEVs haben heute um 170 Wh/kg Systemgewicht⁴⁰.

In wenigen Jahren werden batterieelektrische Pkws mit gleicher Reichweite daher leichter als Brennstoffzellenfahrzeuge sein. Schon heute sind sie nahezu gewichtsgleich.

Laden versus Tanken

Die gemessene, reale Ladegeschwindigkeit **aktueller Elektroautos** an den in Europa am weitesten verbreiteten Schnellladesäulen liegt bei **rund 200 bis 350 km_{WLTP} in 20 Minuten Ladezeit**⁴¹. Die **Reichweite beträgt bis über 600 km_{WLTP}**⁴². Das ist auch für lange Geschäfts- und Urlaubsreisen vollkommen ausreichend.

Das Laden unterscheidet sich dabei deutlich vom klassischen Tanken, bei dem man an der Säule stehen bleibt und wartet. Beim Laden hingegen parkt man das Fahrzeug und hat Zeit zum Essen, Trinken oder zur Entspannung in der Raststätte.

Eine typische Urlaubsfahrt nach Südfrankreich oder Italien besteht dann aus zwei oder höchstens drei Abschnitten mit je rund 350 bis 400 km Fahrtstrecke (je nach Verkehrslage 3 bis 5 Stunden) und insgesamt einer oder höchsten zwei Pausen von je einer halben bis Dreiviertelstunde Dauer.

Im täglichen Alltagsbetrieb mit Fahrtstrecken um 50 bis 100 km sind Elektroautos sowieso unschlagbar praktisch und effizient.

Es wird immer wieder behauptet, man könnte zum Beispiel in der Urlaubszeit an viel befahrenen Autobahnen gar nicht so viele Elektroautos nachladen wie man heute Verbrenner tanken kann, weil das Laden ja nun einmal länger dauert. Aber das stimmt nicht – man muss sich nur von der Vorstellung lösen, dass das Laden genauso wie das Tanken an speziellen Tanksäulen stattfindet.

Zukünftig gibt es keine speziellen Tank-/Ladeplätze mehr, sondern an den Autobahnrasthäusern werden eine große Zahl von ganz „normalen“ Parkplätzen mit Ladesteckern ausgerüstet. **Man benötigt nur rund 7 Parkplätze mit Schnellladesäulen mit rund 150 kW Leistung, um den gleichen Pkw-Durchsatz wie eine konventionelle Benzin- oder Dieseltanksäule zu erreichen**⁴³.

Große Autobahnraststätten mit 10 Tanksäulen werden also zukünftig bis zu 70 Ladeplätze bekommen, kleinere entsprechend weniger. Das ist technisch ohne weiteres machbar und wesentlich preiswerter als vergleichbare Wasserstoff-Tankanlagen. Tatsächlich gibt es heute bereits mehrere Ladestationen mit 50 Schnellladeplätzen in China (Beijing und Shanghai), die von der Firma Tesla Motors betrieben werden. In Norwegen gibt es zwei Stationen mit über 40 Schnellladeplätzen und in UK und den Niederlanden mehrere Stationen mit über 30 Schnellladeplätzen.

Die Ladegeschwindigkeit von FCEVs ist unbestritten schneller als die von BEVs – rund 10 Minuten für einen vollen Tank mit 400 bis 600 km_{WLTP} Reichweite, je nach Fahrzeug. Das bedeutet aber, dass man wie früher neben dem Fahrzeug wartet und keine Zeit für eine Pause hat. Anschließend muss die Tankstelle einen internen Höchstdruckspeicher mit 900 bis 1000 bar nachfüllen, so dass für rund eine halbe Stunde kein weiteres Fahrzeug bedient werden kann (oder nur mit wesentlich langsamerer Füllgeschwindigkeit).

Die Kosten einer Wasserstofftankstelle sind übrigens astronomisch hoch und übertreffen die Kosten einer Schnellladesäule um mehr als eine Größenordnung.

Platzangebot

Aufgrund der voluminösen Tanks und der umfangreichen Systemtechnik werden Wasserstoffautos bisher nur als SUVs oder große Limousinen gebaut. Das Brennstoffzellensystem eines modernen Hyundai Nexa benötigt unter der „Motorhaube“ so viel Platz wie ein 6-Zylinder Dieselmotor und leistet gerade einmal 163 PS. Dazu kommen die Höchstdrucktanks, die den halben Kofferraum blockieren.

Der sowieso schon große Toyota Mirai soll in der nächsten Generation ab 2021 noch einmal länger werden, um einen dritten Tank und damit über 600 km Reichweite zu ermöglichen. Verglichen mit einem äußerlich gleich großen Verbrennerfahrzeug bieten Wasserstoffautos erheblich weniger Platz im Innenraum.

Eine Batterie lässt sich wesentlich besser in die Fahrzeuggeometrie integrieren als die torpedoförmigen Höchstdruckspeicher für Wasserstoff. Durch eine kurze Fronthaube (Cab-Forward-Design) und die tiefliegende Batterie (Skateboard-Design) bleibt sogar mehr Platz für Passagiere und Gepäck als in einem äußerlich gleich großen Verbrennerfahrzeug.

Beim Platzangebot im Innenraum sind batterieelektrische Fahrzeuge allen anderen Antriebsarten weit überlegen. Vereinfacht kann man sagen, dass batterieelektrische Fahrzeuge rund eine Fahrzeugklasse mehr Platz im Inneren bieten als gleich große Verbrenner, Brennstoffzellenfahrzeuge jedoch eine Klasse weniger. Daran wird sich auch in Zukunft wenig ändern, denn Tank- und Anlagengröße sind weitgehend durch die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff bedingt.

Herstellungsaufwand und Preise

Die Herstellung von Brennstoffzellen-Pkws ist gegenüber heutigen Verbrennerfahrzeugen (ICE = Internal Combustion Engine) deutlich aufwändiger. Das resultiert zum einen aus den größeren Fahrzeugabmessungen und zum zweiten aus den vielfältigen Nebenaggregaten, die zum Betrieb eines Brennstoffzellenstacks erforderlich sind.⁴⁴ Daraus ergeben sich nicht nur höhere Anschaffungspreise, sondern auch höhere Wartungs- und Reparaturkosten sowie eine kürzere Lebensdauer.

Hingegen ist der Herstellungsaufwand von BEVs abgesehen von der Batterie rund 30 bis 40% geringer als der von ICEs, weil Elektromotor, Leistungselektronik und das Einganggetriebe viel weniger Komponenten benötigen als ein komplexer Verbrennungsmotor mit einem aufwändigen Automatikgetriebe.

Und die Kosten der Batterie sinken ständig⁴⁵. Das hat dazu geführt, dass Batteriekapazität und Reichweite von neuen Elektroautos in den letzten Jahren immer größer wurden – trotz etwa konstanten Verkaufspreisen. Zukünftig wird sich die Kapazität abhängig von der Fahrzeugklasse bei 300 bis 600 km Reichweite einpendeln und die Preise werden sinken. Es ist realistisch zu erwarten, dass BEVs in spätestens 5 Jahren preisgleich und mittelfristig (10 Jahre) sogar preiswerter angeboten werden als heutige Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotoren.

Dazu wird auch der Preisdruck beitragen, der von den neuen Marktplayern ausgeht, die sich für eine Massenproduktion von elektrischen Autos bereit machen (u.a. aus China, Südkorea und Kalifornien).

Demokratisierung der Energieversorgung

Wasserstoffgas entweicht im Freien aufgrund seiner geringen Dichte mit hoher Geschwindigkeit in die Atmosphäre, z.B. nach einem Unfall eines Brennstoffzellenfahrzeugs, und ist dann ungefährlich. In geschlossenen Räumen oder unter Überdachungen kann es aber schnell zu einer gefährlichen Konzentration kommen, denn Wasserstoffgas ist in einem breiten Mischungsverhältnis mit Luftsauerstoff entzündbar (4 bis 78 %_{vol}). Außerdem wird nur eine sehr geringe Zündenergie benötigt⁴⁶.

In Norwegen kam es im Frühsommer 2019 in der Nähe von Oslo bereits zur Explosion einer kommerziellen Wasserstoff-Tankstelle für Pkws. Wasserstoff eignet sich auch aufgrund der aufwändigen Anlagentechnik und des hohen Primärenergiebedarfs nicht dazu, von Privatleuten hergestellt zu werden – genauso wenig, wie Privatleute heute Rohöl raffinieren oder private Tankstellen betreiben.

Mit Wasserstoff ist die Gesellschaft daher dauerhaft auf die großen Energiekonzerne und ihr umfangreiches Tankstellennetz angewiesen (Quasi-Monopolisierung). Der größte Teil der Wasserstofftankstellen in Deutschland wird durch die *H2 Mobility Deutschland GmbH* betrieben, deren Gesellschafter neben zwei Wasserstoffkonzernen die namhaften Erdölkonzerne sind.

Durch den physikalisch bedingten hohen apparativen Aufwand werden sich die Tankkosten für Wasserstoffautos gegenüber Diesel- und Benzin deutlich erhöhen. Das kann man an den aktuellen Preisen für Wasserstoff (rund 10 € pro 100 km) bereits erahnen, obschon dieser Wert politisch festgelegt ist und die wirklichen Kosten von Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen bei weitem nicht abbildet.

Elektrische Energie und Batteriespeicher ermöglichen hingegen einen fundamentalen Systemwandel. Jeder Privatmensch, der über eine ausreichende Fläche verfügt, kann mittels Photovoltaik und Heimspeicher einen wesentlichen Teil seines Energiebedarfs selbst produzieren. Nicht nur für den häuslichen Bedarf, sondern auch für sein Fahrzeug. Elektrische Heimspeicher boomen und das Thema wird in Zukunft noch erheblich an Fahrt aufnehmen. **Eine typische private PV-Anlage mit Heimspeicher produziert den Strom für 100 km Fahrtstrecke für rund 2,50 €⁴⁷.**

Die Dominanz der großen Energiekonzerne wird zurückgehen. Sie werden weiterhin für Großverbraucher (Industrie, Gewerbe, Handel, hoch verdichtete urbane Siedlungen) und als Backup-Lösungen für den Grundlastbedarf in der dunklen Jahreszeit benötigt. Heute gibt es in Deutschland rund 14.500 Tankstellen. Zukünftig braucht man nur noch Rasthäuser und Ladeparkplätze an Autobahnen in geringerer Zahl, aber viel weniger Tankstellen zum Verkauf von Flüssigkraftstoffen in Städten oder auf dem Land.

Durch diese Entwicklungen wird elektrische Energie langfristig preiswerter werden als heute - trotz Energiewende und dem mittelfristigen Ersatz von Kern- und Kohlekraftwerken durch neue, regenerative Anlagen (PV, Wind).

Zusammengefasst

Bei Wasserstoff entstehen die Kosten vor allem durch die Bereitstellung der **Anlagenleistung**, denn diese bestimmt die Größe des Stacks und aller Nebenaggregate (Filter, Pumpen, Kühlung, Heizung). Die gespeicherte Energiemenge kostet hingegen vergleichsweise wenig – das sind letztlich nur zusätzliche Tanks.

Wasserstoff eignet sich also überall dort, wo viel Energie über einen langen Zeitraum benötigt wird (C-Raten deutlich unter 0,1, also Betriebszeiten weit über 10 Stunden). Das sind zum Beispiel **Schiffe** und **stationäre Energiespeicher**, die über Wochen oder gar Monate autark betrieben werden.

Bei immer weiter zunehmender Nutzung fluktuierender Stromproduktion (Wind, PV) werden Langzeitspeicher benötigt, die auch eine mehrwöchige Flaute in den Wintermonaten überbrücken können. Hier kann Power-to-X mit Wasserstoffgas eine Lösung sein. Man kann das Gas direkt bei den Windparks in großen Tanks zwischenspeichern und nach Bedarf rückverstromen. Dafür benötigt man keine aufwändige Infrastruktur und hat deshalb auch etwas bessere Wirkungsgrade.

Im Gegensatz zu Wasserstoff liegen die Kosten bei Batterien vor allem in der gespeicherten **Energiemenge**, weil der Aufwand linear mit dieser ansteigt. Eine hohe Leistung hingegen bekommt man, ausreichend große Batterien vorausgesetzt, nahezu geschenkt.

Daher eignen sich Batterien überall dort, wo vergleichsweise wenig Energie mit vergleichsweise hohem Leistungsbedarf benötigt wird (C-Raten über 0,1, also Betriebszeiten unter 10 Stunden). Das trifft für viele mobile Anwendungen zu (Zweiräder, Autos, Stadtbusse, leichtere und mittelschwere Nutzfahrzeuge), aber auch für Energiespeicher im Stromnetz im Bereich der Minuten- und Stundenreserve (siehe z.B. die *Hornsedale Power Reserve* in Australien).

Besonders bei Massenanwendungen muss man außerdem die **Kosten der Infrastruktur** beachten. Die Infrastrukturkosten von Wasserstoff sind wesentlich höher (typisch um mehr als eine Größenordnung) als die für die elektrische Versorgung von Batteriespeichern. Das liegt zum einen an den sehr schlechten Kettenwirkungsgraden und dem daher hohen Erzeugungsaufwand und zum anderen an den extremen Lagerbedingungen (tiefste Temperaturen,

höchste Drücke). Daher eignet sich Wasserstoff grundsätzlich nur in solchen Anwendungen, bei denen relativ wenige Ladepunkte benötigt werden.

Für Massenanwendungen mit hohem Energiebedarf, die nicht mit Batteriespeichern abgedeckt werden können, wie zum Beispiel straßen- oder schienengebundener Schwerlastverkehr, gibt es heute noch keine klare Sicht auf eine zukunftsfähige Lösung. An dieser Stelle ist Technologieoffenheit tatsächlich wichtig.

Manchmal hört man den Vorschlag, zwei **Infrastrukturen für BEVs und FCEVs parallel** aufzubauen. Elektroautos wären dann eher für den Nahverkehr mit kürzeren Reichweiten und Brennstoffzellen-Pkws eher für die Langstrecke präferiert. Ich halte diese Idee für völligen Blödsinn, denn es liefe darauf hinaus, dass man viel mehr Autos als heute benötigt. Praktisch bräuchte dann jede Familie mindestens zwei Fahrzeuge. Außerdem müsste man beide Infrastrukturen parallel und nahezu vollständig aufbauen, weil es sicher eine Vielzahl von FCEVs im Nahverkehr gäbe und auch eine Vielzahl von BEVs im Fernverkehr.

Technologieoffenheit ist zweifelsohne richtig und wichtig, solange man die in Frage kommenden Technologien und ihre Möglichkeiten nicht ausreichend erforscht hat. Der erste Brennstoffzellen-Pkw fuhr in den USA aber bereits 1966 über die Straßen und in den vergangenen 50 Jahren sind alleine in Europa mehrere Milliarden Euros an Fördergeldern in die Brennstoffzellenforschung geflossen.

Der Stichtag für Technologieoffenheit liegt im Bereich der zukünftigen Energieversorgung von Pkws daher schon viele Jahre zurück. Die derzeit in Deutschland diskutierte „Technologieoffenheit“ ist nach Überzeugung des Verfassers lediglich ein Vehikel, um Verwirrung zu stiften und damit den Kunden zu dem zu drängen, was er seit Jahrzehnten kennt - den Verbrennungsmotor. Technologieoffenheit steht in diesem Zusammenhang für Rückschritt und das Festhalten am Status-Quo.

Um es einmal ganz deutlich zu sagen: Brennstoffzellen-Pkws sind technisch, ökonomisch und letztlich auch ökologisch ein Unsinn. Ebenso unsinnig ist der Aufbau einer Pkw-Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff. Das alles dient einzig den kommerziellen Interessen einiger großer Wasserstoff- und Erdölkonzerne und ist eine Verschwendung von Steuergeldern.

Ich gebe dem Thema Wasserstoff für die Zukunft von Pkws keinerlei Chancen gegenüber Batteriespeichern. Wir täten gut daran, nicht auf eine veraltete und aus grundsätzlichen physikalisch/chemischen Gründen unterlegene Technik zu setzen, denn das bringt den Industriestandort Deutschland in Gefahr.

Batterieelektrische Pkws sind der einzig gangbare Weg in eine abgasfreie und CO₂-emissionsarme Zukunft der individuellen Mobilität.

Es ist falsch zu fragen, ob wir durch Elektroautos Arbeitsplätze verlieren, die heute im Umfeld der Verbrennungsmotoren angesiedelt sind. Es ist vielmehr wichtig zu fragen, wie viele Arbeitsplätze verloren gehen, wenn die deutsche Automobilindustrie mit veralteter oder nicht wettbewerbsfähiger Technik weltweit erhebliche Marktanteile einbüßt.

In anderen Ländern, deren Stromproduktion weniger als bei uns von Kohlekraftwerken abhängig ist, zum Beispiel in der Schweiz, Österreich, Norwegen oder Frankreich, haben die Diskussionen über Strompreise und CO₂-Emissionen für die Zukunftstechnologie von Pkws weit geringere Relevanz. Dort sind die Marktanteile von Elektroautos bereits deutlich höher als hierzulande.

Wo stehen Firmen wie Nokia und Kodak heute? Neue Player aus Fernost drängen mit modernen batterieelektrischen Fahrzeugen auf den Markt, die für Kunden höchst attraktiv sind: Ein viel besseres Fahrerlebnis ohne Gestank mit weniger Vibrationen, weniger Lärm, mehr Platz im Innen- und Kofferraum, geringe Unterhaltskosten und in Zukunft sogar günstigeren Anschaffungskosten. Da müssen wir in Deutschland ganz vorne dabei sein und dürfen nicht an überholter (Verbrennungsmotoren) oder ungeeigneter (Wasserstoff) Technik festhalten.

Zudem entstehen viele neue Arbeitsplätze, denn schließlich müssen das Stromnetz ausgebaut, PV- und Windkraftanlagen sowie Ladesäulen gebaut und installiert werden. Dazu kommen neue Dienstleistungen, beispielsweise im Bereich des Batterierecyclings.

Natürlich benötigt so ein Übergang Zeit und Kraft. Manche Automobilkonzerne haben die Zeichen der Zeit jedoch erkannt und sich mit voller Kraft auf den Weg gemacht. Viele andere bisher nur halbherzig oder noch gar nicht.

Karlsruhe, im Oktober 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Martin Doppelbauer**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Elektrotechnisches Institut (ETI)

Engelbert-Arnold-Straße 5, 76131 Karlsruhe

Martin.Doppelbauer@kit.edu, <http://www.eti.kit.edu>



Martin Doppelbauer studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Dortmund und promovierte ebendort 1995 mit einer Arbeit über die analytische Berechnung von Elektromotoren. Er war von 1995 bis 2010 in verschiedenen Positionen in der elektrotechnischen Industrie in Baden-Württemberg tätig, zuletzt viele Jahre als Leiter der Entwicklung Elektromotoren der SEW Eurodrive GmbH & Co KG in Bruchsal. Seit Anfang 2011 hat Herr Doppelbauer die Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles HEV) am Elektrotechnischen Institut (ETI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) inne.

Das Elektrotechnische Institut forscht mit rund 70 Mitarbeitern an Themen der elektrischen Antriebs- und Energietechnik, von der Leistungselektronik über Regelungstechnik und Elektromotoren bis hin zu Anwendungen von Batteriespeichern und Brennstoffzellen in diesen Bereichen. Das Elektrotechnische Institut arbeitet an einer Vielzahl von Projekten mit Drittmittelfördergebern, sowohl aus öffentlicher Hand (u.a. Landesministerien Baden-Württemberg, BMWi, BMBF, DFG) als auch aus industriellen Quellen (u.a. viele namhafte in Deutschland tätige Tier 1 Supplier und Automobilhersteller).

Herr Doppelbauer ist außerdem seit vielen Jahren im Bereich der internationalen Normung tätig und unter anderem der Vorsitzende des Technischen Komitees 2 (TC2 *Rotating Electric Machinery*) bei der *International Electrotechnical Commission* (IEC) in Genf.

¹ Mittlerer Pkw-Verbrauch 20 kWh/100km. Bei 631 Mrd. Pkw-km pro Jahr laut KBA (Stand 2018) und einem Ladewirkungsgrad von 90 % ergibt sich ein **Nettostrombedarf von 140 Mrd. kWh pro Jahr**. Die Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018 betrug 541,9 Mrd. kWh netto, wovon 40% aus erneuerbaren Energien stammten (<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2018/nettostromerzeugung-2018.html>).

² <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-bringt-die-wallbox-fuer-alle-auf-den-markt-5352>

³ <https://www.welt.de/wirtschaft/gruenderszene/article187533020/Ubitricity-Dieses-Start-up-macht-aus-Laternen-Ladestationen-fuer-E-Autos.html>

⁴ <https://ionity.evapi.de/#/>

⁵ <https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/statistik/>

⁶ Konservativ abgeschätzt können pro geparktem, an einer einfachen Haushaltssteckdose angeschlossenem Elektroauto 2 kW Leistung und 10 kWh Energie für die Regelung bereitgestellt werden, ohne die lokalen Netze zu sehr zu belasten und ohne die Batterie (heute typisch 30 bis 100 kWh Kapazität pro Pkw) zu schädigen. Bei 4 Mio. Fahrzeugen sind das ca. 8 GW Regelleistung und rund 40 GWh Regelenergie. Zum Vergleich: In Deutschland stehen rund 6,7 GW Leistung aus Pumpspeicherkraftwerken mit einer Gesamtenergie von 37,7 GWh zur Verfügung.

⁷ <https://ecomento.de/2018/07/24/643-738-kilometer-in-teslas-elektroauto-limousine-model-s/>

⁸ <https://edison.handelsblatt.com/erklaren/wohin-mit-den-alten-akkus/24674526.html>

⁹ Der Straßenverkehr trägt mit rund 57% an den gesamten Feinstaubemissionen der Partikelgröße PM₁₀ bei. Der Rest entsteht durch Kleinf Feuerungsanlagen (16%), Industrieanlagen (12%), Landwirtschaft (12%) und andere, kleine Anteile. <https://www.stmu.v.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/feinstaub/emissionenpm10.htm> Betrachtet man nur die direkten PM₁₀-Emissionen der Straßenfahrzeuge, ohne Aufwirbelungen und sonstigen Verkehr sind das 24% der gesamten PM₁₀-Emissionen, dann entsteht dieser Feinstaub zu 22% aus Pkw-Dieselmotoren und zu 12% aus Pkw-Ottomotoren. Der Rest sind 39% Nutz- und sonstige Fahrzeuge mit Diesel- und Ottomotoren sowie 19% Reifenabrieb und 8% Bremsenabrieb.

¹⁰ Bekannte Lithium Reserven + Ressourcen (Stand 2018) ca. 70 Mrd. kg. Lithium Bedarf in der Batterie ca. 0,17 kg/kWh. Somit können **ca. 5,5 Mrd. Batterien mit je 75 kWh Kapazität** gebaut werden. Weltweit gibt es rund 1,2 Mrd. Pkws.

¹¹ <https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-kobalt-vetter.pdf>

¹² <https://edison.handelsblatt.com/erklaren/lithium-aus-lateinamerika-umweltfreundlicher-als-gedacht/24022826.html>

¹³ <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/3/57>

¹⁴ Lithium Abbau in 2018: Chile 14,1 tsd. Tonnen, Australien 18,7 tsd. Tonnen, weltweit 37,8 tsd. Tonnen

¹⁵ Quelle: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/erdoel_gefahr_fuer_die_umwelt_0.pdf
Quelle: <https://www.dieumweltdruckerei.de/blog/erdoelfoerderung/>

¹⁶ Die spezifischen Emissionsfaktoren für der Herstellung von Batterien gehen in der Literatur weit auseinander, von rund 50 bis 200 kg_{CO₂-eq}/kWh. Gründe dafür sind, dass die für die Herstellung benötigte Energie aus ganz unterschiedlichen Quellen stammen kann – von PV-Anlagen bis zu Kohlekraftwerken. Auch die Energiedichte der betrachteten Zellen und damit das Alter der Studie spielt eine wesentliche Rolle. Auf Basis der aktuellen 250 Wh/kg Zellen und Versorgung der Produktion weitgehend mit PV-Energie scheint ein Emissionsfaktor von 95 kg_{CO₂-eq}/kWh sinnvoll zu sein.

¹⁷ Emissionsfaktoren für die Herstellung von Brennstoffzellen-Pkws finden sich in der Literatur kaum. Es ist bekannt, dass 20 Tonnen CO₂ für die Herstellung von 1 Tonne Kohlefaser emittiert werden. Bei einem gesamten Tankgewicht von 87,5 kg (Toyota Mirai) entspricht dies einer Emission von **1,8 tCO₂ für die Tanks**. Hinzu kommen die Aufwände für das Brennstoffzellensystem. Dieses wiegt in einem Daimler F-Cell rund 310 kg (ohne Tanks). Rechnet man mit einem üblichen Faktor von 6 tCO₂ für die Herstellung von 1,2 t Fahrzeug, so kann man rund **1,5 tCO₂ für die Herstellung des Brennstoffzellensystems** abschätzen.

¹⁸ **FCEV:** Bei typisch 370 gCO₂/kWh_{H₂} Emissionen aus Erdgasdampfpreformation, einem mittleren Verbrauch von 1,1 kg_{H₂}/100km = 36,6 kWh_{H₂}/100km und Kompressionsverlusten von 12% ergibt sich für FCEV ein Ausstoß von **16,9 kg_{CO₂}/100km**.

Diesel-Pkw: Dieselverbrennung verursacht Emissionen von 2,65 kgCO₂/l. In 2017 betrug der Durchschnittsverbrauch eines Diesel-Pkw 7,0l/100km. Damit werden durchschnittlich **18,6 kg_{CO2}/100km** emittiert. Ein typisches FCEV spart gegenüber einem durchschnittlichen Diesel-Pkw also lediglich **9%** Emissionen ein.

BEV: Mittlerer Verbrauch 20 kWh/100km, Ladewirkungsgrad 90% = 22,2 kWh/100km. Der spezifische CO₂-Emissionsfaktor des gesamten deutschen Strommixes in 2018 betrug 0,474 kgCO₂/kWh. Damit ergeben sich typische Emissionen in Höhe von **10,5 kg_{CO2}/100km**. Ein typisches BEV spart gegenüber einem durchschnittlichen **Diesel-Pkw** also rund **44%** und gegenüber einem typischen **FCEV** rund **38%** Emissionen ein.

¹⁹ CO₂-Rucksack der Batterieproduktion ca. 7 t_{CO2}, siehe Fußnote 16. Emissionsvorteil BEV gegenüber Diesel ca. 18,6 – 10,5 = 8,1 kg_{CO2}/100km, siehe Fußnote 18. Nach 7.000/8,1·100 = 86.400 km sind die CO₂-Emissionen rechnerisch egalisiert. Über die Lebensdauer ergeben sich somit 160.000/100·8,1-7.000 = 6 t_{CO2} Einsparung.

²⁰ Zusätzlicher CO₂-Rucksack eines FCEV ca. 3,3 t_{CO2}, siehe Fußnote 17, also 3,7 t_{CO2} weniger als BEV. Emissionsvorteil BEV gegenüber FCEV ca. 16,8 – 10,5 = 6,4 kg_{CO2}/100km, siehe Fußnote 18. Nach 3.700/6,4·100 = 57.800 km sind die CO₂-Emissionen rechnerisch egalisiert. Über die Lebensdauer ergeben sich somit 160.000/100·6,4-6.400 = 3,8 t_{CO2} Einsparung.

²¹ Literaturangaben zum CO₂-Emissionsfaktor von Windkraftanlagen schwanken zwischen rund 10 bis 40 g_{CO2}/kWh_{el}. Rechnet man mit dem Mittelwert 25 und optimalen Wirkungsgraden für Druckbetankung, Verflüssigung und Abdampfverluste sowie Elektrolyse (siehe Fußnote 23), dann verursacht ein durchschnittliches **FCEV mit Wasserstoff aus Windstrom mindestens 3,1 kg_{CO2}/100km**, ein **BEV jedoch nur 0,6 kg_{CO2}/100km** bei gleichen Rahmenbedingungen.

Der CO₂-Emissionsfaktor von PV-Anlagen wird in der Literatur zwischen 50 bis 100 g_{CO2}/kWh_{el} angegeben. Auch hier bleibt der Emissionsvorteil von BEV um rund den Faktor 5 gegenüber FCEV erhalten.

²² Während beispielsweise ein 40 t Sattelschlepper genügend Dieselkraftstoff zum Tanken von 1.000 Pkws mit je 500 km Reichweite transportieren kann, reicht ein gleich großer Lkw mit 200 bar H₂-Hochdruck-Gastanks gerade einmal für 63 Tankvorgänge von Brennstoffzellenautos:

Benzin: 35 tsd. Liter Transportkapazität pro Lkw. Bei 7 l/100km reicht das für **1.000 ICE-Pkws**

Flüssigwasserstoff LH2: 3,2 t_{H2} Transportkapazität pro Lkw. Bei 1,1 kg_{H2}/100 km reicht das für **580 FCEVs**

Gaswasserstoff CH2: 0,35 t_{H2} Transportkapazität pro Lkw. Bei 1,1 kg_{H2}/100 km reicht das für **63 FCEVs**

²³ **Wasserstoffkette:** Elektrolyse am Windpark ca. 49 bis 56% Wirkungsgrad; Verflüssigung ca. 60 bis 64% Wirkungsgrad; Transport und Lagerung des flüssigen Wasserstoffs erzeugt 5 bis 10% Abdampfverluste; Hochdruckkompression auf 900 bar für den Ladevorgang auf 700 bar ca. 85 bis 88% Wirkungsgrad; Stromerzeugung mittels Brennstoffzellensystem ca. 45 bis 58% Wirkungsgrad je nach Betriebspunkt, Spannungsstabilisierung mittels DC/DC-Steller ca. 95% Wirkungsgrad – Kettenwirkungsgrad vom Windrad bis zum E-Motor im Auto **ca. 10 bis 17%**.

Batteriestromkette: Netzleitungsverluste je nach Distanz und Spannungsebene ca. 90 bis 95% Wirkungsgrad, Ladeverluste durch Ladeelektronik und Batterie ca. 85 bis 90% Wirkungsgrad – Kettenwirkungsgrad vom Windrad bis zum E-Motor im Auto **ca. 77 bis 86%**.

²⁴ Immer wieder findet man in der Literatur den **Faktor 3** anstatt **5 bis 6**. Dabei werden regelmäßig die Verflüssigung des Wasserstoffes und die Abdampfverluste bei Transport und Lagerung vergessen. Auch werden bei der Hochdruckkompression gerne nur die thermodynamischen Verluste von 8% angesetzt. Allerdings muss der Druck mit einem Pumpsystem erzeugt werden, das wie alle Pumpen einen schlechten Wirkungsgrad von 50 bis 66% aufweist, so dass die Hochdruckkompression tatsächlich auf 12 bis 15% Verluste kommt. Gerne wird auch der DC/DC-Wandler im Fahrzeug zur Spannungsstabilisierung vergessen. Ebenfalls beliebt ist es, bei der Elektrolyse nur den Wirkungsgrad der eigentlichen Brennstoffzelle (rund 65%) anzusetzen und die Verluste in den sonstigen Anlagenteilen (Filter, Pumpen, Kompressoren, Klimaanlage) zu vergessen. Tatsächlich arbeiten experimentelle Elektrolyseure heute jedoch bei maximal 56% im Teillastbereich. Hochleistungselektrolyseure für Massenproduktion erreichen nicht einmal 50% unter Vollast.

²⁵ Mittlerer Pkw-Verbrauch 1,1 kg_{H2}/100km = 36,6 kWh_{H2}/100km. Bei 631 Mrd. Pkw-km pro Jahr laut KBA (Stand 2018) sind das 231 Mrd. kWh_{H2}. Je nach Kettenwirkungsgrad (siehe Fußnote 23) ergibt sich ein Nettostrombedarf von 760 bis 1.000 Mrd. kWh pro Jahr. Die Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018 betrug 541,9 Mrd. kWh netto, wovon 40 % aus erneuerbaren Energien stammten (<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2018/nettostromerzeugung-2018.html>).

²⁶ Der Kettenwirkungsgrad steigt bei Entfall von Verflüssigung und Abdampfverlusten auf 18 bis 27%, siehe Fußnote 23. Der Nettostrombedarf sinkt dadurch auf rund 860 Mrd. kWh, siehe Fußnote 25.

²⁷ Der thermodynamische Wirkungsgrad aufgrund der exothermen Reaktion (Methan hat einen 14% geringeren Brennwert als Wasserstoff) beträgt ca. 86%. Die Reaktionswärme muss gezielt abgeführt werden, weil eine zu stark ansteigende Temperatur die Umsetzung unvollständig machen würde und ist dann meist nicht mehr nutzbar. Der praktisch erreichbare

Wirkungsgrad aufgrund der Kühlung und sonstiger Anlagenverluste ist also niedriger.

²⁸ Typischer Verbrauch eines Pkws mit CNG-Verbrennungsmotor um $4 \text{ kg}_{\text{CNG}}/100\text{km} = 50 \text{ kWh}/100\text{km}$. Das ist rund 25% ineffizienter als ein Brennstoffzellensystem mit typisch $1,1 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100\text{km}$ und 12% Verlust durch 700 bar Druckerzeugung = $41 \text{ kWh}/100\text{km}$

²⁹ $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$: **CO_2 (44 g/mol) + 4x H_2 (4x 2g/mol) = CH_4 (16 g/mol) + 2x H_2O (2x 18g/mol)**. Also werden 44 g CO_2 pro 16 g CH_4 benötigt. Bei 4 kg CH_4 -Verbrauch auf 100 km sind das 11 kg CO_2 , also 250 mol. 1 mol Gas hat ca. 22,4 Liter Volumen. Also sind 11 kg $\text{CO}_2 = 250 \text{ mol } \text{CO}_2 = 5.600 \text{ Liter } \text{CO}_2$. Der Volumenanteil von CO_2 in Luft beträgt rund 0,04 %. Also benötigt man 140 tsd. Liter Luft für die Methanisierung von Wasserstoff für 100 km Fahrtstrecke eines durchschnittlichen Pkws. Das setzt allerdings voraus, dass man das gesamte Kohlendioxid zu 100% aus der Luft herausfiltern kann, was praktisch nicht möglich ist. Außerdem ist der Energiebedarf für diese Filterung zu berücksichtigen.

³⁰ Der Volumenanteil von 0,04 % CO_2 in der Atmosphäre (Gewichtsanteil 0,06%) erscheint gering und man könnte sich fragen, wie so wenig Stoffmenge einen so großen Effekt auf das Klima haben kann. Tatsächlich reagiert die Natur empfindlich schon auf kleinste Mengen an Zusatzstoffen in der Luft.

Der Mensch kann beispielsweise Schwefelwasserstoff ab einer Konzentration von 0,025 bis 8 ppm riechen, das sind 0,0008 % oder weniger. Das Giftgas Sarin ist bei einer Konzentration von 100 mg pro Kubikmeter Luft, das sind 0,008 %, bereits mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit tödlich.

Für (bzw. gegen) Klimaskeptiker empfehle ich folgende Webseite: <https://skepticalscience.com/argument.php>

³¹ Pro Kubikmeter CO_2 -Gewinnung aus Luft benötigt man um 4 bis 5 kWh Strom oder alternativ 1 bis 2 kWh Strom plus 4 bis 5 kWh Abwärme aus anderen Prozessen <https://www.sonnenseite.com/de/energie/co2-fuer-regenerative-kraftstoffe-effizienter-aus-der-luft-gewinnen.html>

³² Der gesamte Gasverbrauch in Deutschland beträgt etwa 100 Mrd. Kubikmeter pro Jahr. Überwiegend wird H-Gas (0,7 kg/m³) eingesetzt, in einigen Versorgungsgebieten derzeit noch L-Gas (0,84 kg/m³). Rechnet man im Mittel mit 0,75 kg/m³, dann ergeben sich 75 Mrd. kg Erdgasverbrauch pro Jahr.

Ein typischer CNG-Pkw verbraucht $4 \text{ kg}/100\text{km}$. Bei einer gesamten Fahrleistung von 630 Mrd. Pkw-km pro Jahr sind das 25 Mrd. kg Erdgas, also rund ein Drittel des heutigen Gesamtverbrauchs.

³³ <https://www.bundestag.de/resource/blob/646488/a89bbd41acf3b90f8a5fbfbc8616df4/WD-8-066-19-pdf-data.pdf>

³⁴ <https://www.iea.org/gevo2019/>

³⁵ Hyundai Nexa und Toyota Mirai. Alle anderen Fahrzeuge (Honda, BMW, Daimler, GM) sind experimentell und werden nicht frei an Kunden verkauft.

³⁶ Beispiel: **Renault Zoe** in 2013 ca. **80-90 Wh/kg**, **Tesla Model 3** in 2018 ca. **170 Wh/kg** - jeweils Systemgewicht incl. Gehäuse, Kühlung, BMS, Sicherheitstechnik usw.

³⁷ <https://www.elektroauto-news.net/2019/festkoerperbatterie-terawatt-technology-erreicht-432-wh-kg/>

³⁸ Daimler GLC F-Cell (2019): 355 kg Gewicht für das H₂-System mit 4,3 kg_{H₂}-Tank (143 kWh) = 403 Wh/kg

³⁹ **Tesla Model 3 LR RWD:** 310 Miles EPA Reichweite, 1730 kg Leergewicht, 450 kg Zuladung, 425 l Kofferraum

Toyota Mirai: 312 Miles EPA Reichweite, 1850 kg Leergewicht, 330 kg Zuladung, 361 l Kofferraum

Beide Fahrzeuge sind vergleichbar groß. Beim Tesla lässt sich zudem die Rückbank umklappen und der Kofferraum entsprechend vergrößern, beim Toyota befindet sich dort einer der beiden H₂-Tanks.

⁴⁰ **Daimler GLC F-Cell (2019)** 403 Wh/kg = **83 kg Gewicht für das H₂-System** pro 100 km NEFZ Reichweite

Tesla Model 3 (2017) 170 Wh/kg = **86 kg Gewicht für das Batteriesystem** pro 100 km WLTP Reichweite

⁴¹ Geladene Energiemenge an IONITY-Ladesäulen nach 20 Minuten Ladezeit (auf Basis von realen Messwerten, Ladestart bei 10% SOC): Jaguar i-Pace = 150 km_{WLTP}, Mercedes EQC = 180 km_{WLTP}, Audi e-tron = 210 km_{WLTP}, Tesla Model 3 = 350 km_{WLTP}, Porsche Taycan = 360 km_{WLTP}

⁴² Tesla Model 3 und Model S

⁴³ Zukünftig wird die Ladegeschwindigkeit bei Langstreckenautos rund 250 bis 350 km pro 20 Minuten betragen, siehe auch Fußnote 41. Bei typisch 500 km Nachladung sind das im Mittel 40 Minuten pro Fahrzeug einschließlich Rangierzeit. An einer

konventionellen Tankstelle können pro Stunde höchstens 10 Fahrzeuge betankt werden (einschließlich Bezahlvorgang). Das entspricht dem Durchsatz von knapp 7 elektrischen Ladesäulen.

⁴⁴ Unter anderem diverse Rohrleitungen, Druckregelventile, Pumpen und Verdichter, Filter, vielfältige Sensoren für Temperaturen und Wasserstoffgas, Gas-Gas-Befeuchter, Luftkühler und nicht zuletzt die vom sonstigen Fahrzeug unabhängige Klimatisierung des Stacks mit permanenter Reinigung durch Ionenaustauscher.

⁴⁵ EK-Preis pro kWh Pouchzelle: 2010 über 600 €, 2018 ca. 150 €, Prognose: 2020 unter 90 €, 2025 zwischen 50 bis 70€
Quelle: <https://www.elektroauto-news.net/2019/elektroautos-guenstigere-batterien-dennoch-teurer-als-verbrenner/>

⁴⁶ https://www.fwvw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf

⁴⁷ Unter Annahme von typischen Werten für ein Einfamilienhaus, das heißt 9,5 kWp Photovoltaik und 10 kWh Heimspeicher bei 55% Autarkie, also 45% Strom aus Netzbezug, sowie Abschreibung auf 20 Jahre.