

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 ist. 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 und batterieelektrische Fahrzeuge sind wesentlich umweltfreundlicher als Pkws, die fossile Rohstoffe verbrennen – selbst mit dem aktuellen deutschen Strommix, der immer noch rund ein Drittel Kohlestrom enthält. 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.

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 im Jahr 2003.

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 nur **rund 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 existiert bereits weitgehend und die Ladefrastruktur für Pkws kann sukzessive weiter ausgebaut werden. 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.

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 aktiv³. Hinzu kommen weitere, meist regionale Anbieter wie zum Beispiel Fastned.

Das Stromtankstellenverzeichnis GoingElectric⁴ listet europaweit bereits 400 allgemein zugängliche Standorte von Schnellladesäulen über 100 kW Leistung mit insgesamt rund 1600 Anschlüssen auf – Tendenz stark steigend.

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. Außerdem 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 sind⁵.

Recycling und 2nd-Life

Groß im Kommen sind die Themen Recycling und 2nd-Life von Akkus. 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 mehr als die Hälfte des Lithiums für neue Zellen aus Sekundärmaterial erhalten.

Übrigens: 2nd-Life und Recycling sind bei Wasserstoff-Anlagen kaum 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 spontanen Explosionen 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 Explosionen 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 spontan 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.

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) aus⁶.

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 daher 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 Kobaltanteil 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, international tätigen Unternehmen abgebaut, die sich in der Regel an die weltweit gültigen Vorschriften halten⁷. 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.

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

Brennstoffzellen enthalten übrigens Platin als Katalysator, das aus Umweltsicht ähnlich kritisch wie Kobalt zu bewerten ist. Es wird aus Kostengründen bei neueren Stacks sogar zunehmend durch Kobalt ersetzt.

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 Dieselkraftstoff 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 Handelsblattes⁸.

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 kann⁹. Der Lithiumabbau hat "einen vergleichsweise kleinen Umwelteffekt, auch verglichen mit dem Abbau von Platin und Seltenen Erden."

Die größten Lithium-Abbaugelände befinden sich übrigens gar nicht in Chile, sondern wieder in Australien¹⁰. 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 Jahre¹¹. Das alles können wir durch Elektromobilität beenden.

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

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 tCO₂**¹², die für ein in der Reichweite vergleichbares **Wasserstoffsystem bei rund 3,3 tCO₂**¹³.

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.

Die Herstellung von Wasserstoff und mehr noch die von E-Fuels (synthetische Flüssigkraftstoffe aus elektrischer Energie) ist 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 Erdgasdampfpreformation. **Ein Wasserstoffauto verursacht damit kaum weniger CO₂-Emissionen als ein herkömmlicher Diesel-Pkw¹⁴.**

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** aus 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) egalisiert¹⁵. Gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen ist der CO₂-Mehraufwand schon nach gut einem Drittel der Lebensdauer (50 bis 60 tkm) egalisiert¹⁶. 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.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass das Raffinieren von Rohöl in Benzin und Diesel große **Energiemengen für den Cracking-Prozess** benötigt. Belastbare Zahlen sind kaum vorhanden, aber das US-Department of Energy nannte bei einer Anfrage 2009 rund 1,6 kWh Strombedarf für die Herstellung eines Liters Kraftstoff¹⁷. Auf 100 km Fahrstrecke entspricht das für einen durchschnittlichen Diesel-Pkw mit 7,0 l Verbrauch mehr als 11 kWh. Berücksichtigt man diesen Stromverbrauch im CO₂-Vergleich, dann hat ein **mittelgroßes Elektroauto mit 500 km / 75 kWh Batterie seinen CO₂-Rucksack bereits nach einem Viertel (37 tsd. km) der durchschnittlichen Nutzungsdauer (160 tsd. km) egalisiert und spart insgesamt rund 31 t_{CO₂} ein.**

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 müssen¹⁸. 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)¹⁹.

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 Wirkungsgradkette²⁰, 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**²¹ als bei Batteriefahrzeugen.

Es ist leicht abzuschätzen, dass der Strombedarf für den Wasserstoffbetrieb aller 47 Mio. Pkws in Deutschland weit mehr als doppelt so groß wäre wie die gesamte heutige Stromproduktion²². Daher müssten wir die derzeitig erzeugte Menge an Strom also **verdreifachen**. 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 fiele dann die Verflüssigung weg, wodurch sich der Kettenwirkungsgrad etwas verbessert. Aber der zusätzliche Strombedarf wäre immer noch 1,5-fach höher als die derzeitige Produktionsmenge²³ und zusätzlich müsste der Strom nun an tausende lokale Tankstellen verteilt werden. Das bedeutet praktisch einen Neubau des gesamten Hoch- und Mittelspannungsnetzes.

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)²⁴. Die weltweite Anzahl an Brennstoffzellen-Pkws (FCEVs) liegt rund drei Größenordnungen darunter bei etwa 15 Tsd. Fahrzeugen.

Derzeit werden auf dem Weltmarkt gerade einmal zwei Brennstoffzellen-Pkws aus Kleinserienproduktion angeboten: Ein großes SUV und eine Limousine der oberen Mittelklasse²⁵. 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 5-7 Jahren bereits verdoppelt²⁶.

Die realistische physikalische Grenze der Lithium-Ionen-Batterietechnologie liegt in etwa bei 700 Wh/kg. Die heutigen Serienzellen erreichen 250 Wh/kg, Vorserienzellen sogar über 400 Wh/kg. 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/kg²⁷. 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 hat²⁸.

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 Systemgewicht²⁹.

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

Ladegeschwindigkeit

Die gemessene, reale Ladegeschwindigkeit aktueller Batterie-Pkws an den in Europa am weitesten verbreiteten Schnellladesäulen liegt bei rund 200 bis 350 km_{WLTP} in 20 Minuten Ladezeit³⁰. Die Reichweite beträgt bis zu 560 km_{WLTP}³¹. 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 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 höchstens 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.

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 anschließend 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).

Platzangebot

Aufgrund der voluminösen Tanks und der umfangreichen Systemtechnik werden Wasserstoffautos ausschließlich als SUVs oder große Limousinen gebaut. Das Brennstoffzellensystem eines modernen Hyundai Nexu 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 Hochdruckspeicher 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) deutlich aufwändiger. Das resultiert zum einen aus den größeren Fahrzeugabmessungen und zum zweiten aus den vielfältigen Nebenaggregaten, die zum Betrieb eines Brennstoffzellenstacks erforderlich sind.³² 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 Eingangsgetriebe viel weniger Komponenten benötigen als ein komplexer Verbrennungsmotor mit einem aufwändigen Automatikgetriebe.

Und die Kosten der Batterie sinken ständig³³. 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

Wasserstoff ist grundsätzlich gefährlich (relativ leicht entzündlich in einem weiten Mischungsbereich mit Luftsauerstoff). In Norwegen ist es im Frühsommer 2019 in der Nähe von Oslo bereits zur Explosion einer kommerziellen Wasserstoff-Tankstelle für Pkws gekommen. Wasserstoff eignet sich 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 des experimentellen H₂-Tankstellennetzes 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 €³⁴.**

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).

Im Übrigen handelt es sich bei der Energiewende vor allem um ein deutsches Thema, bedingt durch den hohen Anteil von Kohlestrom und die politische Entscheidung zum Atomausstieg. Es hat für den internationalen Fortschritt bei der Zukunftstechnologie von Pkws kaum Relevanz.

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, Langstreckenflugzeuge** 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.

Massenanwendungen mit hohem Energiebedarf, die nicht mit Batteriespeichern abgedeckt werden können, wie zum Beispiel straßen- oder schienengebundener Schwerlastverkehr, werden langfristig eher auf synthetische Kraftstoffe als auf Wasserstoff umstellen, denn dafür ist die Infrastruktur viel preiswerter und im Übrigen ja bereits vorhanden.

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 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.

Es ist falsch zu fragen, ob wir durch Einführung von batterieelektrischen Pkws 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.

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.

Natürlich benötigt so ein Übergang Zeit. 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.

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://ionity.evapi.de/#/>

⁴ <https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/statistik/>

⁵ <https://ecomento.de/2018/07/24/643-738-kilometer-in-teslas-elektroauto-limousine-model-s/>

⁶ 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.

⁷ <https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-kobalt-vetter.pdf>

⁸ <https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/lithium-aus-lateinamerika-umweltfreundlicher-als-gedacht/24022826.html>

⁹ <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/3/57>

¹⁰ Lithium Abbau in 2018: Chile 14,1 tsd. Tonnen, Australien 18,7 tsd. Tonnen, weltweit 37,8 tsd. Tonnen

¹¹ Quelle: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/erdoel_gefahr_fuer_die_umwelt_0.pdf

Quelle: <https://www.dieumweltdruckerei.de/blog/erdoelfoerderung/>

¹² 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.

¹³ 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.

¹⁴ **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 kgCO₂/100km**.

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 kgCO₂/100km** 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 kgCO₂/100km**. Ein typisches BEV spart gegenüber einem durchschnittlichen **Diesel-Pkw** also rund **44%** und gegenüber einem typischen **FCEV** rund **38%** Emissionen ein.

¹⁵ CO₂-Rucksack der Batterieproduktion ca. 7 tCO₂, siehe Fußnote 12. Emissionsvorteil BEV gegenüber Diesel ca. 18,6 – 10,5 = 8,1 kgCO₂/100km, siehe Fußnote 14. 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 tCO₂ Einsparung.

¹⁶ Zusätzlicher CO₂-Rucksack eines FCEV ca. 3,3 tCO₂, siehe Fußnote 13, also 3,7 tCO₂ weniger als BEV. Emissionsvorteil BEV gegenüber FCEV ca. 16,8 – 10,5 = 6,4 kgCO₂/100km, siehe Fußnote 14. 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 tCO₂ Einsparung.

¹⁷ Quelle: <https://edison.handelsblatt.com/e-hub/so-viel-strom-brauchen-autos-mit-verbrennungsmotor/20826274.html>

¹⁸ Literaturangaben zum CO₂-Emissionsfaktor von Windkraftanlagen schwanken zwischen rund 10 bis 40 gCO₂/kWh_{el}. Rechnet man mit dem Mittelwert 25 und optimalen Wirkungsgraden für Druckbetankung, Verflüssigung und Abdampfverluste sowie Elektrolyse (siehe Fußnote 20), dann verursacht ein durchschnittliches **FCEV mit Wasserstoff aus Windstrom mindestens 3,1 kgCO₂/100km**, ein **BEV jedoch nur 0,6 kgCO₂/100km** bei gleichen Rahmenbedingungen.

Der CO₂-Emissionsfaktor von PV-Anlagen wird in der Literatur zwischen 50 bis 100 gCO₂/kWh_{el} angegeben. Auch hier bleibt der Emissionsvorteil von BEV um rund den Faktor 5 gegenüber FCEV erhalten.

¹⁹ 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**

²⁰ **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%**.

²¹ 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.

²² Mittlerer Pkw-Verbrauch $1,1 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100\text{km} = 36,6 \text{ kWh}_{\text{H}_2}/100\text{km}$. Bei 631 Mrd. Pkw-km pro Jahr laut KBA (Stand 2018) sind das 231 Mrd. kWh_{H_2} . Selbst bei einem optimalen Kettenwirkungsgrad von 17 % (siehe Fußnote 2) ergibt sich ein Nettostrombedarf von 1.360 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>).

²³ Der Kettenwirkungsgrad steigt bei Entfall von Verflüssigung und Abdampfverlusten auf 18 bis 27%, siehe Fußnote 20. Der Nettostrombedarf sinkt dadurch auf rund 860 Mrd. kWh, siehe Fußnote 22.

²⁴ Quelle: <https://www.iea.org/gevo2019/>

²⁵ Hyundai Nexo und Toyota Mirai. Alle anderen Fahrzeuge (Honda, BMW, Daimler, GM) sind experimentell und werden nicht frei an Kunden verkauft.

²⁶ 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.

²⁷ Daimler GLC F-Cell (2019): 355 kg Gewicht für das H₂-System mit 4,3 kg_{H₂}-Tank (143 kWh) = 403 Wh/kg

²⁸ **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.

²⁹ **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

³⁰ 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}

³¹ Tesla Model 3 und Model S

³² 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.

³³ 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/>

³⁴ 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.