



19.12.2019

Mobilität morgen: Batterien oder Brennstoffzellen?

Anlass

Die Weichen für eine CO₂-arme Mobilität werden gestellt. Ein CO₂-Preis soll Benzin und Diesel teurer machen, Prämien E-Autos billiger. Bürgerinnen und Bürger sollen beim nächsten Mal zu einem E-Auto, Transporter oder LKW greifen. Einige Länder verbieten gar ab 2035 oder 2040 den Verkauf von Verbrennern ganz. VW folgt dem Beispiel Teslas und setzt mit dem ID3 alles auf die Batteriekarte, BMW dagegen präsentierte auf der Internationalen Automobilausstellung (IAA) den I-Hydrogen Next, ein Brennstoffzellen-Elektroauto. Wirtschaftsminister Peter Altmaier favorisiert als Treibstoff für Elektroautos Wasserstoff, der aus Saudi-Arabien kommen soll, Bundeskanzlerin Angela Merkel kündigte dagegen vor Wirtschaftsvertretern an, technologieoffen fördern zu wollen – auch wenn zwei Infrastrukturen kaum zu finanzieren seien.

Damit ist sie wieder da, die Frage von 1995: Brennstoffzelle oder Batterie fürs Elektroauto? Doch anders als vor 24 Jahren haben sich die Voraussetzungen gründlich geändert. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels kann es nicht mehr um ein Entweder-Oder im Sinne eines langwierigen technischen Wettbewerbs zwischen zwei Techniken gehen. Dieser würde zu viel Zeit kosten. Batterien und Brennstoffzellen haben beide Vor- und Nachteile. Es muss jetzt darum gehen, die Techniken dort einzuführen, wo es sinnvoll und schnell möglich ist. Wie das gehen könnte, soll dieses Fact Sheet zeigen.

Andere, ebenfalls wichtige Punkte, wie zum Beispiel die Umweltauswirkungen einer der beiden Techniken oder die Frage, inwiefern für eine Verkehrswende auch eine Reduktion des Individualverkehrs notwendig ist, sind wichtig, würden aber den Rahmen dieses Fact Sheets überschreiten.

Übersicht

Anlass.....	1
Übersicht.....	1
Die Technik: Batterien können viel mehr als 2010.....	2
Die Physik – Wie viele Windräder braucht man mehr für den elektrifizierten Verkehr?	3
Die Gesellschaft – Was kann die Kosten senken?	5
Das Klima: Wie weit muss ein E-Fahrzeug fahren, bis es CO ₂ einspart?	7
Der Nutzer: Laden oder Tanken	8
Flugzeuge oder Schiffe – Bleiben sie eine Domäne flüssiger Treibstoffe?.....	12
Fazit: Batterien <i>und</i> Brennstoffzellen gemeinsam und anwendungsorientiert denken!.....	13
Literaturstellen, die zitiert wurden.....	14



Die Technik: Batterien können viel mehr als 2010

Diesel, Kerosin und Benzin sind Energiespeicher mit besonders hohem Energieinhalt auf kleinem Raum. Verbrennungsmotoren sind dank dieser Treibstoffe besonders gut geeignet, schwere Fahrzeuge wie große LKW oder Schiffe über lange Strecken anzutreiben oder Flugzeuge in die Luft zu heben.

Elektroantriebe sind prinzipiell sogar noch effizienter, das zeigen die E-Loks der Bahn. Allerdings haben Stromspeicher bei weitem nicht den gleichen Energieinhalt, sie sind daher schwerer als Benzintanks. Deshalb verwendet die Bahn Oberleitungen, um die Loks direkt mit Strom zu versorgen. Auch für Oberleitungsbusse ist diese Technik Standard, für LKW auf Autobahnen wird sie derzeit erprobt. Für PKW allerdings ist das schwer vorstellbar. Forscher und Ingenieure setzen daher zum Teil bereits seit Jahrzehnten auf zwei Speichertechniken für Elektroautos: Batterien und Wasserstoff.

Batterien speichern Strom direkt, Wasserstoff kann durch Strom erzeugt, transportiert und getankt werden, dann kann er durch Brennstoffzellen und dem Sauerstoff in der Luft wieder Strom erzeugen. Bei der Reaktion entsteht nur Wasserdampf. Wird der Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe von erneuerbarem Strom erzeugt, gilt diese Technik – wie die Batterie – als emissionsarm.

Forscher untersuchen seit Jahrzehnten, welche Speicher am besten geeignet sind, Verbrennungsmotoren zu ersetzen. Am besten heißt: Sowohl für den Nutzer als auch für die Gesellschaft ergeben sich mehr Vorteile als Nachteile.

- ▶ Mitte der neunziger Jahre ließ das Forschungsministerium 60 Batterieautos auf der Insel Rügen testen. Lithium-Ionen-Akkus gab es noch nicht, auch keine Energiewende. Die Ergebnisse stuften Industrie, Behörden und Öffentlichkeit seinerzeit als entmutigend ein [1].
- ▶ Batterieforschung in Deutschland wurde faktisch gestoppt, in der Wissenschaft nur noch das Brennstoffzellen-Auto ernsthaft untersucht [2, S. 12f].
- ▶ Batterieelektrische Autos galten weiter als theoretisch effizienter, aber praktisch nicht umsetzbar: Die seinerzeit verfügbaren Batterien waren zu schwer, Lithium-Ionen-Akkus kaum verfügbar und zu teuer [2, S. 15f].
- ▶ Brennstoffzellen-Autos sind technisch aufwendiger und haben darüber hinaus ein weiteres Problem: Sie benötigen eine neue Tankstellen-Infrastruktur.
- ▶ In Europa forschten Hersteller zwar noch an Elektroautos, setzten in der Praxis aber auf den Dieselantrieb.
- ▶ 2019 hat sich die Situation grundlegend geändert:
 - Der Dieselskandal hat gezeigt, dass ein sauberer Diesel technisch aufwendiger ist als ursprünglich veröffentlicht. Erst heute sind Hersteller offenbar in der Lage, die Grenzwerte für Schadstoffe, die 1999 beschlossen wurden und seit 2010 gelten, einzuhalten [3], vergleiche [4]. Inwieweit sich dadurch Energieverbrauch oder Lebenszeit verändern, ist noch offen.
 - Immer noch zu hoch liegt allerdings der tatsächliche Verbrauch gegenüber den im Labor ermittelten Testverbräuchen der Verbrenner [5]; insgesamt sind die CO₂-Emissionen im Verkehr nicht gesunken, sondern stiegen gerade in Deutschland in den vergangenen Jahren sogar noch gegenüber 2005 um gut sechs Prozent [6, S. 30f; 33].
 - Toyota ist seit 1997 Innovationsführer bei Hybridfahrzeugen in Serienproduktion.
 - Tesla, Nissan, Renault, Hyundai und chinesische Hersteller haben in der Zwischenzeit Batterieautos in Serie gehen lassen.
 - Namentlich der Erfolg von Tesla und auch Renault/Nissan ließ die Preise von Batterien in den vergangenen Jahren drastisch sinken: 2010 kostete die Kilowattstunde Speicherkapazität noch 600 Euro, 2019 nur noch rund 105 Euro [2, S. 16], [7].
 - Dazu trugen auch Fortschritte in der Technik der Batterien bei.



- Forscher rechnen daher damit, dass batterieelektrische Fahrzeuge ab etwa 2025 in der Regel genauso viel kosten wie PKW mit Verbrennungsmotor [9, S. 83].
- Die Verkaufszahlen sind klein, (Deutschland 2018: 36.062 von 3.4 Millionen [9, S. 8], damit waren am 1.1. 2019 83.175 von 47 Millionen PKW [10], etwa 0,2 Prozent. 2019 kamen bis Oktober 52,882 Elektroautos dazu).
- Brennstoffzellen-Autos dagegen werden nur von drei Herstellern in einer sehr kleinen Serie gebaut.
- ▶ Teure batterieelektrische PKW mit großen Batterien erreichen derzeit nach offiziellen Herstellerangaben bis zu 530 Kilometern. Die durchschnittliche Reichweite von Elektroautos ist nach Herstellerangaben inzwischen stark gestiegen. Sie liegt derzeit bei rund 330 Kilometern und wird in den kommenden Jahren auf 400 bis fast 500 Kilometer steigen [7].
- ▶ Die tatsächliche Reichweite hängt aber vom Betrieb und der Witterung ab; je mehr auf der Autobahn gefahren wird, desto weniger weit kommt ein Batterie-Elektrisches Auto. Je mehr Stadtfahrten und je mehr Stopp-and-Go-Verkehr, desto größer ist der Vorteil von Batteriefahrzeugen, weil ihr Motor beim Halten keinen Strom verbraucht. Heizung und Kühlung machen sich ebenfalls in der Reichweite bemerkbar, ein Vergleich muss daher anwendungsorientiert erfolgen.
- ▶ Die Reichweite der drei Brennstoffzellenwagen wird derzeit von den Herstellern mit rund 500 bis 700 Kilometern angegeben [Toyota, Hyundai, Daimler]. Nach Richtlinien der US-Umweltbehörde EPA-Richtlinien erreichen sie zwischen 500 und 590 Kilometer [14, S. 44].
- ▶ Da der Verkaufs- oder Leasing-Preis sowie die Reichweite von Brennstoffzellen- oder Batterieautos inzwischen sehr ähnlich sind, sehen einige Forscher damit beim PKW für die Brennstoffzelle letztlich nur noch einen großen Vorteil aus der Perspektive des Nutzers: Der Tankvorgang ist deutlich schneller [10, S. 367].
- ▶ Andere Forscher weisen jedoch darauf hin, dass Brennstoffzellenfahrzeuge sehr stark subventioniert, trotzdem teurer als viele Batterieautos und teurer zu betanken sind.
- ▶ Da immer mehr Batterieautos angeboten werden als Brennstoffzellenautos, scheint es sinnvoll, das Hauptgewicht für die CO₂-Reduktion auf der Straße auf Batterieautos zu legen und Brennstoffzellenautos nur da zu fördern, wo der Vorteil des Tankens sehr groß ist.

Die Physik – Wie viele Windräder braucht man mehr für den elektrifizierten Verkehr?

Bis 2010 war die Frage der gesamten Effizienz von Brennstoffzellen oder Batterien für die Mobilität auf der Straße nicht relevant: Batteriefahrzeuge hätten den Anforderungen an PKW oder LKW schlicht nicht genügen können. Das ändert sich jedoch seit fast einem Jahrzehnt, und damit kann man die Frage nach der Effizienz neu stellen, die letztlich bedeutet:

- ▶ Wie viel Windräder braucht Deutschland zusätzlich?
- ▶ Strom und Wasserstoff müssen beide erzeugt werden.
- ▶ Für die Stromerzeugung müssten zusätzliche Anlagen (Windräder, Photovoltaik-Anlagen, Stromleitungen) gebaut werden. Das braucht Energie, Platz, Akzeptanz und Rohstoffe.
- ▶ Batteriefahrzeuge können mit Strom direkt aus dem Netz geladen werden und damit die Elektromotoren betreiben.
- ▶ Brennstoffzellenfahrzeuge können keinen Strom direkt nutzen. Stattdessen erzeugen sie Strom aus Wasserstoff.
- ▶ Das ist klimafreundlich, wenn:



- der Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen werden. Dabei zerlegt ein Elektrolyseur mit Hilfe von Strom Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff,
- der Strom CO₂-frei erzeugt wird.
- ▶ Für die Wasserstofferzeugung müssen zusätzliche Anlagen gebaut werden: Windräder, PV, Elektrolyseure, Tanks und Tankstellen. Das braucht wie bei den Batterie-Autos Energie, Platz, Akzeptanz und Rohstoffe.
- ▶ Die Frage ist daher: Welcher Weg braucht zusätzliche Anlagen, kostet die Gemeinschaft mehr Investitionen?
 - Die Schritte von Energiequelle zum Rad sind beim Batterieauto: Windstrom – chemischer Prozess zur Speicherung – chemischer Prozess zur Rückgewinnung – Nutzung im Motor.
 - Die Schritte von Energiequelle zum Rad sind beim Brennstoffzellenauto: Windstrom – Elektrolyse – Komprimierung – Wasserstoffreaktion in der Brennstoffzelle – Nutzung im Motor.
 - Die Komprimierung verbraucht etwas zusätzlichen Strom und erzeugt zusätzliche Wärmeverluste.
 - Ferner sind die Wärmeverluste auf den anderen Stufen – Elektrolyse und Rückverstromung – deutlich höher als im Batterieauto [10 Abb. 7, S. 366].
- ▶ Wasserstofferzeugung hat also eine geringe Effizienz, das heißt es muss viel mehr elektrische Energie erzeugt werden für vergleichbare Personenkilometer.
- ▶ Ein Brennstoffzellen-Fahrzeug erreicht daher nur einen Gesamtwirkungsgrad von der Stromerzeugung bis zur Straße von 20 bis 35 Prozent [9, S. 86], [2 S. 14].
- ▶ Ein Batteriefahrzeug erreicht dagegen einen sehr hohen Gesamtwirkungsgrad. Die Angaben reichen von 65 Prozent [2, S.13] bis zu 80 Prozent [9, S.86].
- ▶ Eine andere Sichtweise: Mit dem Einsatz von 15 kWh Primärenergie kann ein Batterieauto 100 Kilometer weit fahren, ein Brennstoffzellenauto (ohne Berücksichtigung des zusätzlichen Energiebedarfs für die Wasserstoff-Infrastruktur wie Speicher, Pipelines, Tanklastzug oder Tankstelle) aber nur rund 48 Kilometer [9, S. 87], [12, S. 15].
- ▶ Für eine Elektrifizierung des deutschen Fahrzeugbestandes rechnet daher:
 - das BMU mit einem zusätzlichen Strombedarf von 90 TWh, wenn die gesamte PKW-Flotte auf Batteriefahrzeuge umgerüstet würde.
 - Danach würden Brennstoffzellenautos in der Größenordnung von 180 bis 200 TWh zusätzlichen Strom benötigen (das entspräche der 2015 von Wind und Sonne erzeugten Strommenge) [13, S.2].
 - Das Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) Heidelberg rechnet mit 2.900 Batteriefahrzeugen (Jahresfahrleistung 15.000 Kilometer) pro Windrad (drei MW/Jahresleistung 2.071 MWh). 47 Millionen PKW waren 2019 in Deutschland zugelassen. Sollten alle durch Batterieautos ersetzt werden, müssten ungefähr 16.210 Windräder dieser Größe zusätzlich installiert werden [12, Tabelle 16 S. 83].
 - Das oben genannte Windrad könnte 1.300 Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Jahresfahrleistung 15.000 Kilometer) versorgen. Sollten alle 47 Millionen PKW durch Brennstoffzellen-Fahrzeuge ersetzt werden, müssten ungefähr 36.160 Windräder dieser Größe zusätzlich installiert werden, also mehr als doppelt so viele, als heute bereits aufgestellt sind.
 - Im Juli 2019 waren nach Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur insgesamt 38.084 Windräder on- und offshore in Deutschland aufgestellt.
 - Ein ähnliches Ergebnis auf lokaler Ebene zeigte eine Simulation für den Ort Los Altos Hills bei San Francisco: Bei gleichem Anteil Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen müssten im Ort 10 MW Solarzellenleistung für Batteriefahrzeuge installiert werden, aber 19 MW Photovoltaikleistung für Brennstoffzellenautos [10, S. 363].
 - Die Kosten für die CO₂-Vermeidung bei reinem Brennstoffzellen-Weg lagen bei 600 US-Dollar pro Tonne statt knapp 20 [10, S. 364].



- ▶ Forscher arbeiten zwar daran, Wasserstoff direkt aus Sonnenlicht und Wasser zu erzeugen. Diese Technik ist jedoch (noch) nicht einsatzbereit und es ist unklar, inwiefern sie die Gesamtbilanz von Wasserstoff für Mobilitätszwecke verändert.
- ▶ Das bedeutet:
 - Eine vollständige Versorgung des gesamten Straßenverkehrs mit Strom aus Deutschland scheint technisch möglich.
 - Der Aufbau der zusätzlich notwendigen Stromerzeugung **für Batterieautos** erscheint angesichts der aktuellen Entwicklung und des politischen Gegenwindes (1000-Meter-Regel) unrealistisch.
 - Ein Import der notwendigen Strommengen würde den Ausbau der Stromnetze in Deutschland und den Nachbarländern voraussetzen.
 - Dieser scheint aufgrund des schleppenden Netzausbaus in Deutschland derzeit kaum wahrscheinlich.
 - **Wasserstoff für Brennstoffzellen** in Deutschland zu erzeugen, würde erheblich mehr Energie benötigen und wäre wahrscheinlich deutlich teurer.
 - Der Aufbau der für die Wasserstoffherzeugung notwendigen Stromerzeugung erscheint derzeit vollkommen unrealistisch.
 - Ein Import der notwendigen Wasserstoffmengen wird derzeit zwar diskutiert, Voraussetzung ist aber: Andere Länder müssten bereit sein, die für eine CO₂-freie Produktion notwendigen Anlagen (Photovoltaik, Windräder, Elektrolyseure, Tanks, Häfen und so weiter) aufzubauen.
 - Zu den höheren Kosten der Wasserstoff-Mobilität kämen dann noch extra-Kosten für den Kauf und den Transport hinzu.
 - Vergleichbare Projekte für Strom aus der Wüste (Desertec, Medgrid) wurden vor 10 Jahren begonnen, bis jetzt ohne Erfolg.
 - Dabei ist der Aufbau der notwendigen Tankstellen-Infrastruktur noch nicht einberechnet.
- ▶ Von der Physik her scheint es daher sinnvoll zu sein, vor allem Batteriefahrzeuge für den Umstieg auf Elektromobilität zu setzen und Brennstoffzellenfahrzeuge nur dort einzusetzen, wo der Vorteil des schnellen Tankens besonders groß ist.
- ▶ Angesichts des Aufwandes kann man auch die Frage stellen, ob es sinnvoll wäre, zumindest die Zahl der Privat-PKW zu senken.

Die Gesellschaft – Was kann die Kosten senken?

Wenn es um die Frage geht, wie teuer der Umstieg wird, ist auch wichtig, ob sich durch Effekte auf andere Bereiche des Energiebedarfs der Gesellschaft vielleicht ein zweifacher Nutzen einstellen kann. Womit sich dann Synergieeffekte einstellen könnten. Nutzen, der bei beiden Fahrzeugen auftreten wird: Die Kosten für Reparaturen werden stark sinken. Elektromotoren, Batterien, Wasserstofftanks und Brennstoffzellen sind deutlich einfacher und robuster als Verbrennungsmotoren.

- ▶ **Brennstoffzellenautos wären Teil einer noch zu planenden Wasserstoffwirtschaft**
- ▶ Vorbild dafür könnte möglicherweise Japan sein:
 - Japan plant derzeit einen „robusten“ Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft.
 - 2020 soll der Plan endgültig beschlossen werden.
 - Zentraler Punkt: Japan setzt darauf, im ersten Schritt Wasserstoff-Bedarf mit Wasserstoff aus konventionellen Quellen aus Australien zu erzeugen. Das hat noch keine Umwelt- oder Klimavorteile.
 - Bis oder ab 2050 soll dann Wasserstoff durch Erneuerbare Energien, aber auch durch negative Emissionstechniken wie Carbon Capture and Storage (CCS) klimaneutral sein [14, S. 43].
 - Vier Prozent des für 2050 angepeilten Wasserstoffverbrauchs sind dem Entwurf nach sinnvoll in der Mobilität nutzbar.



- Der Löwenanteil – 64 Prozent – würde demnach in der Stromerzeugung eingesetzt. Dann folgen Industrie, Gewerbe, Wohnungen und schließlich Mobilität [14, S. 42].
- Bis 2030 sollen 800.000 Wasserstoff-PKW zugelassen sein.
- Bis 2020 sollen 160 Tankstellen, bis 2030 900 in Betrieb gehen [14, S. 43].
- Eine wünschenswerte Verzahnung der verschiedenen Sektoren – Energieerzeugung, Wärmeerzeugung, Mobilität – erfolgt auf diesem Weg nicht.
- Allerdings können Brennstoffzellen wie in den japanischen Wagen Mirai und Clarity offenbar prinzipiell zur Notstromversorgung in Katastrophenfällen genutzt werden [14, S.44].
- ▶ Ob die japanische Strategie für den Güterverkehr weltweit generell sinnvoll ist, ist jedoch offen: In der Nähe regenerativer oder CO₂-armer Stromerzeuger könnten Batterie-LKW durchaus Vorteile gegenüber Brennstoffzellen-LKW haben [14, S. 49].
- ▶ **Batteriemobilität wäre Teil der bereits laufenden Energiewende**
- ▶ Das bedeutet: Die Technik und der Rahmen für Batteriefahrzeuge entstehen bereits:
 - Wind- und Solaranlagen werden bereits installiert.
 - Der Preis sinkt bereits unter den Preis fossiler Kraftwerke, die Kosten sind damit deutlich niedriger als bei Wasserstoff.
 - Der Strom für die Mobilität kann wahrscheinlich im Land erzeugt werden.
 - Gerade auf dem Land können Nutzer zum Teil auch mit eigenen PV kostengünstig laden.
 - Inwieweit das im Gewerbe zum Beispiel für Pendler möglich oder nötig ist, müsste untersucht werden.
 - In Deutschland sind 2019 knapp 180.000 Elektroautos registriert.
 - Die Zuwachsraten lassen vermuten, dass die Zahl von einer Millionen Elektro-PKW in den kommenden Jahren erreicht wird.
- ▶ Über den Verkehrssektor hinaus haben Batteriefahrzeuge auch einen Nutzen für die Stromversorgung:
 - Batterien können systemstabilisierend geladen werden. Das heißt, sie werden dann geladen, wenn Überschüsse entstehen [9 S. 58, 27] [10 2016, S. 361].
 - Das wäre billiger, als Wasserstoff zu erzeugen [10 2016, S. 361].
 - Es wären weniger Energiespeicher im Netz notwendig.
 - Weniger Erneuerbare müssten abgeregelt werden.
 - Wind und PV-Anlagen werden besser ausgenutzt.
 - Das würde die Kosten für die Energiewende senken.
- ▶ Der umgekehrte Weg, Strom aus Autobatterien wieder ins Netz einzuspeisen, wenn Leistungsbedarf da ist, wird dagegen unter Wissenschaftlern inzwischen für wenig wahrscheinlich gehalten, da die Batterien schneller altern, wenn sie häufiger ge- und entladen werden [10 2016, S. 361].
- ▶ Das bedeutet: Bei der Wasserstoffmobilität gibt es noch viele Fragezeichen.
 - Klimaneutralen Wasserstoff gibt es noch so gut wie nicht.
 - Seriöse Schätzungen über den Preis und die Dauer, bis eine CO₂-freie Mobilität umgesetzt ist, sind derzeit nur schwer möglich.
 - Es gibt derzeit nur wenige Brennstoffzellen-Fahrzeuge und wenige Tankstellen; ein Umstieg auf Brennstoffzellen als Hauptantriebsquelle im Verkehr würde wahrscheinlich zu lange dauern und zu sehr hohen Kosten führen.
 - Positive Effekte für andere Sektoren – Heizung, Stromnetz – sind unmittelbar nicht zu erkennen.
 - Wasserstoffmobilität braucht nur einen geringen Teil des Wasserstoffs, der für eine CO₂-freie Wirtschaft im Ganzen notwendig ist.
- ▶ Bei der Batteriemobilität zeichnet sich folgendes ab:
 - Eine CO₂-Reduktion wäre schneller realisierbar, es werden bereits viele Batteriefahrzeuge verkauft.



- Der Strom für die Batterieautos kann in Deutschland erzeugt werden. Wertschöpfung bleibt im Lande, aufwändiger Transport ist unnötig, bereits vorhandene Infrastruktur kann schon genutzt, muss aber weiter ausgebaut werden.
- Batterieladung kann so organisiert werden, dass es Kosten im Stromnetz spart.

Insofern scheint es auch von der Energiewende her gedacht sinnvoll zu sein, Brennstoffzellenfahrzeuge nur dort zu fördern, wo der Vorteil des schnellen Tankens besonders groß ist, Wasserstoff lokal bereits regenerativ erzeugt wird und höhere Kosten akzeptabel sind.

Das Klima: Wie weit muss ein E-Fahrzeug fahren, bis es CO₂ einspart?

Eine Antwort auf die Frage, welche Technik für eine Dekarbonisierung des Verkehrs geeignet ist, sollte man sich auch von einer anderen Seite nähern: mit der Frage, wie viele Kilometer das Fahrzeug fahren muss, bis es im Vergleich zu anderen CO₂ einspart. Das ist das sogenannte Life-Cycle Assessment, kurz LCA. 2017 hatte eine solche Untersuchung aus Schweden Furore gemacht, die nicht von ausgewiesenen Experten für LCA und Batterien verfasst worden war [24]. Sie schien zu zeigen, dass bei der Produktion von Elektroautos mehr CO₂ frei würde als diese durch ihren Betrieb auf der Straße einsparen. 2019 korrigierte die schwedische Umweltbehörde diese Zahlen, um **circa 50 Prozent**. Damit zeigt dieser Ansatz ein wichtigstes Problem: Der Vergleich muss sinnvoll sein, die Daten müssen brauchbar und möglichst aktuell sein, und die Arbeit sollte von unabhängigen, ausgewiesenen Experten durchgeführt werden.

- Robuste Daten für den Energieverbrauch bei der Batterieproduktion sind nur sehr schwer zu bekommen.
 - Durch den Zubau von Erneuerbaren verändert sich der Energiemix weltweit jedes Jahr.
 - Weiterentwicklungen in der Batterieproduktion senken den Energiebedarf ähnlich schnell,
 - Der Energieverbrauch für Produktion, den Verbrauch, das Recycling verändert sich also unter Umständen jährlich, was in den LCA Untersuchungen in prognostischen Szenarien abgebildet werden kann und sollte.
- LCA sind daher nur Momentaufnahmen, die besonders sorgfältig ausgeführt und deren Daten und Annahmen gut dokumentiert werden müssen [24], vergleiche [9 Tabelle 5-1, S. 135] [25, S. 32] [26, S. 21,23].
- Daher ist es bei ihnen besonders wichtig, darauf zu achten, ob sie ausgewiesene Experten erstellt haben und in wessen Auftrag sie erstellt wurden.
- Durch geringfügige Änderungen von Daten oder Bewertungen können Aussagen grundsätzlich verändert werden, denn der Teufel steckt sprichwörtlich im Detail:
- So basierte die im Auftrag des ADAC erstellte, im Herbst 2019 veröffentlichte Untersuchung noch auf der 2017 erschienenen Studie aus Schweden und kam zu folgendem Ergebnis: Ein E-Auto der Golfklasse spare gegenüber einem gleichgroßen Benziner erst nach 127.000 Kilometern CO₂, beim Diesel erst nach 219.000 Kilometern.
 - Diese Darstellung findet sich aber nur beim ADAC, nicht in der Studie selbst [ADAC online].
 - Im Bericht findet sich eine mögliche Begründung für diese Aussage in der Annahme über die kalendarische Lebensdauer von acht Jahren für Batterien im Jahr 2019; für das Fahrzeug wird dagegen eine Lebensdauer von 12 Jahren angesetzt [27, Tab 10 S.64].
 - Diese Annahme würde den Austausch der Batterie nötig machen, was den Break-Even-Point um die Hälfte verschlechtert. Bei gleicher Lebensdauer müsste man die Emissionen in der ADAC-Annahme um ein Drittel reduzieren. Dann lägen die Ergebnisse aus Graz nur wenig höher als die der Agora [26, Abb. 11 S. 36] vergleiche [27, Tab 10 S.64].
 - Dass diese und höhere Laufleistungen möglich sind, zeigen aktuelle Presseberichte [28, 29].



- ▶ Unabhängig davon, dass die ADAC-Untersuchung offenbar auf veralteten Zahlen beruht [24], zeigt sie auch, wie sehr das Ergebnis von LCA-Berichten von Details abhängt, die gut begründet sein sollten.

Der Nutzer: Laden oder Tanken

Technik, Physik und Gesellschaft sprechen also derzeit für Einsatz von Batteriefahrzeugen als Standardfahrzeug der Verkehrswende und für den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen, wenn ein schnelles Auffüllen des Treibstoffs für den Einsatz des Fahrzeugs von sehr großem Vorteil ist. Das kann entweder der Fall sein, wenn das Fahrzeug rund um die Uhr eingesetzt wird oder einsetzbar sein muss, oder wenn es weite Strecken fahren muss, auf denen ein langsames Nachladen ein Nachteil wäre.

- ▶ Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden an Tankstellen geladen
 - Brennstoffzellenfahrzeug-Hersteller haben sich auf eine weltweite Norm geeinigt. PKW werden mit Wasserstoff bei 700 bar und -40 Grad Celsius betankt, Busse und LKW bei rund 300 bar.
 - Das Tanken eines Brennstoffzellen-Auto dauert etwa fünf Minuten.
 - 2019 gibt es nach Angabe der Firma Shell 79 Wasserstofftankstellen [17], 2020 sollen es 100 sein.
 - Der Tankstellenausbau ist teuer: Eine Tankstelle kostet ungefähr 1,5 bis 2 Millionen US-Dollar (in Japan bis zu 5,4 Millionen US-Dollar, dort sind die Sicherheitsvorschriften schärfer als in Europa [14, S. 46], vergleiche [10, S. 360].
 - Dazu kommen noch die Kosten für den Wasserstofftransport in LKW oder Pipelines.
 - In Japan rechnen Behörden mit einem wirtschaftlichen Betrieb ab ungefähr 900 tankenden Fahrzeugen im Jahr. Sie rechnen, dass Tankstellen frühestens ab 2030 rentabel werden [14, S. 46].
- ▶ Batterie-Fahrzeuge werden per Stecker an Ladestationen geladen
 - Es gibt derzeit drei Normen, oft verfügen aber Elektro-PKW über Mehrsystem-Kupplungen oder Adapter.
 - Ladestationen haben unterschiedliche Leistungen, die an die Batterien angepasst sind.
 - Das Laden eines E-Autos dauert zwischen 20 Minuten und mehreren Stunden, je nachdem wie viel Leistung über die Steckdose fließen kann.
 - 2019 gibt es offiziell bei der Bundesnetzagentur gelistet in Deutschland 11.224 öffentliche Ladesäulen für Elektroautos (Stand Dezember 2019), [18] andere Quellen nennen bereits für 2018 16.100 Ladestationen [8].
 - Mehrere Anbieter (**Ionity**, **Fastned**, **Allego**, Tesla) bauen derzeit Ladenetze auf.
 - Darüber hinaus gibt es viele private Ladestellen an Häuserwänden oder in Garagen.
 - Eine aktuelle Umfrage zeigt, dass 80 Prozent E-Autobesitzer heute ihr Fahrzeug zu Hause laden, oft an einem einfachen Haushaltsanschluss [16, S. 24]. Die langen Ladezeiten fallen für die Besitzer unter diesen Umständen kaum ins Gewicht [14, S. 45], [10, S. 360].
- ▶ Für den Nutzer haben Batterien darüber hinaus noch eine weitere, wichtige Eigenschaft, die bisher nicht genannt wurde: Je größer die Reichweite sein soll, desto schwerer werden sie. Das kann bei der Entscheidung darüber, wie das Fahrzeug genutzt werden soll, wichtig oder sogar ausschlaggebend sein.
- ▶ **PKW-Verkehr**
 - ▶ Voraussetzung für die Frage, welche Technik sich für einen CO₂-armen Ersatzantrieb eignet, ist natürlich die Feststellung, ob man prinzipiell auch auf das Fahrzeug verzichten kann – oder zumindest auf so viele Fahrten wie möglich.



- ▶ Kaum möglich ist eine statistische Antwort auf die Frage, bei welchen Fahrzeugen der kurze Tankvorgang so groß ist, dass es ein besonderer Vorteil wäre, ein Brennstoffzellenfahrzeug einzusetzen:
 - Die durchschnittliche Fahrleistung von Benzin-PKW liegt bei 11.000 Kilometern [11, Tab 4. S. 787]. Das sind etwa 30 Kilometer pro Tag.
 - Statistisch reicht die durchschnittliche Batterie aktueller Fahrzeuge bis zu 10 Tage, bevor sie geladen werden müsste, vergleiche [7].
 - Die durchschnittliche Fahrleistung von Diesel-PKW liegt bei gut 20.000 Kilometern [11, Tab. 4. S. 787]. Das sind 56 Kilometer pro Tag.
 - Statistisch reicht die durchschnittliche Batterie aktueller Fahrzeuge ungefähr fünf Tage, bevor sie geladen werden müsste, vergleiche [7].
 - Natürlich können aber auch längere Fahrten vorkommen, zum Beispiel Reisen.
- ▶ Statistisch gesehen scheint es für die meisten Fahrten der beiden PKW-Gruppen möglich zu sein, einen Ladevorgang so zu organisieren, dass es in den Tagesablauf passt. Ein klassischer Tankvorgang könnte zwar angenehm sein, böte aber darüber hinaus keinen handfesten Vorteil. Urlaubsfahrten könnten eine Ausnahme bilden, es scheint aber hinterfragbar, ob ein PKW wirklich für einen seltenen Nutzen gekauft werden soll.
- ▶ Statt der Statistik kommt es also in der Regel eher auf die tägliche Fahrleistung oder das Nutzerprofil eines PKW an. Solche offiziellen Nutzungsprofile gibt es allerdings nicht. Daher ist man für eine erste Näherung auf einen gewissen „common sense“ angewiesen, wenn man ermitteln will, für welchen Einsatz ein Brennstoffzellen-Fahrzeug wirklich einen großen Nutzen hat:
 - Das Fahrzeug fährt deutlich mehr Kilometer pro Tag als die statistischen Mittelwerte.
 - Das Fahrzeug fährt quasi rund um die Uhr.
 - Das Fahrzeug muss zu jeder Tag- und Nachtzeit einsetzbar sein.
 - Der Ladevorgang ist durch die dadurch gebundene Arbeitszeit des Nutzers für das Unternehmen so teuer und nicht auf eine andere Zeit organisierbar, dass ein kurzer Tankvorgang erheblich Geld spart.
- ▶ Stimmen diese Voraussetzungen, böten Brennstoffzellenfahrzeuge durch ihren raschen Tankvorgang besonders große Vorteile für:
 - Taxiunternehmer,
 - Dienststellen wie Feuerwehr, Rettungsdienste, THW oder Gas-Einsatzwagen von Energieversorgern,
 - Polizei und Bundeswehr,
 - Betreiber autonomer Fahrzeuge, falls diese wie Taxen eingesetzt werden sollen.

▶ **Linienbusverkehr**

- ▶ Beim Kauf von Linienbussen wird das Fahrprofil deutlich stärker berücksichtigt als beim PKW.
- ▶ Reichweite und der Tankvorgang von Brennstoffzellen könnten für Busse besonders vorteilhaft sein. Allerdings dauert der Tankvorgang der universitätseigenen Wasserstoffbusse des KIT rund 20 Minuten, die Reichweite beträgt je nach Fahrer und Außentemperatur bis zu 500 Kilometer.
- ▶ Es spielen noch weitere Gesichtspunkte eine Rolle, wie etwa die Verfügbarkeit von Wasserstoff (Köln, Ruhrgebiet, Hamburg, Leuna) oder Kosten und Verfügbarkeit von Techniken.
- ▶ Auch klimafremde Gesichtspunkte wie zum Beispiel die Schadstoffemissionen durch den Straßenverkehr können eine Rolle spielen.
- ▶ In China gibt es bereits einen starken Trend zum Batteriebus. So hat die Stadt Shenzhen ihren gesamten Busbestand mit Batteriebussen elektrifiziert.
- ▶ Tatsächlich hat beim ÖPNV in Deutschland inzwischen der Trend zur Elektrifizierung eingesetzt. Beispiele:



- Die Hamburger Hochbahn AG und die Kölner Verkehrsbetriebe wollen im Stadtverkehr ab 2020 keine Dieselbusse mehr beschaffen [19, 21].
- Bis 2030 sollen in Hamburg und Köln keine Dieselbusse mehr verkehren.
- In Köln verkehrt seit 2017 eine vollständig elektrifizierte Buslinie [20, Projekte 1 und 2].
- Bis 2021 sollen sechs weitere Buslinien auf Batterie-Bus-Betrieb umgestellt sein [21].
- ▶ Allerdings liegt der Schwerpunkt der Elektrifizierung derzeit trotz Ladedauer und begrenzter Reichweite auf batteriebetriebenen Bussen: Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) listet auf seiner E-Bus-Projektseite 61 Batteriebusprojekte auf, aber nur fünf Brennstoffzellenbusprojekte (in Hamburg, Raum Köln, Stuttgart) [20]
- ▶ Eckdaten zum Vergleich:
 - Die Kölner Elektrobusse Typ VDL Citea haben eine Reichweite bis zu 60 Kilometern. Eine Fahrtstrecke im Fahrplan beträgt sieben Kilometer von Endhaltestelle zu Endhaltestelle. Die Busse können bei Bedarf an den Endhaltestellen nachgeladen werden. Die Verfügbarkeit im ersten Jahr lag bei über 90 Prozent. Kostenpunkt waren 2016 695.000 Euro pro Bus. Insgesamt werden acht Busse gleichzeitig eingesetzt [22].
 - In Japan beginnt Toyota mit dem Verkauf einer Brennstoffzellen-Bus-Kleinserie. Reichweite 200 Kilometer, Kosten 945.000 US-Dollar. Das Umweltministerium in Tokio trägt rund ein Drittel des Kaufpreises [14, S. 48]. Werte über die Verfügbarkeit oder die Kosten pro Kilometer liegen noch nicht vor.

▶ **Güterverkehr**

Noch mehr als beim Bus muss das Fahrprofil des Transporters oder LKW eine wichtige Rolle spielen. Tatsächlich jedoch sind Klimaschutzanstrengungen im Gütertransport bislang nur sehr begrenzt erfolgt und beschränkten sich oft auf die Forderung, Güter auf die Schiene umzulenken. Dabei bietet nach unserer Recherche der Blick auf Einsatz und Fahrprofil die Chance, schnelle und kostengünstige Potenziale für eine Elektrifizierung des Straßen-Güterverkehrs zu erkennen und nutzen. Für genauere Recherchen wäre es sehr hilfreich, Datensätze über den Verkehr vom Kraftfahrtbundesamt oder dem Bundesamt für Güterverkehr zu erbitten, um sie zum Beispiel nach Stückgut und Komplettladungsverkehr auszuwerten. Das geschieht derzeit nicht.

- ▶ Gütertransport auf der Straße trägt erheblich zum Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß bei:
 - 2013 verbrauchten 2,477 Millionen LKW aller Größen 19,661 Milliarden Liter Diesel,
 - darunter 184.000 Sattelschlepper rund 5,7 Milliarden Liter Diesel.
 - Ein 13tel der Fahrzeuge trug gut ein Drittel zum Dieselverbrauch bei [11, Tab. 3, S. 786].
 - 2013 verbrauchten 13,215 Millionen Diesel-PKW und 75.000 Busse 19,346 Milliarden Diesel [11, Tab.4, S. 787].
 - 2013 lag damit der Dieselverbrauch von 2,5 Millionen Fahrzeugen etwas höher als der von fast 14 Millionen Fahrzeugen.
- ▶ 2015 stammten sechs Prozent der Gesamtemissionen von Kohlendioxid aus dem Straßengüterverkehr [9, S. 62].
- ▶ Die Fahrzeugflotte im Güterverkehr hat sich seitdem nur geringfügig verändert: 2018 waren drei Millionen Lastkraftwagen mit einer Nutzlast unter einer Tonne bis über neun Tonnen zugelassen; den Großteil davon machen die Fahrzeuge „unter einer Tonne“ (1,7 Millionen) aus; dazu kamen 210.000 Zugmaschinen für Sattelschlepper [23, S. 149].
- ▶ Eine schnelle Lösung für diese Fahrzeuge könnte den CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors schnell und merkbar senken [14, S. 49, vergleiche 24 ICCT].
- ▶ Dabei kann ein Blick auf die Nutzungsprofile der Fahrzeuge bislang unbekannte Erkenntnisse bringen.



- ▶ **LKW im Stückgutverkehr können auch mit Batterien elektrifiziert werden**
- ▶ Dieser Verkehr umfasst Güter, die von einem Punkt – zum Beispiel dem Hersteller – abgeholt werden und zu Kunden verteilt werden. Beispiele sind Farben oder Werkzeuge für Baumärkte.
- ▶ Diese Transporte sind oft in Netzwerken organisiert. Das bedeutet:
 - Ein LKW von bis zu 40 Tonnen Gesamtgewicht wird morgens beladen.
 - Die Zuladung füllt zwar das Volumen der Ladefläche, erreicht aber oft bei weitem nicht das maximal zulässige Gewicht.
 - Die Fahrt führt von einem Depot zu einem Hub.
 - Die Distanz zum Hub ergibt sich aus der Fahrzeit des LKW; der Fahrer soll in der Lage sein, an einem Tag einen Umlauf Depot-Hub-Depot zu fahren.
 - Daraus ergibt sich eine Distanz zwischen Hub und Depot von ungefähr 250 Kilometern.
 - Dort wird der LKW ent- und wieder beladen; die Ladezeit kann eine Stunde betragen.
 - Der LKW fährt zum Depot zurück, wird entladen, die Fracht wird mit kleinen Fahrzeugen (oder demselben) zugestellt, neue Fracht abgeholt.
- ▶ **Batterien** zur Elektrifizierung dieser LKW-Verkehre sind denkbar, denn:
 - Die LKW werden selten bis zur Gewichtsgrenze geladen.
 - Eine Batterie für die erforderlichen Fahrleistungen wöge zwar bis zu fünf Tonnen; sie könnte jedoch trotzdem in diese LKW eingebaut werden, ohne die Zuladung zu beeinträchtigen
 - Für die geforderte Strecke 200 bis 300 Kilometern würde diese Batteriegröße reichen.
 - Nachladen wäre während der Umladezeit möglich.
 - Es wären Ladestationen mit hoher Ladeleistung nötig.
 - Weil die Umläufe klar strukturiert sind, ließen sich auch die Ladezeiten für die Stromnetzbetreiber genau vorhersehen und einplanen.
 - Die Erfahrungen mit Batterien und E-Motoren lassen bei den Laufleistungen der LKW deutlich niedrigere Kosten für Reparaturen erwarten.
 - Die Erfahrungen und die Entwicklungen für Elektroautos lassen es möglich erscheinen, Elektro-LKW in kurzer Zeit anbieten zu können.
 - Weil die Netzwerke ihre LKW nach etwa fünf bis sechs Jahren erneuern, entstünde bei einer Elektrifizierung dieser Transporte ein erheblicher Markt für schwere E-LKW.
- ▶ **Brennstoffzellen** zur Elektrifizierung sind ebenfalls denkbar:
 - Gewicht und Reichweite wären ähnlich wie beim Batterieeinsatz.
 - Tanken wäre allerdings nur an Wasserstoff-Tankstellen möglich; Brennstoffzellen-LKW sind auf Tankstellen entlang ihrer Route angewiesen.
 - Ob und wenn ja welche Technik für den Betreiber billiger wäre, ist derzeit jedoch noch vollkommen offen.
- ▶ **LKW im Komplettladungsverkehr können mit Oberleitungen, Brennstoffzellen oder Batterien elektrifiziert werden**
- ▶ Komplettladungsverkehr ist der zweite große Sektor im LKW-Verkehr. Das sind in der Regel Sattelzüge, die nur eine Ladung tragen und von einem Hersteller zu einem Kunden fahren – zum Beispiel Stahl oder Übersee-Container.
 - Diese Verkehre sind selten in Netzwerken organisiert.
 - Die Fahrzeuge werden einmal beladen.
 - Dabei wird das maximale Zuladungsgewicht oft ausgenutzt.
 - Die Fahrzeuge fahren bis zum Kunden.
 - Der kann mehrere hundert Kilometer entfernt sein.
- ▶ **Oberleitungen und Brennstoffzellen** zur Elektrifizierung sind möglich:



- Oberleitungen für LKW auf Autobahnen werden derzeit in Schweden und Deutschland getestet.
 - Für eine Elektrifizierung des LKW-Verkehrs könnte es reichen, 4000 der 11.000 Autobahnkilometer mit Stromleitungen zu versehen.
 - Die LKW würden dann als Hybridfahrzeuge mit Batterie und Brennstoffzelle ausgerüstet.
 - Gewicht Tank und Brennstoffzelle ist wahrscheinlich niedriger als Batterie.
 - Tanken wäre nur an Wasserstoff-Tankstellen möglich; Brennstoffzellen-LKW sind auf Tankstellen entlang ihrer Route angewiesen.
 - Kann dieser LKW-Verkehr auf Hauptverkehrsachsen gebündelt werden, wäre der Ausbau von Wasserstofftankstellen entlang dieser Achsen schnell erfolgreich.
 - Alternativ können Oberleitungen auf Hauptverkehrsachsen die Notwendigkeit eines Ausbaus von Wasserstoff-Tankstellen wie auch den Wasserstoffbedarf selbst reduzieren.
 - Toyota testet in den USA einen 36 Tonnen „Capacity“ Lastwagen Alpha Truck und präsentierte 2018 einen ersten drei Tonnen Ladung Truck, Reichweite 200 Kilometer [14, S. 48]
- ▶ **Oberleitungen und Batterien** zu Elektrifizierung sind ebenfalls möglich.
 - ▶ Sollte allerdings kurzfristig kein Wasserstoff zur Verfügung stehen, könnten auch dieser Verkehr unter Umständen mit Batterien elektrifiziert werden.
 - ▶ Allerdings müsste dafür das Betriebskonzept etwas geändert werden:
 - Der LKW fährt nicht mehr durch.
 - Stattdessen fährt er etwa die Hälfte der Strecke.
 - Dort trifft er einen Fahrer, der die Fracht übernimmt und eine Retoure übergibt.
 - Die Fahrer tauschen also die Wechselbrücken oder Auflieger und fahren wieder zurück.
 - Halten sie dabei die Ruhezeiten ein, können sie beim Treffpunkt die Zugmaschinen nachladen.
 - Bei dieser Betriebsweise entstünde als zusätzlicher Nutzen ein prinzipiell attraktiverer Arbeitsplatz als heute: Fahrer wären öfter bis generell abends zu Hause.
 - Gesellschaftlich könnte sich als Zusatznutzen ergeben, dass deshalb weniger Stellplätze an Autobahnraststätten gebaut werden müssten.
 - ▶ Insgesamt zeigt sich, dass es für eine Verkehrswende im Gütertransport nicht reicht, nur den Treibstoff auszutauschen.
 - ▶ Eine Umgestaltung der Betriebskonzepte eröffnete neue Möglichkeiten und sollte möglichst schnell diskutiert werden.
 - ▶ Dafür fehlen derzeit jedoch Zahlen für den Anteil von Stückgut-, Komplett- und auch Baustellenverkehr.
 - ▶ Für den Kurzstrecken-Lieferverkehr gelten ähnliche Bedingungen wie für den PKW-Verkehr: Wenn das Fahrzeug so eingesetzt wird, dass sich die Ladezeiten gut in den Betrieb integrieren lassen, können sie mit Batterien elektrifiziert werden.

Flugzeuge oder Schiffe – Bleiben sie eine Domäne flüssiger Treibstoffe?

Bisher ist es ausschließlich um den Landverkehr gegangen. Aus gutem Grund:

- ▶ Für den kommerziellen Luftverkehr sind Batterien und Wasserstofftanks derzeit schlicht zu schwer.
- ▶ Trotzdem gibt oder gab es Versuche, Flugzeuge zu elektrifizieren.
 - Die Entwickler kleinerer Flugzeuge oder Lufttaxen setzen jedoch auf besonderes leichte Batterien, zum Beispiel der israelische Hersteller Eviation oder Lillium aus Oberpfaffenhofen.
 - In den vergangenen Jahren hatten zudem Unternehmen wie Airbus und Boeing Konzepte für Batteriebetriebene Kurzstreckenflugzeuge präsentiert: Flugdauer eine Stunde, 90 Passagiere. Diese werden jedoch derzeit offenbar nicht weitergeführt.



- Das DLR testet derzeit ein Hybridflugzeug, bei dem eine Batterie beim Start die Motoren unterstützt und während des Flugs und bei der Landung nachgeladen wird.
- ▶ Generell aber gehen Forscher davon aus, dass der Luftverkehr auf künstlich erzeugte, flüssige Treibstoffe angewiesen sein wird [9].
- ▶ Das wären Treibstoffe, bei denen Wasserstoff mit Kohlenstoff verbunden wird. Quelle dafür kann Biomasse sein, aber auch Kohlendioxid, zum Beispiel aus CCS-Prozessen oder direkt aus der Luft gefiltert. Weil für diesen Prozess zunächst Wasserstoff gewonnen werden muss, und er zudem sehr energieaufwändig ist, ist die Energiebilanz entsprechend schlecht. Mit 15 kW Primärenergie käme ein Auto mit diesem Treibstoff gerade einmal 20 Kilometer weit [9, S.15] Ihr Einsatz sollte daher auf Bereich beschränkt bleiben, für die es keine anderen Treibstoffe gibt.
- ▶ Ähnliches gilt auch für den Schiffsverkehr: Einzelne Unternehmen testen Hybridschiffe (Fähre Rodby-Fehmarn), Batterieantriebe (Norwegen) oder Binnenschiffe mit Redox-Flow-Wechselbatterien (Niederlande).
- ▶ Generell jedoch gehen Forscher bisher davon aus, dass der interkontinentale Verkehr auf künstlich erzeugte, flüssige Treibstoffe angewiesen bleiben wird [9, S. 106].
- ▶ Diese Treibstoffe werden in der Regel mithilfe von Wasserstoff und einem weiteren Rohstoff gewonnen – CO₂ oder Biomasse. Sie sind damit jedoch noch ineffizienter und teurer als reiner Wasserstoff und dürften sich nur dort durchsetzen, wo es wirklich keine Alternative für die Dekarbonisierung gibt [9, S. 16, 106].

Fazit: Batterien *und* Brennstoffzellen gemeinsam und anwendungsorientiert denken!

Wenn es stimmt, dass es ab 2019 darauf ankommt, den Pfad zur Dekarbonisierung des Verkehrs möglichst schnell einzuschlagen und ihn so kurz wie erschwänglich und umweltverträglich zu halten, dann ist keine Zeit mehr für eine Diskussion „Batterien oder Brennstoffzellen?“ Denn:

- ▶ Die technische Entwicklung zeigt: Was bereits 2009 undenkbar war, ist 2019 Realität: Batterien werden billig und leistungsstark genug, um Kosten und Reichweitenproblem in den Hintergrund treten zu lassen.
- ▶ Brennstoffzellenfahrzeuge sind dagegen ins Hintertreffen geraten. Ihr einziger Vorteil ist derzeit der schnelle Tankvorgang, der ihnen auf Langstrecken den Vorzug verschafft, auf eine schwere Batterie mit langen Ladezeiten verzichten zu können – um den Nachteil nennenswert höherer Kosten.
- ▶ Alle Nutzer, die keinen Wert auf einen schnellen Tankvorgang im Alltag legen müssen, können damit für die Dekarbonisierung des Transportmittels den physikalisch günstigsten Weg des Batteriefahrzeugs einschlagen.
- ▶ Das hat für die Gesellschaft zusätzlichen Nutzen, weil die Abhängigkeit vom Öl-Import reduziert wird, die Wertschöpfung für die Stromerzeugung im Inland stattfindet und der Ladevorgang von Batteriefahrzeugen unter Umständen so getaktet werden kann, dass er dann stattfindet, wenn mehr als genug Wind- und PV-Strom erzeugt werden.
- ▶ Diese Entwicklung ist bereits in Gang gekommen und kann sich in den kommenden Jahrzehnten beschleunigen. Sie jetzt für eine weniger weit entwickelte Alternative aufzuhalten, scheint nicht sinnvoll zu sein.
- ▶ Brennstoffzellenfahrzeuge haben dort ihren Platz, wo es drauf ankommt, rund um die Uhr einsatzfähig zu sein und hohe Energiemengen und Energiedichten benötigt werden.



- Gerade weil „grüner“ Wasserstoff kein unbegrenzt vorhandener Rohstoff ist, sondern teuer erzeugt werden muss, sollte er vor allem dort eingesetzt werden, wo es keine Alternativen dazu gibt: in der Chemie, in der Stahlindustrie, in der Bauindustrie oder als Speicher für die Stromerzeugung an windstillen Tagen oder Nächten. Für das Fahren oder Fliegen sollte er wirklich nur da verwendet werden, wo die Alternative – die Batterie oder die Oberleitung – nicht funktioniert. Es wäre dringend erforderlich zu erforschen, wie viel Wasserstoff wirklich für LKW notwendig ist.

Literaturstellen, die zitiert wurden

- [1] Der Spiegel, (1996): [Rollende Heizung](#) Der Spiegel 47 / 1996, S.85f.
- [2] Pehnt M et al. (2009): Wasserstoff und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- mittelfristigen Perspektive. Kurzgutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- [3] Wurnig D (2019): [Zwei Drittel der Dieselaautos fallen bei amtlichen NOx-Tests durch](#). RBB 24 Datenauswertung, 18.10.2019.
- [4] Umweltbundesamt (2018): [Neun Fragen und Antworten zum Diesel](#).
- [5] International Council on Clean Transportation (2019): [Benzin gegen Diesel. Vergleich der CO₂-Emissionen eines aktuellen PKW-Modells der Kompaktklasse, im Labor und auf der Straße](#).
- [6] Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2018): [Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt](#).
- [7] Horváth & Partners (2019): [Factencheck E-Mobilität – Update 2018/2019](#), Infografik Reichweite.
- [8] Horváth & Partners (2019): [Factencheck E-Mobilität – Update 2018/2019](#), Infografik Ladepunkte.
- [9] Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU (2017): [Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor](#). Sondergutachten November 2017.
- [10] Felgenhauer M F et al. (2016): [Evaluating co-benefits of battery and fuel cell vehicles in a community in California](#). Energy 114 (2016), 360-368. DOI: [10.1016/j.energy.2016.08.014](#)
- [11] Engerer E et al. (2015): [Benzin und Diesel dominieren weiter den Straßenverkehr](#). DIW Wochenbericht 36 (2015) Kraftstoffe im Straßenverkehr, S. 779-788.
- [12] Kreyenberg D et a. (2015): [Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenzial und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger](#).
- [13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Kurzinformationen Elektromobilität bezüglich Strom- und Ressourcenbedarf
- [14] Nagashima M (2018): [Japan's Hydrogen Strategy and it's economic and geopolitical implications](#). Études de l'Ifri, Ifri, October 2018.
- [15] METI (o.J.): [Basic Hydrogen Strategy \(key points\)](#).
- [16] Scherrer A et al. (2019): Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 69, Jg. 2019, Heft 11, S. 23-26
- [17] H₂Live (2019): [Netzausbau live. Der aktuelle Stand für Deutschland](#).
- [18] Bundesnetzagentur (2019): [Ladesäulenregister Bundesnetzagentur](#). Stand 5.12.2019.
- [19] Hamburger Hochbahn AG (2019): [Busse ohne Bass](#). Die emissionsfreie Flotte für unsere Stadt.
- [20] VDV (2019): [E-Bus-Projekte in Deutschland](#).



- [21] Stadt Köln (2018): [Kölner Busflotte wird elektrisch](#).
- [22] KVB Presseinformationen (o.J.): [E-Busse bei der KVB: Zukunftsaussichten](#).
- [23] Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (2019): [Verkehr in Zahlen](#).
- [24] SMC (2019): [Sind Elektroautos klimafreundlicher als bislang berechnet?](#) 03.12.2019.
- [25] Emilsson E et al. (2019): [Lithium-Ion Vehicle Battery Production. Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling](#).
- [26] Agora (2019): [Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotential](#).
- [27] Jungmeier et al. (2019): [Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen](#). Im Auftrag von: Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club, Fédération Internationale de l'Automobile, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, Graz, 12. September 2019
- [28] Eckl-Dorna W (2019): [Eine Millionen Kilometer im Tesla Model S: 100 Kilometer Fahrt kosten mich zwei Euro](#). Spiegel, 28.11.2019.
- [29] Becker J (2019): [Akkus auf der Langstrecke. Batterien von Elektroautos sind überraschend haltbar](#). Süddeutsche Zeitung 9.12.2019, S. 1



fact sheet

Ansprechpartner in der Redaktion

Sönke Gäthke

Redakteur für Energie und Technik

Telefon +49 221 8888 25-0

E-Mail redaktion@sciencemediacenter.de

Disclaimer

Dieses Fact Sheet wird herausgegeben vom Science Media Center Germany. Es bietet Hintergrundinformationen zu wissenschaftlichen Themen, die in den Schlagzeilen deutschsprachiger Medien sind, und soll Journalisten als Recherchehilfe dienen.

SMC-Fact Sheets verstehen sich nicht als letztes Wort zu einem Thema, sondern als eine Zusammenfassung des aktuell verfügbaren Wissens und als ein Hinweis auf Quellen und weiterführende Informationen.

Dieses Fact Sheet wurde von Experten aus der Wissenschaft auf Korrektheit geprüft.

Sie haben Fragen zu diesem Fact Sheet (z. B. nach Primärquellen für einzelne Informationen) oder wünschen Informationen zu anderen Angeboten des Science Media Center Germany? Dann schicken Sie uns gerne eine E-Mail an redaktion@sciencemediacenter.de oder rufen Sie uns an unter +49 221 8888 25-0.

Impressum

Die Science Media Center Germany gGmbH (SMC) liefert Journalisten schnellen Zugang zu Stellungnahmen und Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft – vor allem dann, wenn neuartige, ambivalente oder umstrittene Erkenntnisse aus der Wissenschaft Schlagzeilen machen oder wissenschaftliches Wissen helfen kann, aktuelle Ereignisse einzuordnen. Die Gründung geht auf eine Initiative der Wissenschafts-Pressekonferenz e.V. zurück und wurde möglich durch eine Förderzusage der Klaus Tschira Stiftung gGmbH.

Nähere Informationen: www.sciencemediacenter.de

Diensteanbieter im Sinne RStV/TMG

Science Media Center Germany gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
Amtsgericht Mannheim
HRB 335493

Redaktionssitz

Science Media Center Germany gGmbH
Rosenstr. 42–44
50678 Köln

Vertretungsberechtigte Geschäftsführer

Beate Spiegel, Volker Stollorz

Verantwortlich für das redaktionelle Angebot (Webmaster) im Sinne des §55 Abs.2 RStV

Volker Stollorz



science
media center
germany