

VERGLEICH VON WASSERSTOFF- UND ELEKTROMOBILITÄT

Technische, ökonomische, soziale und ökologische
Aspekte

September 2022

Autoren:

Jan Martin Specht
Paul Fabianek

Projektleiter:

Prof. Dr. Reinhard Madlener

Kontakt:

Institute for Future Energy Consumer
Needs and Behavior (FCN)
E.ON Energy Research Center
Mathieustraße 10
52074 Aachen

Telefon: +49 241 80-49820
E-Mail: post_fcn@eonerc.rwth-aachen.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Motivation	5
3	Gegenwärtige Marktlage und Forschungsfrage	6
4	Ökonomische Aspekte	7
4.1	Fahrzeugkosten	7
4.2	Infrastruktur- und Betriebskosten im Vergleich	8
4.2.1	Direkte Kosten für die Vertriebsinfrastruktur [Ladesäulen vs. H2-Tankstellen]	8
4.2.2	Netzinfrasturkturkosten [H2 Pipelines vs. Stromnetzausbau]	10
4.2.3	Endenergiekosten [EE-Strompreis vs. Wasserstoffkosten pro 100 km]	11
4.3	Fazit: Ökonomische Perspektive.....	13
5	Ökologische Aspekte	13
5.1	CO ₂ -Fußabdruck bei der Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen.....	13
5.2	CO ₂ -Fußabdruck beim Betrieb von batterieelektrischen Fahrzeugen.....	16
5.3	CO ₂ -Fußabdruck bei der Herstellung von Brennstoffzellen-PKW.....	16
5.4	CO ₂ -Fußabdruck beim Betrieb von FCEV	17
5.5	Abschließender Vergleich der ökologischen Nachhaltigkeit von FCEV und BEV.....	22
6	Akzeptanzaspekte.....	23
6.1	Hemmnisse bei der Anschaffung von FCEV und BEV	24
6.2	Gewichtung der Anschaffungskriterien und Vergleich von BEV und FCEV	26
7	Gesamtschau der Aspekte im PKW-Segment.....	28
8	Konsequenz für die Situation bei schweren Nutzfahrzeugen	29
	Literaturverzeichnis	31

1 Zusammenfassung

Die Mobilität der Zukunft wird höchstwahrscheinlich elektrisch sein, diskutiert wird jedoch noch ob die Elektromotoren mit Strom aus der Brennstoffzelle eines Wasserstofffahrzeugs (FCEV) oder einer Batterie eines Batterieelektroautos (BEV) stammen wird. Für die Entwicklung der Energienetze der Zukunft ist die Antwort auf diese Frage von zentraler Bedeutung. So würde eine ausgeprägte Wasserstoffmobilität einen starken Fokus auf Gaspipelines und Wasserstoffinfrastruktur erfordern, während Batteriemobilität voraussichtlich umfassende Investitionen in die elektrischen (Verteil-)Netze erfordern würde.

Die vorliegende Studie vergleicht BEV mit FCEV hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte. Dabei zeichnet sich Anfang 2022 ein klares Bild:

- Aus ökonomischer Sicht sind BEV vorteilhaft, da sie
 - dauerhaft günstiger in der Herstellung bzw. Anschaffung bleiben;
 - hohe Synergie-Effekte mit bestehender Infrastruktur ermöglichen; und
 - heute und vermutlich auch in Zukunft geringere Verbrauchskosten aufweisen.
- Aus ökologischer Sicht führt der ausgeprägte Effizienzvorteil der BEV im direkten Vergleich in den meisten realistischen Szenarien zu einer Vorteilhaftigkeit gegenüber den FCEV. Nur in Szenarien, in denen eine Bereitstellung CO₂-armen Stroms in Deutschland nicht möglich sein wird, wendet sich das Blatt, sofern grüner Wasserstoff auf Basis nahezu CO₂-freien Stroms importiert werden kann.
- Im Hinblick auf die Akzeptanz bei den Bürgern ergab sich folgende Priorisierung bei den Anschaffungskriterien: *Treibhausgasemissionen, Reichweite, Verfügbarkeit Lade-/Tankinfrastruktur, Lade- bzw. Tankdauer, Geräumigkeit, Gesamtkosten und Fahrdynamik*. Ein Abgleich der aktuellen wie der zu erwartenden Technologiepotentiale sieht BEV und FCEV meist gleichauf oder das BEV vorn. Lediglich bei der Tankdauer hat das FCEV einen Vorteil.
- Den Autoren dieser Studie erscheint eine Co-Existenz beider Technologien, ähnlich wie bei Benzin und Diesel, als eher unwahrscheinlich. Im Gegensatz zu den fossilen Kraftstoffen ergeben sich kaum Synergieeffekte aus einem parallelen Betrieb von Wasserstoff- und Ladeinfrastruktur; stattdessen kann bei signifikanten Marktanteilen von BEV nicht gleichzeitig die kritische Masse an FCEV erreicht werden, um die hohen Investitionskosten durch Umlage auf eine große Nachfrage zu relativieren. Geringe Marktdurchdringungen von FCEV führen daher zu spieltheoretisch instabilen Zuständen, bei denen eine Dynamik entsteht aus Nutzern, die wegen zu hoher umgelegter Kosten vom FCEV zum BEV wechseln, was wiederum die umgelegten Kosten auf die übrigen FCEV Nutzer noch weiter erhöht.
- Der vorherige Punkt überträgt sich weiterhin auch auf den Einsatz von Brennstoffzellen bei LKW: Sofern FCEV im Individualverkehr keine tragende Rolle spielen ist es wahrscheinlich, dass die umzulegenden Kosten auf den LKW-Sektor allein so hoch sind, dass batterieelektrische LKW in immer weitere Anwendungsfälle gedrückt werden, was erneut die Umlagen auf die verbleibenden Fahrzeuge erhöhen würde.

In Summe ergibt sich die deutliche Empfehlung für politische Entscheidungsträger wie für die weiteren Arbeiten im Projekt ENSURE 2 eine Infrastrukturauslegung auf weit überwiegende Anteile batterieelektrischen Verkehrs vorzunehmen.

2 Motivation

Aktuell erobern batterieelektrische PKW mit hoher Dynamik Marktanteile im Automobilsektor und überholten mit einem Marktanteil von 17,1 % im September 2021 zum ersten Mal die Diesel-Pkw (15,9 %) in den Neuzulassungen (Kraftfahrtbundesamt 05.10.2021). Dennoch sehen viele Studien diesen Erfolg nur als Zwischensieg und betonen, dass eine Forcierung der Wasserstoffmobilität der batterieelektrischen Mobilität langfristig aus mehrerer Gründe überlegen sein könnte.

So ermittelte McKinsey (2020) in einer Studie für den Hydrogen Council, dass Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) mit Reichweiten von über 200 km ab etwa 2030 kostengünstiger sein sollten, als entsprechende batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Ähnlich berechnete das Forschungszentrum Jülich in einer umfangreichen Studie, dass BEV zwar einen Kostenvorteil bei geringen Marktdurchdringungen aufweisen, FCEV jedoch bei großen Marktanteilen geringere Infrastrukturkosten erfordern und so schon bald Kostenparität zu BEV erreichen könnten (Robinius et al. 2018, vgl. Abbildung 1). Sogar geringere Kosten sind den Autoren zufolge möglich, wenn die bessere Speicherbarkeit von Wasserstoff mit eingepreist würde oder wenn die

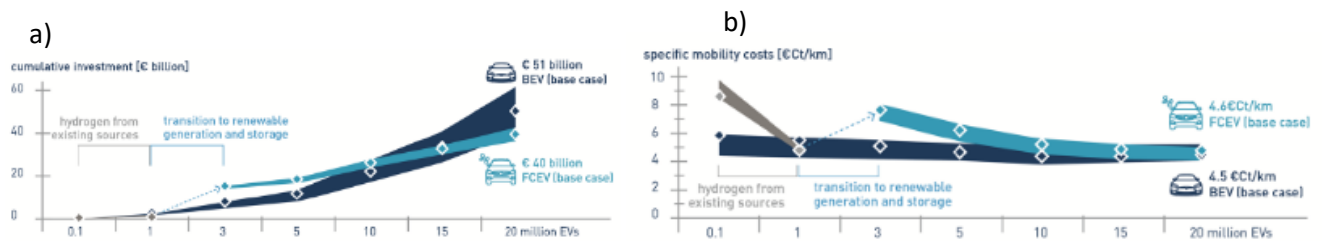


Abbildung 1a): Vergleich der kumulierten Investitionen für den notwendigen Infrastrukturaufbau sowie der resultierenden Kosten pro km (1b) im Vergleich von BEV und FCEV.

Quelle: Robinius et al. (2018)

Wasserstoffinfrastrukturkosten auf weitere Abnehmer umgelegt werden könnten.

Neben der ökonomischen Argumentation werden weiterhin häufig ökologische Vorteile der Wasserstoffmobilität angeführt. Auch hier sehen Robinius et al. (2018) FCEV in einem fortgeschrittenen Rollout deutlich vor BEV (vgl. Abbildung 2) und begründen dies insb. damit, dass der Wasserstoff aus grünem Überschussstrom gewonnen wird, während BEV mit dem durchschnittlichen Strommix betankt werden. Auch das Fraunhofer ISE resümiert in einer Studie für „H2 Mobility“, dass die höhere Effizienz von BEV die deutlich höheren Treibhausgasemissionen in der Herstellung im Vergleich zu FCEV nicht aufwiegen können (Sternberg et al. 2019).

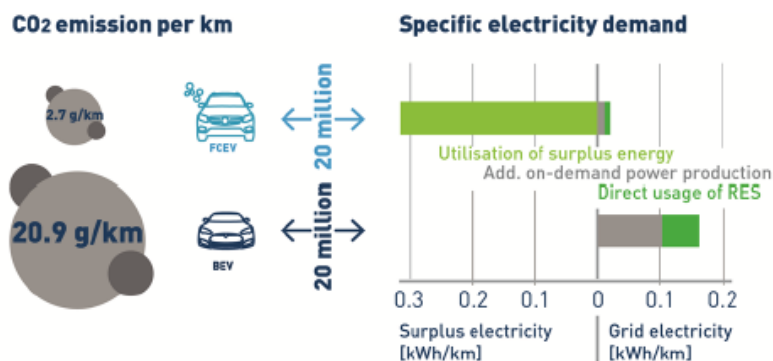


Abbildung 2: Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen pro Kilometer in einem Szenario mit 20 Millionen FCEV
Quelle: Robinius et al. (2018)

Zu guter Letzt stellen viele Studien auch die Akzeptabilität batterieelektrischer Fahrzeuge auf dem breiten Massenmarkt in Frage. Hier werden häufig eine geringe Reichweite, lange Ladezeiten, eine unzureichende Ladeinfrastruktur und der Zweifel an der Langlebigkeit der Fahrzeugbatterie als größte Handicaps genannt (Tschöke 2019; Flügge und Walter 2018).

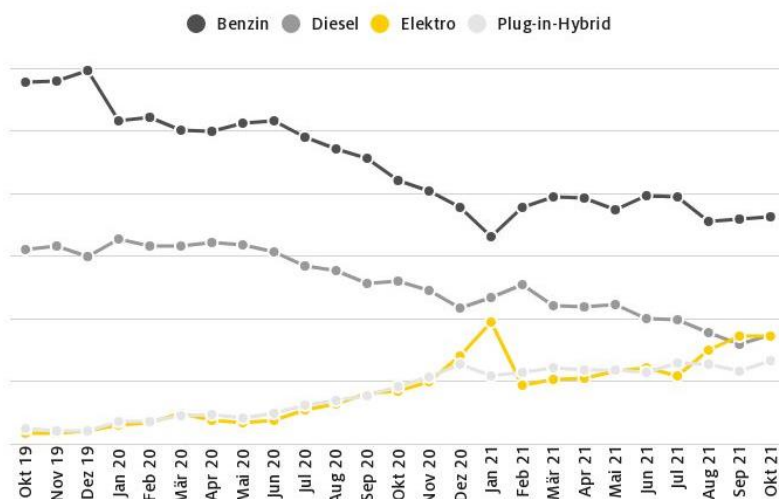
In unserer Studie werden die batterieelektrische und die brennstoffzellenbasierte Mobilität unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte untersucht. Es soll ermittelt werden welche der beiden Technologien aktuell sowie mittel- und langfristig die bessere Alternative auf dem Massenmarkt darstellt.

3 Gegenwärtige Marktlage und Forschungsfrage

Batterieelektrische Fahrzeuge konnten gerade während der COVID-19 Pandemie ihr rasantes Marktwachstum fortsetzen und einen nennenswerten Marktanteil erringen. So wurde 2020 die Marke von 10 Millionen BEV weltweit überschritten, bei einem jährlichen Wachstum der Absatzzahlen von 2019 zu 2020 von 43 % (IEA 2021). In Deutschland erreichten reine BEV im September und Oktober 2021 über 17 % der Neuzulassungen und überholten damit die Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit Dieselmotor. Weitere 13 % der neu zugelassenen Fahrzeuge waren Plug-in-Hybride (PHEV), welche ebenfalls über einen Batteriespeicher und einen Elektromotor verfügen (vgl. Abbildung 3).

Auch die Absatzzahlen von FCEV konnten 2020 deutlich zulegen, jedoch auf deutlich geringerem Niveau: So ermittelt die IEA (2021) für 2020 einen globalen Bestand von rund 35.000 FCEV, wovon etwa ein Viertel auf Nutzfahrzeuge entfällt. In der EU wurden 2020 etwa 749 neue FCEV zugelassen (ACEA 2021), was einem Anteil von 0,03 % aller elektrifizierten Fahrzeuge bzw. 0,01 % aller Fahrzeuge entspricht. In Anbetracht dieser Ausgangslage ist offenkundig, dass BEV gegenwärtig einen sehr großen Vorsprung im Markthochlauf gegenüber FCEV haben.

Antriebsarten: Neuzulassungen in Prozent



**Batterie Elektrofahrzeuge
sind Wasserstofffahrzeugen
bei der Marktdurchdringung
gegenwärtig weit voraus**

Abbildung 3: Neuzulassungen nach Antriebsart in Deutschland

Quelle: ADAC (2021) auf Basis von Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes

Diese Studie soll die gängigen Positionen in der Literatur durch einen unabhängigen Vergleich der batterieelektrischen Mobilität mit der Wasserstoffmobilität auf PKW-Ebene überprüfen. Aus Basis der drei Säulen Ökonomie, Ökologie und Akzeptanz soll untersucht werden, ob es Perspektiven gibt, dass sich die Marktsituation noch deutlich zugunsten des Wasserstoffs verändern könnte. Auf dieser Basis wird eine Schlussfolgerung entwickelt, auf welche Antriebstechnologie sich Deutschland in Zukunft fokussieren soll und welche zugehörige Infrastruktur primär ausgebaut werden sollte.

4 Ökonomische Aspekte

4.1 Fahrzeugkosten

Bei **BEV** verbessert sich das Preis-Leistungsverhältnis gegenwärtig rasant. Zum einen konnten Hersteller wie Tesla die Produktionskosten deutlich senken, was zu Verkaufspreisen (nach Abzug der deutschen Kaufprämie für BEV) von ca. €20.000 im Kleinwagensegment führt und die günstigsten Limousinen der Oberklasse bereits für €50.000 erhältlich macht. Gründe dafür sind u.a. massive *Kostensenkungen* bei der Batteriefertigung durch große Skaleneffekte und technische Weiterentwicklungen sowie neue Fertigungsverfahren wie das Tiefziehen ganzer Fahrzeugpartien in sog. Giga-Pressen. Insgesamt erwarten die meisten Studien eine Parität der Herstellungskosten zwischen BEV und konventionellen Verbrennern in den nächsten 3-5 Jahren (BloombergNEF 2021; ARK Invest 2021). Zum anderen nimmt auf der Leistungsseite die *Qualität* der Fahrzeuge für die Kunden kontinuierlich zu. Dies zeigt sich insb. bei der deutlich zunehmenden Reichweite von BEV (vgl. Abbildung 4): Während Modelle der ersten Generation häufig nur um die 100 km Reichweite hatten, so schaffen übliche Massenmarktfahrzeuge aktuell rund 450 km¹, während kommende Modelle 700 – 1000 km Reichweite (wenn auch zunächst nur im Premiumsegment) versprechen². Zusammen mit dem Ausbau der deutschen Ladeinfrastruktur (ca. 26.000 öffentliche Ladestationen zuzüglich privater Ladepunkte) verbessert sich so zunehmend die Langstreckentauglichkeit von BEV (Statista 2021b). Neben der reinen Reichweite und der Ladeinfrastrukturverfügbarkeit verbessern sich jedoch auch weitere Qualitäts-Faktoren wie die mögliche Ladegeschwindigkeit (typische Ladezeiten auf Basis von Wiehl (2021) AC: 2 bis 10 h; DC: 20 bis 50 min), die Verarbeitung der Fahrzeuge sowie die Ausstattung mit intelligenterer Board-Elektronik. Mit Beschleunigungen von 0 auf 100 km/h in 2,1 s bzw. 11,4 s und Höchstgeschwindigkeiten von 322 km/h bzw. 225 km/h (Model S 2021 Plaid bzw. Renault Zoe) ist die Elektromobilität der konventionellen Antriebstechnik in Bezug auf die Fahrdynamik mindestens ebenbürtig (Wiehl 2021). Erweiterte Geräumigkeit durch das Verbauen der Batterien im Fahrzeugboden generiert zusätzlichen Nutzen für Elektromobilist*innen (Maingau Energie 2021). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die batterieelektrische Mobilität günstiger und zunehmend attraktiver aus Nutzer*innen-Perspektive wird, was sich perspektivisch wohl weiterhin positiv auf die Zulassungszahlen von BEV auswirken wird.

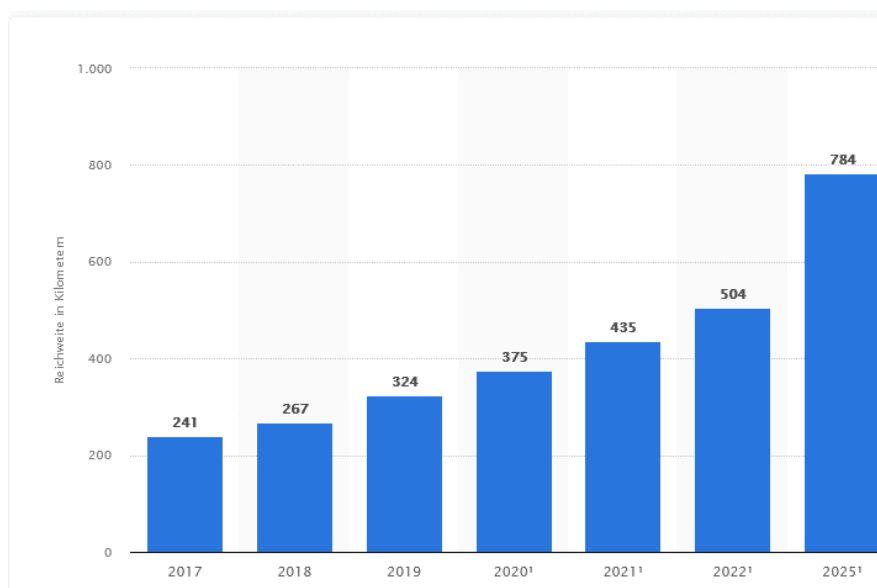


Abbildung 4: Durchschnittliche Reichweite von Elektrofahrzeugen in Deutschland von 2017 bis 2025

Quelle: Statista (2021), auf Basis von Daten von Horváth & Partners (2020).

¹ Die Basisversion des Tesla Model 3 im Update von 2021 wird mit einer WLTP-Reichweite von 491 km, die Basisversion des ID3 von VW mit 426 km angegeben, vgl. Wiehl (2022).

² Mercedes EQS (2021) mit einer WLTP-Reichweite von bis zu 780 km, Tesla Model S Plaid (2021) 630 km, Nio ET7 (2024) bis zu 1000 km, vgl. Wiehl (2022).

FCEV-PKW konnten sich noch nicht merklich auf dem Automobilmarkt etablieren. Ende 2021 waren in Deutschland nur knapp über 1000 FCEV zugelassen (NOW GmbH 2021). Der *Preis* der wenigen verfügbaren Modelle bewegt sich in der Regel deutlich über €60.000. Jedoch sieht die Literatur auch bei den FCEV ein großes Potential für Kostensenkungen. So erwarten bspw. Thompson et al. (2018) sowie McKinsey (2020) einen Rückgang der Kosten für die Brennstoffzelleneinheit um bis zu 70 % bei einer Steigerung der Jahresproduktionsmenge um etwa einen Faktor 10. Hinsichtlich der tatsächlichen Kosten für ganze FCEV existieren gegenwärtig kaum fundierte Prognosen. Insgesamt muss jedoch festgestellt werden, dass aktuell wenig auf eine rasche Steigerung der globalen Kapazitäten hindeutet – abgesehen von Hyundai und Toyota haben sich zuletzt die meisten großen Hersteller von der Brennstoffzelle abgewandt. Für die Produktion des Mirai 2 ab 2021 hat Toyota eine deutliche Steigerung der Produktionskapazität auf bis zu 30.000 Fahrzeuge bekanntgegeben; dies zeigt jedoch auch, dass mit großen Serien im Bereich mehrerer hunderttausend Fahrzeuge pro Jahr frühestens gegen Ende des Jahrzehnts zu rechnen ist. Auch die deutsche Wasserstoffinfrastruktur ist mit 92 Tankstellen zurzeit noch weit von der Massenmarktauglichkeit entfernt (Statista 2021c). Hinsichtlich der Reichweite (bis zu 650 km (WLTP) beim Mirai 2021) und der Ladegeschwindigkeit (unter 5 Minuten möglich) bekommt der Kunde für den hohen Preis durchaus eine *Qualität*, die an jene konventioneller Verbrenner heranreicht. Ein großes Problem der FCEV ist jedoch die Antriebsleistung: so wirkt bspw. der Mirai (2021) mit einer Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 9,2 Sekunden und einer Höchstgeschwindigkeit von ca. 175 km/h für einen vermeintlichen Sportwagen dieses Preissegments deutlich untermotorisiert im Vergleich mit Verbrennern und insb. BEV. Der ADAC bemängelt weiterhin das geringe Raumangebot im Fahrgastraum wie im Kofferraum aufgrund der Wasserstofftanks (ADAC 2021). In Bezug auf Marktetablierung und Kostendegression steckt die Wasserstofftechnologie im PKW-Segment noch in den Kinderschuhen; eine konkrete Trendwende ist gegenwärtig eher nicht zu erkennen.

Im Vergleich der Technologien hat hinsichtlich der Anschaffungskosten das BEV aktuell und zumindest auf Sicht der nächsten Jahre einen deutlichen Vorsprung. Dies liegt zum einen an den höheren Produktionszahlen (Skaleneffekte), lässt sich jedoch auch damit begründen, dass BEV eine vergleichsweise geringe technische Komplexität aufweisen. Ein BEV benötigt im

Hinsichtlich der Herstellungskosten sind (und bleiben) BEV im Vorteil gegenüber den FCEV

Wesentlichen nur eine große Batterie sowie den Antriebsstrang inkl. Elektromotor, Getriebe und Leistungselektronik (König et al. 2021). Ein FCEV benötigt diese Elemente ebenfalls (deutlich kleinere Batterie), zusätzlich jedoch auch noch mehrere Drucktanks, ein Druckleitungssystem, eine (an sich bereits komplexe) Brennstoffzelle, einen Kompressor für die Zufuhr von Luft in die Brennstoffzelle, Hilfs-Systeme u.a. zur Entfeuchtung der zugeführten Luft, sowie Einheiten zur Kühlung und Vorwärmung (Thompson et al. 2018). Dabei sind aufgrund des extrem hohen Druckniveaus der Wasserstofftanks besonders hohe Sicherheitsstandards zu gewährleisten. Aus diesen Gründen lässt sich zusammenfassend festhalten, dass FCEV zwar langfristig möglicherweise in den Herstellungskosten mit konventionellen Verbrennern gleichziehen könnten, der Vorsprung der BEV jedoch kaum aufzuholen sein dürfte.

4.2 Infrastruktur- und Betriebskosten im Vergleich

Während die Tankinfrastruktur für FCEV in Bezug auf Distribution und Nutzung durch Nutzer*innen der konventionellen Tankinfrastruktur ähnelt, ist die Ladeinfrastruktur dezentraler Natur und ist mit einem anderen Nutzer*innen Erlebnis verbunden.

4.2.1 Direkte Kosten für die Vertriebsinfrastruktur [Ladesäulen vs. H2-Tankstellen]

Die Ladeinfrastruktur für BEV ist nahezu beliebig dimensionierbar. Im einfachsten Fall kann ein Batteriefahrzeug sogar über eine gewöhnliche Haushaltssteckdose geladen werden, wenn auch

vergleichsweise langsam. So genannte „Wallboxen“ ermöglichen höhere Ladegeschwindigkeiten zu Hause von bis zu 22 kW, bei Anschaffungskosten von rund €1.000-2.000 (Deutscher Bundestag 2019). Abgeschrieben auf 10 Jahre bei jährlich 2.500 nachgeladenen kWh (Verbrauch: 18 kWh/ 100 km, Jahresfahrleistung durchschnittlich rd. 13.700 km, Statista, 2021a) ergeben sich Abschreibungskosten von etwa 4-8 €-ct/kWh. Bei der Nutzung eines Ladepunktes durch mehrere Fahrzeuge oder durch Wahl eines längeren Abschreibungszeitraums können die umgelegten Kosten auch deutlich geringer ausfallen. Die Kosten für öffentliche Ladesäulen weisen eine breite Streuung auf: während einfache Ladepunkte mit Wechselstrom für wenige Tausend Euro verfügbar sind, können Schnellladepunkte auf Gleichstrombasis auch hunderttausende Euro kosten (Nicholas et al. 2019, eine detaillierte Kostenübersicht über Soft- und Hardware für Ladesäulen sowie Kostensenkungspotentiale findet sich in Nelder und Rogers, 2019). Leider gibt es kaum Daten dazu, auf welche Menge an verkauftem Strom sich diese Kosten pro Ladesäule umlegen lassen und welche Betriebskosten dabei anfallen. Für eine grobe Abschätzung wird daher die geplante Preisobergrenz des vom ehemaligen Verkehrsminister Scheuer skizzierten „Deutschlandnetzes“ in Höhe von 44 €-ct/kWh zugrunde gelegt (Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BDMV) 16.08.2021). Davon ist der Preis für den verwendeten Strom abzuziehen, welcher später separat betrachtet werden soll. Selbst wenn eine Ladesäule ohne die üblichen Preisreduktionen für gewerbliche Anwendungen ihren Strom zu einem Haushaltspreis von 30 €-ct/kWh beschaffen würde, ergeben sich daraus schon deutlich höhere Abschreibungskosten von mind. 14 €-ct/kWh, was deutlich über denen eines privaten Haushaltes liegt.

Bei Wasserstoff liegt der Abgabepreis an der Tankstelle (für Gas und Infrastruktur) seit 2010 konstant und einheitlich bei €9,50 (brutto) pro kg_{H₂}. Diese Konstanz resultiert daraus, dass dieser Preis auf einer freiwilligen Festlegung von einem Zusammenschluss beteiligter Unternehmen zur Förderung der Wasserstoffmobilität beruht. Diese „Absprache“ ist in diesem Fall rechtskonform, da es sich nicht um einen überhöhten Preis, sondern einen massiv geförderten Preis deutlich unterhalb der tatsächlichen Kosten handelt. Zusätzlich zur Förderung durch die Unternehmen wurden die 90 bestehenden Wasserstofftankstellen in Deutschland im Schnitt mit €1,1 Mio. staatlich gefördert (Stand Juli 2021, Deutscher Bundestag, 2021). Die hohen Baukosten von Wasserstofftankstellen i.H.v. mehreren Millionen Euro resultieren dabei aus der komplexen Hardware für die Wasserstoffkompression, Temperierung und Speicherung. Dazu kommen zukünftig weitere Kosten für die Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff. Eine häufig favorisierte Option wäre die Versorgung mit Druckwasserstoff-LKW. Da ein Wasserstoff-LKW aktuell jedoch nur etwa 300 kg Wasserstoff transportieren kann (etwa das Äquivalent zu 1.000 Litern Diesel) müssten für eine mittelgroße Tankstelle voraussichtlich mehrere LKW rollierend eingesetzt werden, um neuen Wasserstoff anzuliefern. Dadurch fielen zusätzliche Kosten für die LKW Anschaffung und den Betrieb an. Alternativ könnten Tankstellen an ein Wasserstoffleitungsnetz angeschlossen werden, was jedoch erhebliche Anfangsinvestitionskosten (gerade bei abgelegenen Autobahntankstellen) verursacht. Für eine detaillierte Untersuchung möglicher Alternativen sei auf Reuß et al. (2019) und (Demir und Dincer 2018) verwiesen. Um die in jedem Fall sehr hohen Front-Up-Investmentkosten zu relativieren gehen viele Studien von sehr hohen Auslastungsraten aus. Reuß et al. (2017) verwenden bspw. eine durchschnittliche Auslastung von 70 % der täglichen Kapazität. Unter diesen Annahmen kommt die Optimierung von Reuß et al. (2019) auf zukünftige Kosten der Wasserstoffbetankung von min. 2-4 €/kg, das Modell von Demir und Dincer (2018) sogar auf 2,7 – 8 €/kg. Somit ergibt sich insgesamt eine Spannbreite von etwa 6-24 €-ct/kWh Wasserstoff nur für die variablen Kosten der Tankinfrastruktur (die zusätzlichen Kosten für das Wasserstoffgas werden separat betrachtet).

Im direkten Vergleich der Vertriebskosten ist aktuell in jedem Fall das Laden von Strom hinsichtlich der unmittelbar notwendigen Infrastruktur ökonomisch vorteilhaft. Allenfalls die optimistischen Szenarien der modellierten Kosten in den einschlägigen Studien könnten perspektivisch konkurrenzfähig zu den Vertriebskosten öffentlicher Stromladeinfrastruktur werden. Dabei ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass FCEV etwa doppelt so viele kWh pro 100 km verbrauchen, eine gleiche hohe Abschreibungsrate

Auch in sehr langfristigen Szenarien bleiben die Abschreibungskosten der Wasserstofftankstellen deutlich über denen der Ladesäulen

pro kWh also noch immer einen deutlichen Kostenvorteil pro 100 km für das BEV bedeutet. Insgesamt scheint es sehr unwahrscheinlich, dass der Kostenvorteil des BEV hinsichtlich der Lade- bzw. Tankinfrastruktur auf absehbare Zeit kippen könnte. Abschließend sei darauf verwiesen, dass ähnliche Bedingungen auch für den Schwerlastverkehr gelten würden. Sofern sich FCEV bei den PKW nicht durchsetzen, wäre es für Wasserstoff-LKW allein (besonders unter Berücksichtigung von Fahrverboten an Sonn- und Feiertagen) kaum realistisch möglich, die unterstellten hohen Auslastungsraten zu erreichen, woraus ggf. noch höhere spezifische Kosten resultieren würden.

4.2.2 Netzinfrastrukturkosten [H2 Pipelines vs. Stromnetzausbau]

Im Falle einer umfassenden Verkehrswende durch BEV werden die absoluten Kosten des Verteilnetzausbau steigen. Dem gegenüber steht jedoch auch eine deutlich höhere Abnahme an Strom, auf welche die zusätzlichen Kosten gewälzt werden können. Als Gedankenexperiment könnte man sich vorstellen, man würde für die Versorgung der BEV ein eigenes Stromnetz errichten. Die Kosten dafür wären etwa genauso hoch wie die des bestehenden Stromnetzes. Da der Strombedarf der BEV wie eingangs beschrieben etwa so hoch ist wie der konventionelle Strombedarf privater Haushalte, wären die umgelegten Netzentgelte voraussichtlich in ähnlicher Höhe. In der Realität muss natürlich kein zweites Stromnetz gebaut werden; stattdessen können viele Synergieeffekte genutzt und das bestehende Netz besser ausgelastet werden. Dies bedeutet, dass etwas höhere absolute Kosten auf rund die doppelte Strommenge verteilt werden können, wodurch sich eine Reduktion der umgelegten Kosten pro transportierter kWh ergeben. So ermitteln Wietschel et al. (2018) eine Reduktion der Netzentgelte von bis zu 14 % bei einer Marktdurchdringung von 30 % an BEV, während Agora Verkehrswende (2019) teils sogar geringere absolute Kosten ermitteln und folgern: „die Elektromobilität finanziert den Verteilnetzausbau bis 2050“. Eigene Untersuchungen anhand der Simulationsumgebung „Simbench“ konnten die Ergebnisse der genannten Literaturquellen bestätigen: In mehreren repräsentativen Verteilnetzen sind bis zu einem BEV-Anteil am Fahrzeugbestand von knapp 20 % kaum Verletzungen der Netzparameter festzustellen. Erst darüber hinaus kommt es zunehmend zu Verletzungen der Netzkriterien und somit einem Ausbaubedarf insb. im Verteilnetz. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Simulationen erfolgt in einem separaten Dokument.

4.2.3 Endenergiekosten [EE-Strompreis vs. Wasserstoffkosten pro 100 km]

Für das Beladen von BEV soll als Referenzsystem zunächst von einer Ladung an der heimischen Steckdose ausgegangen werden. Aktuell zahlen die meisten privaten Abnehmer dort knapp 30 €-ct/kWh Strom. Bei einem Verbrauch von durchschnittlich 18 kWh auf 100 km (beinhaltet bereits Ladeverluste) ergeben sich Kosten in Höhe von €5,40 pro 100 km für die Endenergie. Bei Berücksichtigung von Abschreibungskosten von bspw. 5 €-ct/kWh für eine private Wallbox resultieren 35 €-ct/kWh bzw. €6,30 für eine Strecke von 100 km. Das Wirtschaftsministerium gibt in seinem offiziellen Energiekostenvergleich von Dezember 2021 sogar nur €4,84 als Endenergiekosten pro 100 Kilometer für einen Mittelklassewagen an (Abbildung 5); ein entsprechender Aufkleber muss ab Oktober 2021 in jeder größeren Tankstelle aushängen. Der Preis des BMWi berücksichtigt dabei jedoch keine Ladeverluste oder Abschreibung für die Ladeeinrichtung. Sowohl im hier vorgeschlagenen Preis, als auch in dem des Ministeriums, sind aber ansonsten alle realen Steuern, Umlagen, (Netz-)Entgelte sowie eine angemessene Gewinnmarge für Energieversorger und Netzbetreiber berücksichtigt; ein Aspekt, der im Vergleich zum Wasserstoff wie nachfolgend erläutert werden wird.

Diese aufgezeigten Endenergiekosten für BEV können in vielen Einzelfällen allerdings sogar noch deutlich geringer ausfallen, als in diesen Referenzfällen. Zunächst räumen viele Stromanbieter im Hinblick auf den erheblichen Strombedarf von BEV günstigere Konditionen als in ihren Regeltarifen ein. So ist sogenannter „Autostrom“, explizit für Besitzer von BEV, um bis zu 20 % günstiger als gewöhnlicher Haushaltsstrom (Hänsch-Petersen 2021). Voraussetzung dafür ist ein eigener Stromzähler sowie eine Steuerbarkeit der Ladesäule, sodass der Ladevorgang notfalls zur Netzunterstützung unterbrochen werden kann (gem. §14a EnWG). Perspektivisch hat die deutsche „Ampel“-Koalition von 2021 in Ihrem Koalitionsvertrag beschlossen, die EEG-Umlage ab 2023 abzuschaffen. Diese Preiskomponente allein macht etwa 7 €-ct/kWh des Strompreises für Endabnehmer aus. Sollte dieses Vorhaben tatsächlich ganz oder zumindest teilweise wirksam umgesetzt werden, könnte der Bezugspreis für Netzstrom noch weiter sinken. Zuletzt kann der Strom für die Beladung eines BEV auch eigener Solarstrom genutzt werden. Bei knapp 2 Mio. Solarkleinanlagen in Deutschland ist dies bereits heute für viele Bürger eine Option. Da mehr und mehr Bundesländer aktuell eine Solarpflicht bei Neubauten oder Sanierungen vorsehen, wird diese Zahl in den kommenden Jahren höchstwahrscheinlich noch deutlich ansteigen. Aus Sicht des BEV-Ladens ist der Charme dieser Option, dass der PV-Strom nur mit den Opportunitätskosten für die Netzeinspeisung berechnet werden muss. Aktuell ist hier besonders die Einspeisevergütung relevant, welche für neue Anlagen gegenwärtig knapp 8 €-ct/kWh beträgt. Für eine Ladung nur mittels Eigenstrom sind dementsprechend für eine zunehmende Anzahl an Kunden Verbrauchskosten von unter €1,50 pro 100 km möglich.



**Energiekostenvergleich für
Personenkraftwagen in €/100 km**

		Kleinwagen/Kompaktklasse	Mittel-/Oberklasse
Super	E5	9,71	11,97
Super E10	E10	9,37	11,55
Diesel	B7	6,84	7,82
Strom		4,74	4,84
Erdgas H	CNG	5,54	6,45
Autogas	LPG	5,41	5,27
Wasserstoff	H2	-	7,60

Der Energiekostenvergleich beinhaltet die Gegenüberstellung der Kosten verschiedener Energieträger für Personenkraftwagen bezogen auf dieselbe Meileinheit gemäß § 3 Absatz 4 des Energieversorgungszeichengesetzes. Der Energiekostenvergleich wird vierteljährlich aktualisiert und ersetzt nicht die Auszeichnung der Kraftstoffpreise an der Tankstelle nach der Preisangabenverordnung (PaangV). Wenn für eine Fahrzeugsegment-Gruppe keine entsprechenden Daten verfügbar sind, wird in dem dafür vorgesehenen Feld ein Minuszeichen gesetzt.
Weitere Informationen finden Sie unter www.bmi.bund.de/DE/Themen/Energiekostenvergleich



Abbildung 5: Energiekostenvergleich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, welcher an allen größeren Tankstellen ausgehängt werden muss.

Quelle: BMWi (2021)

Für die Zukunft gehen die meisten Studien allerdings von deutlich sinkenden Wasserstoffpreisen aus. Grund dafür sind einerseits erwartete massive Skaleneffekte für den Bau neuer Tankstellen sowie höhere Auslastungen durch mehr FCEV. Zudem könnten die Kosten für die Wasserstoffherstellung weiter sinken. Aktuell werden die Kosten für „grauen“ Wasserstoff aus Erdgasreformierung mit 1-2 €/kg bzw. 3-6 €/ct/kWh angegeben. Aufgrund der schlechten CO₂-Bilanz des grauen Wasserstoffs müsste Wasserstoffmobilität zukünftig auf Basis von blauem oder besser grünem Wasserstoff erfolgen. Während dieser aktuell zwischen 4 und 8 €/kg in der Herstellung angegeben wird, rechnen viele Studien mit deutlichen Kostenrückgängen. So erwartet Prognos im Mittel Herstellungskosten i.H.v 3-5 €/kg und Greenpeace etwa 3 €/kg in ihrem „Trend“ Pfad für 2050, während die IEA die Kosten für grünen Wasserstoff schon für 2030 sowohl für Importe aus Afrika als auch die Herstellung in Europa bei etwa 4 €/kg sieht (Burkold 2020; Kreidelmeyer et al. 2020; International Energy Agency 2019). Die Herstellung in Deutschland hat jedoch den erheblichen Haken, dass alle aktuell diskutierten Ausbaupfade für die grüne Stromproduktion bis in die 2040er Jahre hinein grünen Überschussstrom in relevanten Maßstab erwarten lassen (Regett et al. 2018). Dies spiegelt sich auch in der „nationalen Wasserstoffstrategie“ der Bundesregierung wider, welche bis 2030 eine grüne Wasserstoffproduktion „von bis zu 14 TWh“ anstrebt, also gerade einmal einem guten Viertel des aktuellen deutschen Verbrauchs allein der chemischen Industrie (BMW 2020). Für eine mittelfristige Versorgung des Verkehrssektors mit grünem Wasserstoff müsste dieser somit zu überwiegenden Anteilen importiert werden. Viele mögliche Herkunftsländer werden im deutschen Diskurs genannt, doch bisher sieht zumindest kein europäischer Staat in seiner eigenen Planung größere Mengen grünen Überschussstroms für Wasserstoffexporte vor (European Commission 2021; IRENA 2018). Damit würde letztlich nur die Option für interkontinentale Wasserstoffimporte bleiben. Allerdings sind interkontinentale Pipelines, bspw. aus Nordafrika, sehr teuer und vermutlich langwierig in der Umsetzung. Flüssiger Wasserstoff könnte einfacher über lange Strecken verschifft werden, jedoch verbraucht allein die Verflüssigung bei -252 °C rund 30 % bis 20 % (aktuell im Labor, vgl. bspw. Cardella, 2018) der transportierten Energie. Hinzu kommen auf langen Strecken sog. „Boil-Off“-Verluste, da der Wasserstoff während des Transports nicht anders als durch „abdampfen“ auf seinem niedrigen Temperaturniveau gehalten werden kann. In den meisten Untersuchungen überwiegen insgesamt die zusätzlichen Kosten für eine interkontinentale Belieferung die Kostenvorteile des günstigeren Stromdargebots, sodass (in Einklang mit den zuvor zitierten Quellen) etwa 4 €/kg für Herstellung und/oder Import langfristig als optimistischste Annahme genannt werden können.

Zu den Herstellungskosten kommen dann noch Kosten für die Speicherung und nationale Distribution des Wasserstoffs sowie den Betrieb der Tankstelle, welche von Reuß et al. (2019) auf lange Sicht mit zusätzlichen Kosten von etwa 2 €/kg geschätzt werden. Damit ergeben sich perspektivisch bestenfalls Wasserstoffkosten von 6 €/kg an der Zapfsäule, und zwar in einem voll durchoptimierten System. Fast alle gegenwärtigen Kostenabschätzungen in der Literatur erfolgen jedoch auf reiner Kostenbasis; realistisch würden dazu dann ggf. noch Steuern, Abgaben und Gewinnmargen kommen, sofern nicht eine dauerhafte Subventionierung gegenüber der Gesellschaft wie auch den Wettbewerbshütern stattfinden bzw. auch gerechtfertigt werden kann.

Der Verbrauch aktueller Wasserstofffahrzeuge lässt sich mit rund 1 kg/100km abschätzen (Mirai 2Gen.: 0,89; Hyundai ix35: 0,95; Hyundai Nexa: 0,95 kg/100km, vgl. auch Bieker (2021) p.67). Somit überträgt sich der Zapfsäulenpreis pro Kilogramm recht genau auf den Preis pro 100 km. In Summe ist festzustellen, dass Wasserstoff selbst in einem optimalen Fall, langfristig, unter vielen Annahmen sowie frei von Steuern, Abgaben und Gewinnmargen kaum an konservative Endenergiekosten eines BEV herankommen wird.

4.3 Fazit: Ökonomische Perspektive

Aus ökonomischer Sicht ergibt sich in Summe ein klares Bild: BEV sind für Nutzer*innen deutlich günstiger in der Anschaffung und im Betrieb. Die Kosten für eine Ladeinfrastruktur von BEV sind geringer als bei Wasserstofftankstellen. Hinsichtlich der Energienetze profitiert die Stromversorgung davon, dass geringfügig höhere Systemkosten (aufgrund von Synergieeffekten mit der bestehenden Infrastruktur) auf deutlich mehr transportierte Energie umgelegt werden können, was potentiell für eine Entlastung der Netzentgelte sorgt. Beim Wasserstofftransport ergeben sich bei keiner aktuell diskutierten Distributions-Option nennenswerte Synergien mit bestehender Infrastruktur; bestenfalls können bestehende Erdgasleitungen umgewidmet werden, wodurch aber immer noch der ursprüngliche Nutzen verloren geht. Diese Ergebnisse resultieren aus der heutigen Datenlage, jedoch konnte auch nur ein einziges Szenario identifiziert werden, das diese Ausgangsalge theoretisch leicht ändern könnte: Sollte der Strompreis in Deutschland sehr hoch, der Importpreis für Wasserstoff aber extrem günstig werden, so könnte sich etwa eine Parität bei den Endenergiekosten ergeben. Dieses Szenario wird allerdings als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt und würde voraussichtlich auch nicht reichen, um die ökonomische Vorteilhaftigkeit der batterieelektrischen Lösung zu gefährden.

5 Ökologische Aspekte

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sehen sich regelmäßig der erheblichen Kritik ausgesetzt, dass die ökologische Nachhaltigkeit weit weniger gut sei als angenommen. Dies wird häufig insb. an einem hohen CO₂-Fußabdruck in der (Batterie-)Herstellung und der hohen CO₂-Last im deutschen Strommix festgemacht. Weiterhin werden sonstige ökologische und soziale Folgen im Rahmen des Abbaus der verwendeten Rohstoffe kritisiert. Diesen Aspekten wird nachfolgend, zunächst für die BEV, anschließend für FCEV, nachgegangen.

5.1 CO₂-Fußabdruck bei der Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen

Hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit von elektrifizierten Fahrzeugen, insb. BEV, gehen die Aussagen weit auseinander. So konstatierte bspw. eine Studie des IFO-Instituts, BEV seien in den meisten Fällen sogar deutlich klimaschädlicher als vergleichbare Dieselfahrzeuge (Buchal et al. 2019). Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Joanneum Research im Auftrag des ADAC und des ÖAMTC für Fahrzeuge in der Golf-Klasse ermittelt (die Artikel u.a. mit dem Titel „Mit schwerem Klima-Rucksack unterwegs“ sind allerdings auf den ursprünglichen Webseiten von ADAC bzw. ÖAMTC nicht mehr verfügbar). Ruhsert (2020) befindet sogar: „Etwa 80 % der untersuchten Studien dienen somit dem Greenwashing batterieelektrischer Fahrzeuge“ und ermittelt, dass selbst ein „sparsames Elektroauto in 20 bis 40 Jahren“ noch deutlich höhere Emissionen aufweisen wird als ein Erdgasfahrzeug.

Auf der anderen Seite sieht eine große Anzahl an Studien schon heute Emissionsvorteile für BEV über den ganzen Lebenszyklus betrachtet. So berechnet der ICCT einen rund 66-69 % geringeren CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu einem Auto mit Verbrennungsmotor (Bieker 2021) und auch Transport & Environment (2020) ermitteln, dass „BEV nahezu drei Mal besser als äquivalente konventionelle Fahrzeuge [Übersetzung des Autors]“ sind.

Eine Untersuchung der TU-Eindhoven konnte 6 zentrale Unterschiede in den Studien identifizieren, die diese Differenz im Ergebnis zu weiten Teilen erklären (Hoekstra und Steinbuch 2020). So nutzen die erstgenannten, kritischen Studien sehr hohe Emissionen bei der Batteriefertigung basierend auf einer Studie des „Swedish Environmental Research Institut“ von 2017

Ein CO₂-freier Strommix erlaubt perspektivisch die Herstellung nahezu CO₂-freier Batteriezellen

(Romare und Dahllöf 2017). Diese Studie des IVL wiederum basierte jedoch nur auf einer Literaturschau alter Quellen zur Batteriefertigung für tragbare Endgeräte und wies entsprechend einen sehr hohen CO₂-Fußabdruck von 175 kg pro kWh Batteriekapazität aus. Die Autor*innen selbst widersprachen den gezogenen Schlüssen und veröffentlichten Ende 2019 ein Update zu ihrer ursprünglichen Studie, in der die spezifischen Emissionen mit 85 kg pro kWh für eine aktuelle Fertigung nur noch halb so hoch ausfallen wie zuvor. Doch auch diese Daten scheinen schon wieder überholt; Hoekstra und Steinbuch (2020) schätzen auf Basis aktueller Literatur eine Emissionsintensität von durchschnittlich 75 kg/kWh und der Hersteller VW gibt für die Fertigung des ID.3 CO₂-Emissionen von 62 kg/kWh Batteriekapazität an. Die vermeintlich beste Aufschlüsselung findet sich in einer aktuellen Studie von Degen und Schütte (2022) welche die einzelnen Fertigungsschritte der Batterie genau nach Strom- und Gasverbrauch auflösen. Im Ergebnis ergeben sich für den Strommix von heute 10,3 kg_{CO₂_äq}/kWh für Deutschland, jedoch nur 4,54 kg_{CO₂_äq}/kWh für eine Zellfertigung in Schweden. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die besonders energieintensiven Prozesse der Formgebung und Trocknung statt mittels Erdgas auch durch Nutzung von Wärmepumpen effizient elektrifiziert werden könnten, wodurch der CO₂-Fußabdruck bei grünem Strommix nahezu gegen Null ginge. Unter Berücksichtigung der ambitionierten Ausbauziele der neuen Regierung in Deutschland sowie in Anbetracht des schon heute deutlich CO₂-ärmeren Strommixes in den meisten Nachbarländern sollen für die mittelfristige Abschätzung der optimistische Wert der Industrie der Gegenwart mit 60 kg_{CO₂_äq}/kWh für ein Szenario um 2030 angenommen werden.

Weiterhin konnten Hoekstra und Steinbuch (2020) zeigen, dass die kritischen Studien von einer geringen Lebensdauer der BEV von nur 150.000 km ausgehen, wohingegen Dieselfahrzeuge angeblich doppelt so lange halten. Dies steht jedoch in deutlichem Widerspruch zu aktuellen Studien und ersten empirischen Daten, denen zufolge die Batterien im Bestand bereits heute viele Hunderttausend Kilometer bewältigen können, während Hersteller hinsichtlich kommender Batterietypen zunehmend von „million-mile batteries“ sprechen. Dementsprechend dürfte die Lebensdauer der Batterie diejenige des Fahrzeugs selbst zukünftig in fast allen Anwendungsfällen übertreffen (Stone 2020; Transport & Environment 2020). Für eine überschlägige Abschätzung der CO₂ Bilanz in Richtung von 2025 sollen daher, in Anlehnung an die Werte von VW, 60 kg_{CO₂} pro kWh bei einer Batteriekapazität von 60 kWh angenommen werden, woraus sich exemplarisch 3,6 t_{CO₂} für die Batterieherstellung ergeben. Für die Fertigung des Fahrzeugs selbst ermittelt die ICCT etwa 6,5 t_{CO₂_äq}. Somit ergibt sich in Summe ein CO₂-Fußabdruck von etwa 10,1 t_{CO₂} pro BEV (ACEA 2021b; Bieker 2021). Umgelegt auf eine Lebensfahrleistung von 250.000 km müssen somit etwa 4 kg_{CO₂} pro zurückgelegter 100 km umgelegt werden (vgl. Bieker 2021, p. 65; wird der „Klimarucksack“ nur über 150.000 km Lebensfahrleistung umgelegt entspricht dies 6,7 kg/100 km).

Weitere Aspekte, die Hoekstra und Steinbuch (2020) für die Differenz hinsichtlich der CO₂-Bilanz zwischen den Studien anführen sind: (I) die Annahme, der Strommix bliebe dauerhaft auf seinem gegenwärtigen, hohen CO₂-Abdruck (diesem Aspekt wird im folgenden Kapitel Rechnung getragen), (II) die von den Automobilherstellern mitentwickelten Testverfahren zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs, (III) die Vernachlässigung der Vorkettenemissionen konventioneller Kraftstoffe, sowie (IV) das wesentlich größere Potential für zukünftige Effizienzgewinne bei BEV im Vergleich zum weitestgehend durchoptimierten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

Abgesehen vom CO₂-Fußabdruck wurden in der Literatur die verwendeten Ressourcen sowie deren Abbau als Problem der BEV-Fertigung genannt. Ein kritischer Rohstoff bei der Zellfertigung ist dabei Kobalt. Dessen Förderung erfolgt überwiegend im Kongo unter häufig sehr schlechten Arbeits- und Menschenrechtsbedingungen (Bechberger et al. 2021). Führende Hersteller haben „Codes of Conduct“ entwickelt und sich in Verbünden wie der „Global Battery Alliance“ zusammengetan, um verantwortungsvolle Lieferketten sicherzustellen. Bisher scheinen diese Anläufe aber häufig noch wenig erfolgreich: So erklärt beispielsweise VW auf seiner Website, aktuell könnten die Anforderungen noch nicht über die gesamte Lieferkette sichergestellt werden (Volkswagen 2021). Andere Hersteller von Fahrzeugen und Batterien wie Tesla, BYD, Samsung und Panasonic setzen zunehmend auf Kobalt-freie Batterien für Massenmarkt-Fahrzeuge und neue Zell-Chemie mit stark reduziertem Kobalt-Anteil für Hochleistungsbatterien (Petrova 2021; BMU 2021). In Verbindung mit einem starken Ausbau des Batterie-Recyclings könnten diese Maßnahmen somit einen Ausweg aus der Abhängigkeit von Kobalt aus fragwürdiger Herkunft darstellen.

Bis zur Erreichung hoher Recycling-Quoten bleibt die Verwendung von Kobalt in Batteriezellen aus sozialer Sicht problematisch

Lithium als Rohstoff ist deutlich weiter verbreitet als Kobalt und könnte perspektivisch sogar aus geothermischer Sole in Deutschland gewonnen werden (ARD 2021; Bechberger et al. 2021). Der Abbau erfolgt heute in Ländern mit relativ hohem Governance-Index, in denen ausgeprägte Menschenrechtverletzungen weitestgehend ausgeschlossen werden können. Ein Konfliktfaktor ist jedoch der erhebliche Wasserverbrauch der Lithium-Gewinnung (für Details vgl. Agora Verkehrswende und Öko-Institut e.V. 2017; BMU 2021). Allerdings zeichnen sich auch hier vielversprechende Lösungsansätze für die nahe Zukunft ab. Neben der Erschließung neuer Lithium-Quellen, wie bspw. aus geologischem Solewasser, werden gegenwärtig zahlreiche Verfahren entwickelt, wie Lithium aus Sole ohne Verdunstung, sondern bspw. durch sog. „Direct Extraction“ mit Hilfe von Membranen gewonnen werden kann (International Battery Metals 2021; NREL 2021).

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Nachhaltigkeit hinsichtlich CO₂-Fußabdruck und kritischer Rohstoffe deutlich verbessert werden wird. So hat die Europäische Kommission im Rahmen des „Green Deals“ eine spezifische Vorschrift zur umfassenden Steigerung der Nachhaltigkeit von Batteriezellen zur Umsetzung in 2022 vorgeschlagen (Europäische Kommission 10.12.2020; Bechberger et al. 2021). Diese adressiert viele Stellschrauben, u.a. hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks, der Nutzung von recycelten Rohstoffen und der Wiederverwendbarkeit alter Batteriezellen, sowohl für Fertigungen im Binnenland wie auch für Importzellen. Durch Recycling und Second-Life-Anwendungen sowie durch eine Steigerung von erneuerbaren Energien am Strommix können kritische Ressourcen voraussichtlich effektiver verwendet werden, wodurch der ökologische und soziale Fußabdruck in der Herstellung perspektivisch weiter gesenkt werden kann.

5.2 CO₂-Fußabdruck beim Betrieb von batterieelektrischen Fahrzeugen

Der unterstellte Strommix hat neben der Herstellung insbesondere auch während der Nutzung des Fahrzeugs einen erheblichen Einfluss auf den gesamten Fußabdruck über die Lebensdauer. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von etwa 18 kWh_{Strom}/100 km ergeben sich bei einer CO₂-Intensität des aktuellen deutschen Strommixes von etwa 400 g/kWh spezifische Emissionen i.H.v. 7,2 kg_{CO₂} auf 100 Kilometer, was etwa 3 Litern Benzin entspricht.

Jedoch muss der mittlere CO₂-Gehalt des Strommixes in den nächsten Jahren deutlich CO₂-ärmer werden, um die zahlreichen Verpflichtungen des Pariser Klimaschutzabkommens, der EU sowie der Bundesregierung einhalten zu können. So wurden in einem großen, durch das BMWi geförderten Projekt „Ariadne“ durch eine Vielzahl von Modellläufen in unterschiedlichen Simulations-Tools eine Bandbreite von 30 – 75 g_{CO₂}/kWh für die CO₂-Intensität des deutschen Strommixes für 2030 prognostiziert (vgl. Abbildung 6). Einerseits sind diese Abschätzungen aus dem Ariadne-Projekt deutlich optimistischer als die der meisten anderen Untersuchungen. Andererseits passen diese gut zur verschärften Zielsetzung des Koalitionsvertrags der Bundesregierung unter Kanzler Scholz, welche für 2030 einen Anteil der Erneuerbaren Energien von 80 % am deutschen Strommix vorsieht³ (Koalitionsvertrag 2021, S. 56). Um den deutlich höheren Prognosen anderer Studien Rechnung zu tragen sollen in dieser Arbeit 75 g_{CO₂}/kWh_{Strom} für die CO₂-Intensität des deutschen Strommixes in 2030 angenommen werden. Mit den 75 g/kWh sinkt der CO₂-Fußabdruck für 100 km bei einem Verbrauch von weiterhin 18 kWh/100 km auf nur noch 1,35 kg_{CO₂} pro 100 km. Diese kontinuierliche Verbesserung des Strommixes wirkt sich allerdings nicht nur auf zukünftig gekaufte Fahrzeuge aus, sondern auch ein in 2020 angeschafftes BEV profitiert von dem fortlaufend grüner werdenden Strommix. Bei einer gleichmäßigen Nutzung eines BEV von 2020 bis 2030 und einer linearen Reduzierung des CO₂-Fußabdruckes des Strommixes resultiert eine durchschnittliche CO₂-Intensität von etwa 3 kg pro 100 km.

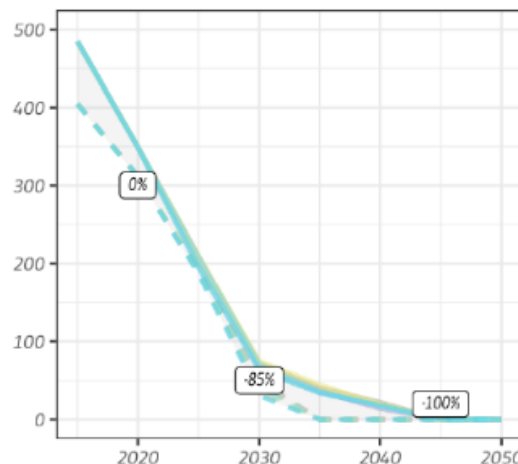


Abbildung 6: CO₂-Intensität der Stromerzeugung [g_{CO₂}/kWh] über verschiedene Simulationsmodelle
Quelle: Luderer et al. (2021)

Zwischenfazit CO₂-Bilanz BEV:

*Unter Berücksichtigung der Umlage von 4 kg_{CO₂} pro 100 km aus der Fahrzeugfertigung und etwa 3 kg_{CO₂}/100 km für den Stromverbrauch fallen im Mittel bis 2030 in Summe überschlägige **7 kg_{CO₂}/100 km** für ein BEV an. Diese grobe Abschätzung deckt sich weitestgehend mit ausführlichen Berechnungen in Bieker (2021).*

5.3 CO₂-Fußabdruck bei der Herstellung von Brennstoffzellen-PKW

Zunächst soll für die Fertigung des Chassis exklusive des Antriebs für das FCEV mit 6,5 t_{CO₂}/100 km derselbe Wert wie für das BEV angenommen werden (vgl. Kapitel 5.1 bzw. Bieker 2021). Dazu kommen beim FCEV insb. die spezifischen Emissionen der Brennstoffzelle und der Wasserstofftankfertigung.

³ Für eine überschlägige Abschätzung der CO₂-Intensität des eines Strommixes mit 80 % EE-Anteil im Jahr 2030 können 55 % Windstrom (Emissionsfaktor ~13 g_{CO₂}/kWh_{Wind}, gemittelt aus On- und Offshore), 25 % PV-Strom (Emissionsfaktor ~56 g_{CO₂}/kWh_{PV}) und 20 % Strom aus Erdgaserzeugung (409 g_{CO₂}/kWh_{Erdgas-Strom}) verrechnet werden (Emissionsfaktoren nach Umweltbundesamt 2021a und Umweltbundesamt 2021b). Damit ergeben sich rund 100 g_{CO₂}/kWh_{Strommix} für 2030, wobei sich die Emissionsfaktoren der erneuerbaren Energieträger durch nachhaltigere Herstellung vermutlich noch verbessern werden.

Für die Herstellung der Brennstoffzelle schätzen Sternberg et al. (2019) in Ihrem Base-Case etwa 31 (16) $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kW}_{\text{Leistung}}$ für 2020 (2030) ab. Bei einer angenommenen Leistung der Brennstoffzelle von 120 kW ergeben sich somit 3,7 bzw. knapp 1,9 $\text{t}_{\text{CO}_2_{\text{äq}}}$ aus der Brennstoffzellenfertigung für 2020 bzw. 2030. Für die Fertigung eines 5-kg Wasserstofftanks ergeben sich im Base-Case auf Basis von Sternberg et al. (2019) 2,4 (1,65) $\text{t}_{\text{CO}_2_{\text{äq}}}$ für 2020 (2030) aus der Fertigung. Zusammen ergeben sich auf Basis dieser Werte 6,1 bzw. 3,55 $\text{t}_{\text{CO}_2_{\text{äq}}}$ aus der Fertigung der wasserstoffspezifischen Komponenten. Dies deckt sich mit den Annahmen der ICCT, welche 3,4 (4,2) $\text{t}_{\text{CO}_2_{\text{äq}}}$ für ein kleines (großes) FCEV annehmen (Bieker 2021). Auf Basis der Werte für 2030 ergeben sich somit in Summe somit bestenfalls 10 $\text{t}_{\text{CO}_2_{\text{äq}}}$ aus der Fertigung, was ziemlich genau dem ermittelten Wert für aktuelle BEV entspricht (vgl. Kapitel 5.1).

5.4 CO₂-Fußabdruck beim Betrieb von FCEV

Die Emissionen beim Betrieb von FCEV hängen vom spezifischen Wasserstoffverbrauch aber insb. auch vom zugrunde gelegten CO₂-Fußabdruck des verwendeten Wasserstoffs ab. Der Verbrauch aktueller FCEV kann mit etwa 1 kg/ 100 km abgeschätzt werden (vgl. Kapitel 4.2.3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Komplizierter ist die Lage hinsichtlich der Klimawirkung des eingesetzten Wasserstoffs. Zunächst muss hier zwischen verschiedenen Herstellungsverfahren unterschieden werden.

Grauer Wasserstoff wird aus der Reformierung aus Erdgas gewonnen. Sternberg et al. (2019) nehmen hierfür einen Fußabdruck von 318 g/kWh_{H₂} (10,6 kg_{CO₂}/kg_{H₂}) an, Bukold (2020) und Parkinson et al. (2019) gehen mit 372 bzw. 398 g/kWh_{H₂} von etwas höheren Werten aus. Howarth und Jacobson (2021) kommen unter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen des Erdgases sogar auf 550 g/kWh_{H₂}. Selbst die optimistischen Werte sind dabei jedoch noch deutlich höher als bspw. die direkten Emissionen von Erdgas (rd. 200 g/kWh). Dieser Pfad ist somit inkompatibel mit dem Ziel der Klimaneutralität und wird daher nicht weiterverfolgt.

Bei „blauem“ Wasserstoff handelt es sich ebenfalls um Wasserstoff aus der Reformierung von Erdgas, jedoch unter Abscheidung und anschließender Sequestrierung des Großteils des anfallenden CO₂ aus dem Abgasstrom mittels Carbon Capture and Storage (CCS). Allerdings benötigt der CCS-Prozess erhebliche Mengen zusätzlicher Energie, praktisch also deutlich mehr Erdgas als die Reformierung allein, wodurch der Einfluss der Vorkettenemissionen der Erdgasbereitstellung erheblich steigen. Weiterhin wächst der ökonomische und energetische Aufwand mit zunehmender Abscheiderate, daher erreichen aktuelle Projekte in der Regel nur Abscheideraten von etwa 90 % - die übrigen 10 % des (erhöhten) Energiebedarfs werden trotzdem in die Umwelt entlassen. In einer überschlägigen Abschätzung schlägt Bukold (2020) auf Basis weiterer Quellen eine spezifische CO₂-Intensität blauen Wasserstoffs von etwa 183 g_{CO₂}/kWh_{H₂} vor. Howarth und Jacobson (2021) allerdings kamen in einer detaillierten und viel beachteten Studie unter expliziter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen zu einem deutlich höheren Wert von 493 g_{CO₂}/kWh_{H₂}. Ähnlich wie beim grauen Wasserstoff sind auch hier die Emissionen erheblich und kaum in Einklang mit dem Ziel der Klimaneutralität zu bringen. Darüber hinaus wird der Bedarf an endlichem, fossilem Erdgas im Vergleich zur herkömmlichen Produktion sogar noch gesteigert. Aus diesen Gründen wird auch der Ansatz des blauen Wasserstoffs hier nicht weiter verfolgt.

„Grüner“ Wasserstoff wird mittels Elektrolyse auf Basis von Strom erzeugt. Daher ergeben sich die Emissionen (unter Vernachlässigung des CO₂-Rucksacks der notwendigen Anlagen und Komponenten) vor allem aus der CO₂-Intensität des Strommixes. Dabei werden für den aktuellen Strommix 400 g_{CO₂}/kWh_{Strom} angenommen. Analog zur Untersuchung der BEV wird jedoch auch hier eine Reduktion des Carbon Footprint auf 75 g_{CO₂}/kWh_{Strom} für 2030 unterstellt. Langfristig, bzw. für eine Wasserstoffproduktion rein auf Basis erneuerbarer Energie im Ausland, wird eine minimale CO₂-Intensität von 30 g_{CO₂}/kWh_{EE-Strom} für einen Strommix aus Wind- und Solarstrom angenommen. Hinsichtlich des Wirkungsgrads der Umwandlung von Strom in Wasserstoff sind

bis zu 83 % (bezogen auf den Heizwert und unter Umgebungsbedingungen) thermodynamisch möglich (Harrison et al. 2010). In der Praxis liegen schon die sog. „Stack“-Wirkungsgrade deutlich unter diesem Optimum, wobei zusätzlich Verluste für die Hilfsanlagen (Transformatoren, Wechselrichter, etc.) reale Systemwirkungsgrade auf gegenwärtig auf einen Bereich von 43-67 % bezogen auf den Heizwert (bzw. 51-79 % bezogen auf den Brennwert; vgl. Brinner et al., 2018, S. 43) reduzieren. Für 2030 erwartet das Wuppertal Institut jedoch eine Steigerung dieses Systemwirkungsgrads auf bis zu 68 % (bzw. 80 % bezogen auf den Brennwert, Brinner et al. 2018, S. 43).

	CO ₂ -Intensität Strom [g _{CO2} /kWh _{Strom}]	Wirkungsgrad Elektrolyse	CO ₂ -Bilanz Wasserstoff [g _{CO2} /kWh _{H2}]
Netzstrom 2020	400	43-67 %	930-597
Netzstrom 2030	75	68 %	110
100 %-EE	30	68 %	44
Blauer Wasserstoff	-	-	200
Grauer Wasserstoff	-	-	400

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Auswirkungen der angenommenen CO₂-Intensitäten und Elektrolyse-Wirkungsgrade.

Tabelle 1: Überblick über die Annahmen hinsichtlich der CO₂-Bilanz

	CO ₂ -Intensität Strom [g _{CO2} /kWh _{Strom}]	Wirkungsgrad Elektrolyse	CO ₂ -Bilanz Wasserstoff [g _{CO2} /kWh _{H2}]
Netzstrom 2020	400	43-67 %	930-597
Netzstrom 2030	75	68 %	110
100 %-EE	30	68 %	44
Blauer Wasserstoff	-	-	200
Grauer Wasserstoff	-	-	400

Nach der Herstellung muss der Wasserstoff im Falle einer Produktion im Ausland nach Deutschland transportiert werden. Dafür stehen zwei Transportoptionen zur Verfügung. Der Schifftransport erfordert eine Verflüssigung des Wasserstoffs bei -253 °C, für welche aktuell etwa 30 % (perspektivisch mindestens 20 %) der transportierten Energie zusätzlich zugeführt werden müssen (Element Energy 2018, S. 60 Nationaler Wasserstoffrat 2021, S. 3 U.S. Drive 2017, S. 6). Dazu kommen die „Boil-Off“ Verluste während des Schifftransports, da der Wasserstoff unterwegs nur so auf dieser geringen Temperatur gehalten werden kann. Da es aktuell nur ein erstes, vergleichsweise kleines Versuchsschiff der Firma Kawasaki für den Transport von flüssigem Wasserstoff gibt, müssen zukünftige Boil-Off-Raten aktuell noch abgeschätzt werden. Bei flüssigem Erdgas belaufen sich diese aktuell auf etwa 0,1 – 0,15 % der transportierten Energie pro Tag (Hasan et al. 2009, S. 9572). Da flüssiger Wasserstoff mit -253 °C noch kälter transportiert werden muss als LNG (-167 °C), könnten die Verluste auch etwas höher sein, weshalb einige Studien Verdampfungsraten bis 0,3 % pro Tag vorschlagen (Merten et al. 2020, S. 35). Zuletzt muss der flüssige Wasserstoff in Europa rückvergast und via Pipeline verteilt werden. Unterm Strich muss bei dieser Transportoption also etwa mit einer Erhöhung der spezifischen Emissionen um rund 30 % gerechnet werden.

Alternativ wird für Importe insb. aus Nordafrika auch die Option neuer Gaspipelines erwogen, welche allerdings noch in großer Zahl zu bauen wären. So ermittelt die ENTSOG eine Energietransportrate von 13 GW für das größte, gängige Pipelineformat mit 48 Zoll Durchmesser, das mit bis zu 5000 Volllaststunden verwendet werden könnte (Wang et al. 2020, S. 4). Daraus ergibt sich eine jährliche Transportkapazität von bis zu 65 TWh.

Dies ist einerseits deutlich mehr als mit Stromleitungen möglich, andererseits erwarten viele Studien Wasserstoffbedarfe für Deutschland von 500 – 1500 TWh (allein der Verkehrssektor bräuchte bis zu 350 TWh Wasserstoff); für ganz Europa erwartet die Studie der ENTSOG einen Bedarf von 1700 TWh. Sollte dieser Bedarf zu großen Anteilen über einen Import aus Nordafrika gedeckt werden, müssten bis zu 25 dieser größten Pipelines durch Europa verlegt werden. Doch auch bei diesem Ansatz muss der Wirkungsgradverlust bedacht werden. Auf langen Transportstrecken muss das transportierte Gas regelmäßig zwischenverdichtet werden, um die Reibungsverluste der Leitung auszugleichen. Für diese Zwischenverdichtung werden in großen Erdgasleitungen heute Radialverdichter eingesetzt. Die Transportverluste beim Erdgas hängen stark von der Auslastung und dem Typ der Transportleitung ab. In einer Studie für das Umweltbundesamt werden sie im Schnitt aber mit 2,6 % pro 1000 km für Erdgas (mit 5 Vol.-% Wasserstoff) abgeschätzt (Schütz und Härtel 2015, S. 57); Klein und Kauffmann (2019, S. 19) gehen eher von 3 % aus. Die Energie für die Zwischenverdichtung wird dabei dem Erdgasstrom entnommen. Hinsichtlich des Transports von reinem Wasserstoff müsste dieser Prozess jedoch vermutlich deutlich angepasst werden. So würden die Schaufeln der aktuell verwendeten Radialverdichter aufgrund des geringen molekularen Gewichts und der geringen Dichte des Wasserstoffs weitestgehend „ins Leere schlagen“ und daher keine ausreichende Verdichtung erreichen. Dieses Problem könnte durch eine deutliche Erhöhung der Drehzahl gelöst werden, was jedoch umfassende Anpassungen des Verdichterdesigns erforderlich macht, u.a., um den sehr hohen Zentrifugalkräften widerstehen zu können (U.S. Drive 2017, S. 14). Diese Verdichter sind aktuell noch im Forschungsstadium, könnten laut der “European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulation” (ACER) jedoch in 2030 kommerziell einsatzbereit sein (ACER 2021, S. 6). Hinsichtlich des Energiebedarfs der Zwischenverdichtung erwartet die ACER für diese noch zu entwickelnden Verdichter etwa eine Verdreifachung des Energiebedarfs, woraus sich Verluste von bis zu 7,8 % pro 1000 km ableiten ließen (bei 5000 Straßenkilometern von Ad-Dakla in der vielversprechenden Region West-Sahara in Marokko bis Berlin entspräche dies Verdichtungsverlusten von knapp 40 %). Krieg (2012) gibt Verluste von etwa 1-2 % für ein Pipelinenetz von 250 km an, allerdings eher bezogen auf ein Verteilnetz mit geringerem Durchmesser (Krieg 2012, S. 163), das Wuppertal Institut geht von etwa 8 % Verlust auf 1000 km aus (Merten et al. 2020, S. 35). Lediglich die „European Hydrogen Backbone“-Studie geht nach einer Optimierung bzw. Reduzierung der Fließgeschwindigkeit von deutlich niedrigeren Transportverlusten von 1,5-2,3 % pro 1000 km für die größten Pipelinedurchmesser aus (Wang et al. 2020, S. 11). In Anbetracht der vielen zu berücksichtigenden Randbedingungen sowie der Tatsache, dass die notwendigen Verdichter bisher noch gar nicht existieren, ist die große Bandbreite an Schätzungen nachvollziehbar, macht aber natürlich eine Bestimmung der Transportverluste besonders schwierig. Als Kompromiss aus den Überlegungen der genannten Autoren soll hier von einem Verlust von 5 % auf 1000 km ausgegangen werden. Bei Pipeline Strecken von überschlägigen 5000 km aus Nordafrika bewegen sich damit die Verluste mit rund 25 % geringfügig unter den Verlusten des Schiffstransports. Dieser geringe Vorteil kommt jedoch zu einem Preis: Während die energieintensive Verflüssigung im Erzeugungsland mit günstigem, grünem Strom erfolgen kann, so muss die Verdichtung entlang der Transportleitung erfolgen. Die könnte durch Entnahme eines Teils des Wasserstoffstroms für eine Turbine zum Antrieb für den Verdichter erfolgen, allerdings gibt es aktuell auch noch keine geeigneten Turbinen, die auf Basis von reinem Wasserstoff operieren würden. Weiterhin müssten ggf. deutliche, zusätzliche Effizienzabschläge durch den Turbinenbetrieb berücksichtigt werden. Vermutlich aus diesem Grund nimmt die Hydrogen Backbone Studie implizit den Einsatz elektrischer Verdichter an (Wang et al. 2020, S. 11). Dies aber bedeutet, dass große Mengen „kostbaren“ europäischen Stroms eingesetzt werden müssen, um den Wasserstofftransport zu realisieren. So scheint es fast paradox, über

Beim Wasserstofftransport sowohl mittels Pipeline wie auch verflüssigt via Schiff fallen erhebliche Transportverluste zwischen 25% und bis über 30% der transportierten Energie an.

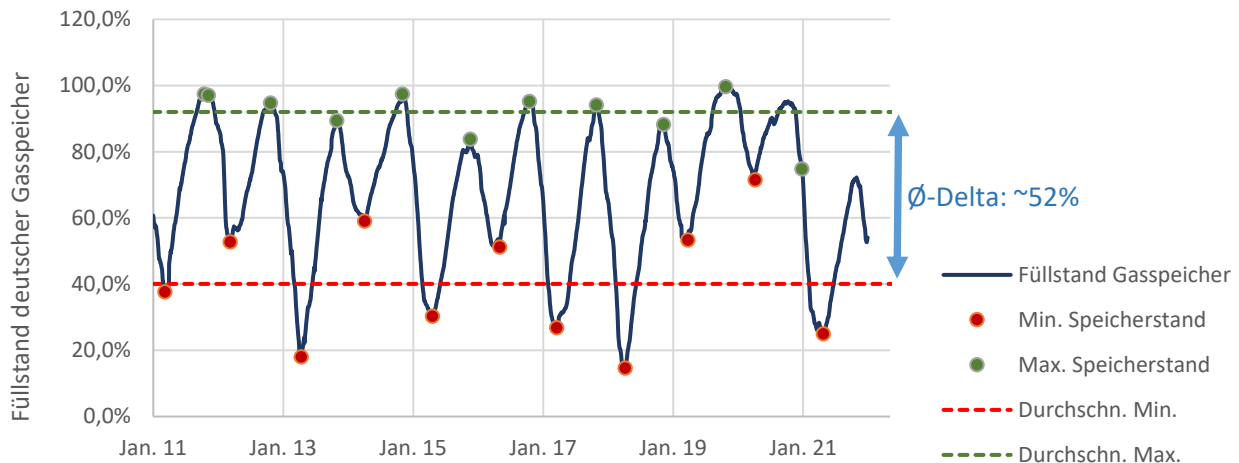


Abbildung 7: Füllstand deutscher Gasspeicher zeigen einen Nutzungsgrad von rund 52% pro Jahr
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten AGIS (2022)

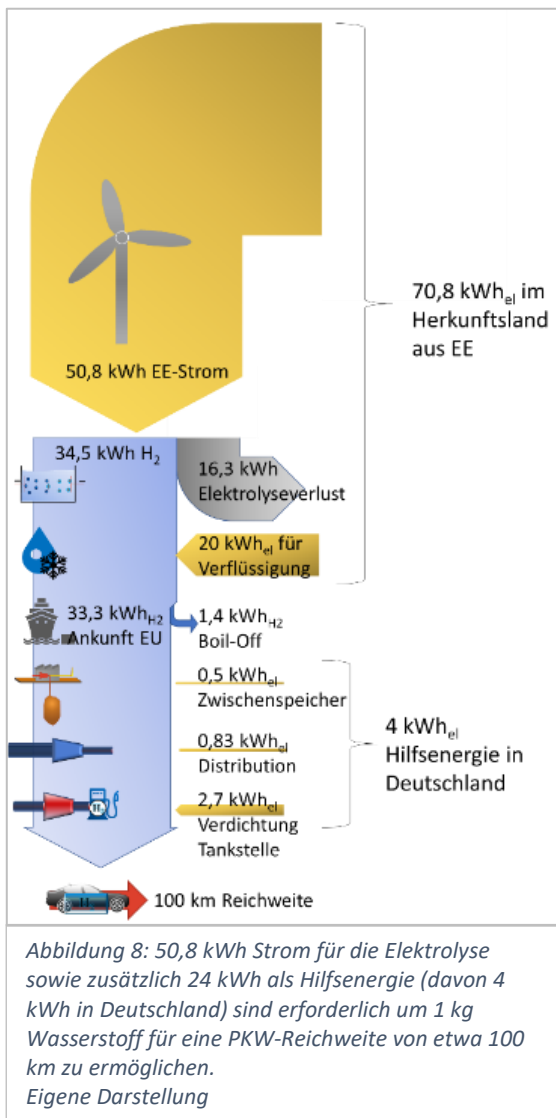
Anwendungsfälle wie Wasserstoff-Turbinen zur Stromerzeugung nachzudenken, welche bspw. bei einem Wirkungsgrad von 40 % aus 100 kWh Wasserstoff 60 kWh Strom erzeugen, wenn davon rund 25 kWh nur für die Verdichterarbeit des Langstreckentransportes zur Bereitstellung neuen Wasserstoffs eingesetzt werden müssten. Aus diesen Gründen, und da mittelfristig (bis in die 2030er Jahre) kaum ein umfassendes Leitungsnetz zu erwarten ist, wird für die weitere Betrachtung von einem Import via Schiff ausgegangen, weshalb allerdings die Energieverluste für die Verflüssigung (etwa 30 %) im Carbon Footprint berücksichtigt werden müssen.

Unabhängig davon, ob Wasserstoff heimisch produziert oder aber importiert wird besteht eine wichtige Eigenschaft des Wasserstoffs in seiner guten Speicherbarkeit. So erlauben relativ günstige Salzkavernenspeicher die Einlagerung großer Mengen von Wasserstoff in Überschusszeiten (bspw. im Sommer, bei großer heimischer Solarstromproduktion) und ein Ausspeichern im Winter (bspw. wenn ein etwaiger Heizenergiebedarf mit Wasserstoff hoch wäre). Die Speicherung in Druckgas-Kavernen bei mehreren hundert Bar Druck erfordert jedoch eine weitere energieintensive Kompression des Wasserstoffs. Obwohl dieser Prozess in mehreren großen Forschungsvorhaben untersucht wurde, konnten im Rahmen der Recherche für diesen Bericht nur einige wenige verlässliche Abschätzungen hinsichtlich des Speicherwirkungsgrades bzw. der benötigten Hilfsenergie zur Verdichtung ermittelt werden. Lediglich Fuel Cell and Battery Consulting (2011, S. 22) geben einen Speicherwirkungsgrad von etwa 90 % an. Welcher Anteil des Wasserstoffs direkt von der Produktion/ dem Import an den Verbraucher geleitet werden kann bzw. welcher Anteil zwischengespeichert werden müsste, hängt stark von den Bereitstellungs- und Verbrauchsszenarien ab. Bei konventionellem Erdgas weist Deutschland gegenwärtig einen Verbrauch von 989 TWh pro Jahr auf (Klein und Kauffmann 2019). Dabei fassen die Erdgasspeicher ein Arbeitsgas-Speichervolumen von etwa 263 TWh; von denen im Durchschnitt lediglich rund 52 %, also etwa 137 TWh, jedes Jahr genutzt werden (AGIS 2022, vgl. Abbildung 7). Bezogen auf den Gesamtverbrauch entspricht dies rund 14 %, was im Umkehrschluss bedeutet, dass etwa 86 % des Erdgases nicht zwischengespeichert wurden.

Für die hier angestrebte, lediglich sehr grobe Abschätzung soll dieser Wert des Erdgases auf die zukünftige Verwendung von Wasserstoff übertragen werden. Somit soll angenommen werden, dass bei 14 % des zwischengespeicherten Wasserstoffs 10 % des Energiegehalts an Strom mit dem CO₂ Fußabdruck für Deutschland vom Zieljahr (2030) eingesetzt werden muss, was umgelegt 1,4 % des Gesamtwasserstoffbedarfs entspricht. Bei einer gezielten saisonalen Speicherung könnte dieser Wert jedoch auch deutlich höher ausfallen und sollte in solchen Szenarien entsprechend angepasst werden.

Auch die Emissionen der Distribution des Wasserstoffs zu den Tankstellen hängen sehr stark vom ausgewählten Distributionskonzept ab. Reuß et al. (2019) stellen verschiedene Optionen vor und ermitteln eine Distribution mittels (neu zu bauenden) Gasleitungen bis zu regionalen Verteilerstellen und eine anschließende Auslieferung via Druckwasserstoff-LKW bis zur Tankstelle als günstigste Option. Für die überschlägige Abschätzung nehmen wir hier jedoch an, dass die Tankstellen direkt an ein Wasserstoffverteilnetz angeschlossen sind. Die durchschnittliche Distributionsentfernung vom Importterminal (bspw. am Hafen in Rotterdam) zum Endanwender wird mit rund 500 km angenommen. Mit dem weiter oben ermittelten Hilfsenergiebedarf von 5 % pro 1000 km ergibt sich damit ein durchschnittlicher Bedarf von etwa 1,67 kWh_{Strom} um 1 kg Wasserstoff zu verteilen. Es muss erwähnt werden, dass es sich bei der Verteilung mittels Gasleitungen im Vergleich bspw. mit einer Verteilung mittels LKW um die energieeffizienteste Form handelt und der Transport durch Verteilnetzleitungen mit kleineren Durchmessern ggf. höher ausfällt.

An der Tankstelle muss der Wasserstoff zuletzt noch einmal stark verdichtet werden. So wird meist ein lokaler Zwischenspeichertank mit über 1000 bar Druck befüllt, um bei einem Tankvorgang eine schnelle Übergabe des Wasserstoffs an den Autotank (bei etwa 700 bar) zu ermöglichen. Auch hier weichen die Angaben der einschlägigen Literatur zum Energiebedarf für diese Verdichtung an der Tankstelle deutlich voneinander ab. So verwendet die IEA einen Wert für den Strombedarf von 1,6 kWh_{Strom} / kg_{H2} und das Fraunhofer ISE auf Basis des NREL 2,7 kWh_{Strom} pro kg Wasserstoff, während Kurzweil und Dietlmeier einen Energieaufwand zur Kompression von 12 % (S.487) des Energieinhalts des Wasserstoffs, also 4 kWh_{Strom} pro kg_{H2}, angeben (IEA 2020; Sternberg et al. 2019; Kurzweil und Dietlmeier 2018). Für die Berechnungen hier soll der Wert des ISE bzw. des NREL unterstellt werden, was etwa einem Energieeinsatz von 8,1 % bezogen auf den Heizwert des Wasserstoffs entspricht.



Zusammenfassend lässt sich sagen: Um 100 km Strecke zurückzulegen benötigt ein FCEV rund 1 kg Wasserstoff, also 33,3 kWh_{H₂}. Für die Speicherung in einer Salzkaverne wurde ein Hilfsenergiebedarf von Strom i.H.v. 1,4 %, für die Distribution mittels Pipeline i.H.v. 2,5 % und für die Betankung i.H.v. 8,1 % ermittelt. In Summe entspricht dies im gewählten, energieeffizientesten Fall einem (Strom-)Hilfsenergiebedarf von rund 12 % bzw. 4 kWh_{Strom}/kg_{Wasserstoff}. Eine Übersicht über die Verluste und erforderlichen Hilfsenergien bei einem Import via Schiff sind in Abbildung 8 dargestellt.

Falls im Produktionsland für den Wasserstoff tatsächlich ausschließlich grüner Strom aus Wind- und Solarenergie zum Einsatz kommt (mit der zuvor angenommenen CO₂-Intensität von 30 g_{CO₂_äq}/kWh_{el} in 2030) und die Hilfsenergie in Deutschland mit dem Ziel-Strommix für 2030 bereitgestellt wird (75 g_{CO₂_äq}/kWh_{el}), so ergeben sich in Summe nur durch den Betrieb Emissionen i.H.v. 2,4 kg_{CO₂_äq} pro kg_{Wasserstoff} bzw. pro 100 gefahrenen Kilometern.

Wird der Wasserstoff in Deutschland erzeugt, entfällt der Hilfsenergiebedarf für die Verflüssigung sowie die Boil-Off-Verluste des Übersee-Transportes. In dem Fall werden etwa 54,8 kWh_{Strom} benötigt, um 1 kg Wasserstoff für 100 Fahrzeugkilometer bereitzustellen. Beim angenommenen CO₂-Fußabdruck von 75 g_{CO₂_äq}/kWh_{el} impliziert dies Emissionen von 4,11 kg auf 100 km.

Zwischenfazit CO₂-Bilanz FCEV

Zu der Abschreibung von 4 kg_{CO₂} pro 100 km aus der Fahrzeugfertigung resultieren bei vollständig erneuerbarer Wasserstoffherzeugung in Nordafrika etwa 2,4 kg_{CO₂}/ 100 km und bei Wasserstoffproduktion mit dem angenommenen deutschen Strommix für 2030 4,11 kg_{CO₂}/ 100 km an spez. CO₂-Emissionen, woraus **6,4 bzw. 8,11 kg_{CO₂_äq} pro 100 km** bei Nutzung von grünem Wasserstoff für ein zukünftiges FCEV resultieren. Für blauen und grauen Wasserstoff hingegen ergeben sich 6,7 bzw. 13,3 kg_{CO₂}/ 100 km.

5.5 Abschließender Vergleich der ökologischen Nachhaltigkeit von FCEV und BEV

Bei der Fahrzeugherstellung fallen aktuell beim BEV noch immer erhebliche Emissionen bei der Batteriefertigung an, welche aber insb. durch einen zukünftig CO₂-ärmeren Strommix in der Fertigung deutlich zurückgehen werden. Diese batteriebezogenen Emissionen fallen beim FCEV in geringerem Maße an, da lediglich eine kleine Puffer-Batterie notwendig ist. Dafür sind mit der Brennstoffzelle und den Hochdrucktanks andere energieintensive Komponenten erforderlich. Tatsächlich ergab die Literaturschau, dass sich beide Faktoren in etwa ausgleichen und beide PKW-Typen aktuell etwa einen Klimarucksack in der Größenordnung von 10 t_{CO₂_äq} aus der Fertigung mitbringen.

Im Verbrauch erwies sich das BEV als deutlich sparsamere Option (rund 18 kWh_{el} statt 33 kWh_{H₂} pro 100 km). Dies spiegelt sich auch im CO₂-Fußabdruck wieder: Selbst „sehr grüner“ Wasserstoff ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energien resultiert in Emissionen für das FCEV i.H.v. 2,4 kg auf 100 km; beim BEV sind es selbst in einem Szenario mit rd. 80 % EE-Anteil (gemäß Koalitionsvertrag 2021) in 2030 mit rund 1,35 kg/100 km nur gut die Hälfte. Anders herum betrachtet ist ein FCEV im Verbrauch vorteilhaft, wenn grüner Wasserstoff ohne fossile Emissionen bei der Herstellung oder beim Transport des Treibstoffs importiert werden kann, der deutsche Strommix jedoch eine höhere CO₂-Last als 152 g_{CO₂_äq}/kWh aufweist. Bei Verwendung von heimischem Wasserstoff entstehen, selbst bei deutlicher Senkung der CO₂-Belastung auf 75 g/kWh bis 2030, noch immer deutlich höhere Emissionen von 4,11 kg/100 km. Anders herum müsste der grüne Wasserstoff in Deutschland mit weniger als einem Drittel des CO₂-Fußabdrucks hergestellt werden, mit dem das Laden eines BEV belastet ist, um ökologisch als vorteilhafter angesehen zu werden. In Anbetracht der hohen notwendigen Volllaststunden für einen ökonomischen Betrieb von Elektrolyseuren (deutlich über 3000 h/a, vgl. International Energy Agency, 2019) scheint es sehr unwahrscheinlich, dass der Strommix für die Elektrolyse so erheblich grüner sein kann als der durchschnittlich für das Laden der BEV verwendete Strom.

Insgesamt ergibt die Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit somit, dass BEV in Hinblick auf den CO₂-Fußabdruck in nahezu allen plausiblen Fällen als vorteilhaft gegenüber FCEV erscheint. In Hinblick auf die unzureichende Nachhaltigkeit bezüglich der Verwendung seltener Rohstoffe wird erwartet, dass beide Technologien dieser Ressourcen-Problematiken in den nächsten Jahren durch das Ausweichen auf unkritische Alternativrohstoffe weitestgehend beheben können.

Abschließend soll ein kurzer Vergleich zu einem herkömmlichen Diesel-Verbrenner gezogen werden. Nach Bieker (2021) S. 64 werden bei der Produktion eines Dieselfahrzeugs rund 7,2 t_{CO₂} emittiert, also tatsächlich rund 3 Tonnen weniger als bei BEV und FCEV. Allerdings verbraucht ein durchschnittlicher Diesel etwa 7 l Kraftstoff pro 100 km, was einem Ausstoß von gut 18 kg_{CO₂} entspricht. Beim heutigen Strommix fallen beim BEV wie oben berechnet nur 7,2 kg für die gleiche Strecke, also 10,8 kg weniger, an. Damit ist der ökologische Vorsprung des Diesels schon heute bereits nach knapp 30.000 km egalisiert.

6 Akzeptanzaspekte

Um eine gesellschaftlich breit akzeptierte Mobilitätswende zu schaffen, müssen die individuellen Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer*innen zuverlässig bedient werden. Die Nutzer*innen müssen daher im Mittelpunkt aller Diskussionen um neue Technologien und Dienstleistungen zur Verbesserung der alternativen Mobilität im Individualverkehr stehen. Welche Kriterien bei der Anschaffung eines alternativ angetriebenen PKW, z. B. eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) oder Brennstoffzellenfahrzeugs (FCEV), aus Sicht der Nutzer*innen relevant sind und welche Faktoren einer Anschaffung hemmend gegenüberstehen, wurde daher in dieser Studie untersucht. Denn eine hohe Nutzerzufriedenheit kann nur erreicht werden, wenn die Nutzerbedürfnisse, auf denen die berücksichtigten Kriterien beruhen, zu einem hohen Grad erfüllt werden. Nur so ist es möglich die breite Masse der Fahrzeugkäufer*innen bzw. -nutzer*innen von neuen alternativen Fahrzeugantriebstechnologien zu überzeugen.

In Bezug auf BEV wurden schon einige Studien zur Erforschung von Hemmnissen und Anschaffungsüberlegungen durchgeführt (NewMotion 2021; VDA 2021; BDEW 2019). Da FCEV momentan noch kaum am Markt erhältlich sind, ist die Studienlage aus der Sicht möglicher Nutzer*innen spärlich. Die Datenerhebung für beide Antriebstechnologien erfolgte in der vorliegenden Studie mit dem Ziel eines technologischen Vergleichs. Konkret wurde untersucht, welche PKW-Anschaffungskriterien und Hemmnisse aus der Perspektive von Fahrer*innen von FCEV und BEV sowie entsprechend Interessierten relevant sind. Unter Verwendung des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) – einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse

– zielt diese Studie darauf ab, die subjektive Wichtigkeit einer Auswahl von PKW-Anschaffungskriterien zu ermitteln. Basierend darauf werden BEV und FCEV miteinander näher verglichen.

Sieben Kriterien haben sich als besonders relevant für die Anschaffung eines PKW erwiesen:

- *Gesamtkosten,*
- *Reichweite,*
- *Lade- bzw. Tankdauer,*
- *Verfügbarkeit Infrastruktur,*
- *Treibhausgasemissionen,*
- *Geräumigkeit,*
- *Fahrdynamik.*

Die Wichtigkeit dieser Kriterien sowie die Hemmnisse beim Kauf eines FCEV bzw. BEV wurden anhand einer quantitativen empirischen Umfrage genauer untersucht. Darüber hinaus wurden sozio-demografische Daten und Daten zum Mobilitätsverhalten der Umfrageteilnehmer*innen erfragt. Über unterschiedliche Kanäle (Foren, Podcasts, Newsletter etc.), die im Zusammenhang mit elektrischer Mobilität stehen, wurde der Aufruf zur Umfrage geteilt.

Insgesamt haben 569 Führerscheininhaber*innen (darunter 394 BEV-Erfarene und 17 FCEV-Erfarene⁴) an der Umfrage teilgenommen. Ungefähr 90 % der Teilnehmenden sind männlich und ca. 70 % sind älter als 40 Jahre. Über 60 % haben einen Fachhochschul- oder Universitätsabschluss oder sind zudem promoviert. Nur ein Viertel der Teilnehmenden hat keine beruflichen Berührungspunkte mit Wasserstoff, (Elektro-)Mobilität, Energie oder Technik. Ungefähr 85 % haben ein Nettohaushaltseinkommen von mehr als 2.500 € pro Monat. Der typische Verbraucher, der sich für FCEV und BEV interessiert, ist demnach gutverdienend, gebildet, vorwiegend männlich und mittleren oder höheren Alters. Ähnliche Beobachtungen bzgl. der Zusammensetzung von Stichproben von Fahrer*innen und Interessierten von/an elektrifizierten PKW wurden in früheren Studien gemacht (Römer und Steinbrecher 2021; NewMotion 2021; Haustein und Jensen 2018; Hackbarth und Madlener 2016).

6.1 Hemmnisse bei der Anschaffung von FCEV und BEV

Zunächst ist zu sagen, dass es zurzeit aufgrund des geringen Angebots an FCEV⁵ schwer möglich ist, ein FCEV als Privatperson zu erwerben (ACEA 2021). Demnach wurde in der Umfrage ein hypothetisches Szenario unterstellt, nach dem es grundsätzlich möglich ist, ein FCEV zu kaufen. Welche Hemmnisse FCEV-Erfarene (N=17) und FCEV-Unerfarene (N=552) bei der Anschaffung eines FCEV sehen, ist in Abbildung 9 dargestellt.

⁴ BEV- bzw. FCEV-Erfarene sind Menschen, die durch Sharing Angebote, Besitz, Firmenfahrzeuge oder Mietwagen Erfahrung mit BEV bzw. FCEV gesammelt haben.

⁵ Der Bestand an wasserstoffbetriebenen Pkw lag Anfang 2022 bei 1211 (KBA 2022).

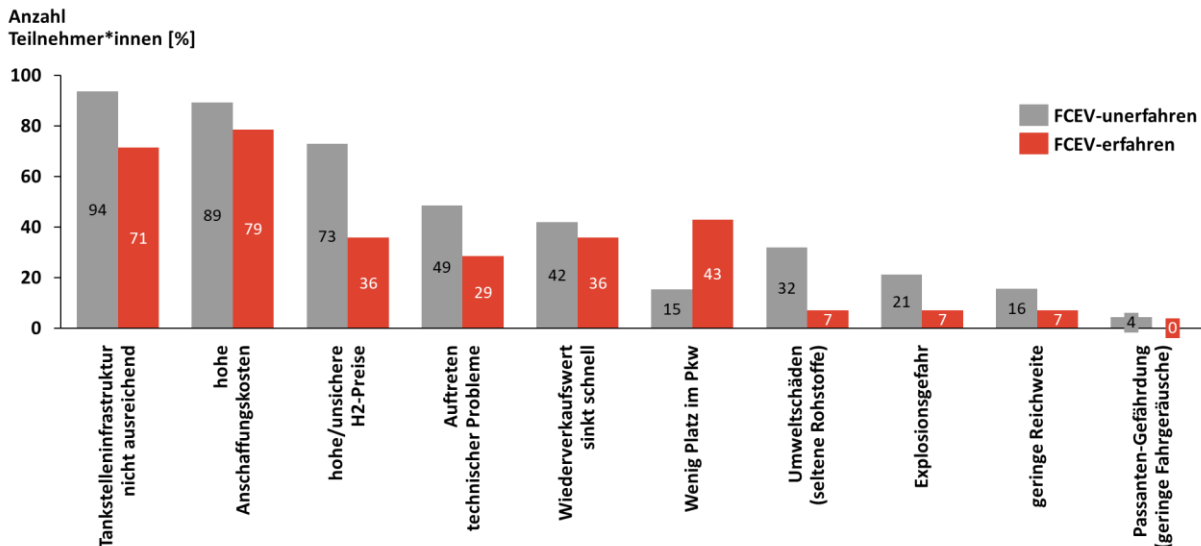


Abbildung 9: Hemmnisse bei Anschaffung eines FCEV aus Sicht FCEV-Erfahrener und -Unerfahrener

Einer Kaufentscheidung zugunsten eines FCEV stehen vor allem die hohen Anschaffungskosten und Wasserstoffpreise sowie die mangelnde Tankstelleninfrastruktur im Wege. Auch das Auftreten technischer Probleme und der sinkende Wiederverkaufswert hemmen die positive Entscheidung potenzieller Käufer*innen. Eine mögliche Explosionsgefahr sowie Umweltschäden oder Reichweitenangst spielen dagegen eine verhältnismäßig geringe Rolle. Die Gefährdung von Passanten durch möglicherweise zu geringe Fahrgeräusche stellen ebenfalls kein relevantes Hemmnis dar.

Es ist allgemein zu sehen, dass die Hemmnisse für den Kauf eines FCEV durch die Fahrerfahrung mit FCEV abnehmen. Demnach scheinen die meisten Hemmnisse in der Praxis nicht so problematisch zu sein, wie sie vor Nutzung eines FCEV erscheinen. Nur der Hemmnisfaktor des Platzmangels in FCEV nimmt durch Fahrerfahrung deutlich zu. Es scheint demnach tatsächlich eine Relevanz zu haben, die medial nicht ausreichend kommuniziert wird und dadurch bei Unerfahrenen nur wenig präsent ist.

Welche Hemmnisse BEV-Erfahrene (N=394; davon 189 Besitzer*innen) und BEV-Unerfahrene (N=175) bei der Anschaffung eines BEV sehen, ist in Abbildung 10 dargestellt.

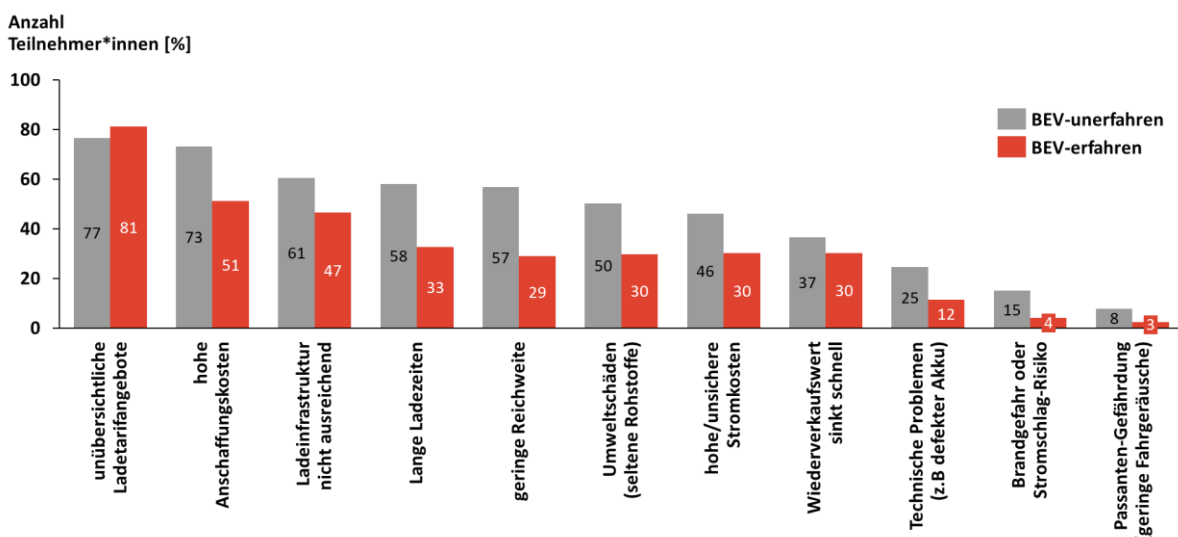


Abbildung 10: Hemmnisse bei Anschaffung eines BEV aus Sicht BEV-Erfahrener und -Unerfahrener

Wie auch bei den FCEV nehmen die Vorbehalte gegenüber BEV mit zunehmender Fahrerfahrung ab. Nur der Hemmnisfaktor der unübersichtlichen Ladetarifangebote, das in den elektromobilitätsaffinen Kreisen sehr verbreitet ist, gewinnt durch Fahrerfahrung an Bedeutung. Das unterstreicht besonders die Relevanz der Problematik des sogenannten „Tarifdschungels“.

Beim Vergleich der Kaufhemmnisse bei FCEV mit jenen der BEV fällt auf, dass die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten eines FCEV eher als Hemmnis eingestuft werden als bei BEV. Auch die Tank- bzw. Ladeinfrastruktursituation wird bei FCEV kritischer eingestuft. Es wird ebenfalls erwartet, dass technische Probleme und Gefahren eher im Zusammenhang mit FCEV als mit BEV auftreten. Bedenken im Kontext der PKW-Reichweite bei vollem Tank bzw. voller Batterie fallen bei BEV größer aus als bei FCEV. Auch entstehende Umweltschäden durch den Abbau benötigter Rohstoffe sorgen tendenziell eher bei BEV als bei FCEV zu einem Kaufhemmnis. Den Wiederverkaufswert sowie die Gefährdung von Passanten durch geringe Fahrgeräusche schätzen die Befragten ähnlich hinderlich ein.

Zurzeit stellen sowohl die Kosten als auch die Herausforderungen, die im Kontext der Tank- bzw. Ladeinfrastruktur auftreten, die größten Hemmnisse bei der Anschaffung von BEV und FCEV dar. In zukünftigen Studien zu den Hemmnissen ist zu untersuchen, ob grundsätzlich weniger skeptische Menschen bevorzugt mit BEV bzw. FCEV fahren oder ob durch die Fahrerfahrung vorliegende Hemmnisse gemindert werden. In jedem Fall kann versucht werden, Hemmnisse von Menschen ohne BEV-/FCEV-Fahrerfahrung durch Informationskampagnen zu reduzieren. Vrain und Wilson (2021) stellen fest, dass der Austausch mit Frühanwendern, die meistens aktive Informationsrecherche betreiben und dadurch mediale Meinungsführer werden, eine wichtige Informationsquelle für „Nicht-Anwender“ darstellt. Bei einer Marktdurchdringung von 0,64 % von BEV können die aktuellen Anwender im Sinne der Diffusionstheorie nach Rogers (1962) noch als Frühanwender („pioneers“ bzw. „innovators“) bezeichnet werden. Der mediale Einfluss (Podcasts, Videoformate, Foren etc.) dieser Frühanwender könnte gezielt genutzt werden, um irrationale Hemmnisse gegenüber der elektrifizierten Mobilität abzubauen.

Fazit Hemmnisse Anschaffung BEV & FCEV

*Sowohl die Anschaffungs- und Treibstoffkosten als auch die Herausforderungen, die im Kontext der Tank-bzw. Ladeinfrastruktur auftreten, werden als größte Hemmnisse bei einer Anschaffung von BEV und FCEV wahrgenommen. Während sich beim BEV unübersichtliche Ladetarifangebote und lange Ladezeiten im Kontext der batterieelektrischen Mobilität hemmend auswirken, ist es bei FCEV die unzureichende Tankinfrastruktur. Neben Maßnahmen zur direkten Verbesserung der Kosten- und Infrastruktur-Situation, könnten Informationskampagnen zukünftigen Nutzer*innen eine realitätsnähere Wahrnehmung der elektrifizierten Mobilität ermöglichen.*

6.2 Gewichtung der Anschaffungskriterien und Vergleich von BEV und FCEV

Von den 569 Teilnehmer*innen der Studie haben 391 Personen die paarweisen Vergleiche zur Gewichtung vordefinierter PKW-Anschaffungskriterien ausreichend konsistent im Sinne der verwendeten AHP-Methode durchgeführt. In Abbildung 11 sind die Gewichtungen dieser Personen sowie zusätzlich der Untergruppen der BEV-Erfahrenen (N=279) und FCEV-Erfahrenen (N=11) illustriert. Die Anschaffungskriterien sind – entsprechend ihrer Wichtigkeit aus Sicht der 391 Personen – hierarchisch absteigend dargestellt. Darüber hinaus ist tabellarisch mit Verweis auf obige Kapitel dargestellt, wie BEV und FCEV in den jeweiligen Kriterien abschneiden.

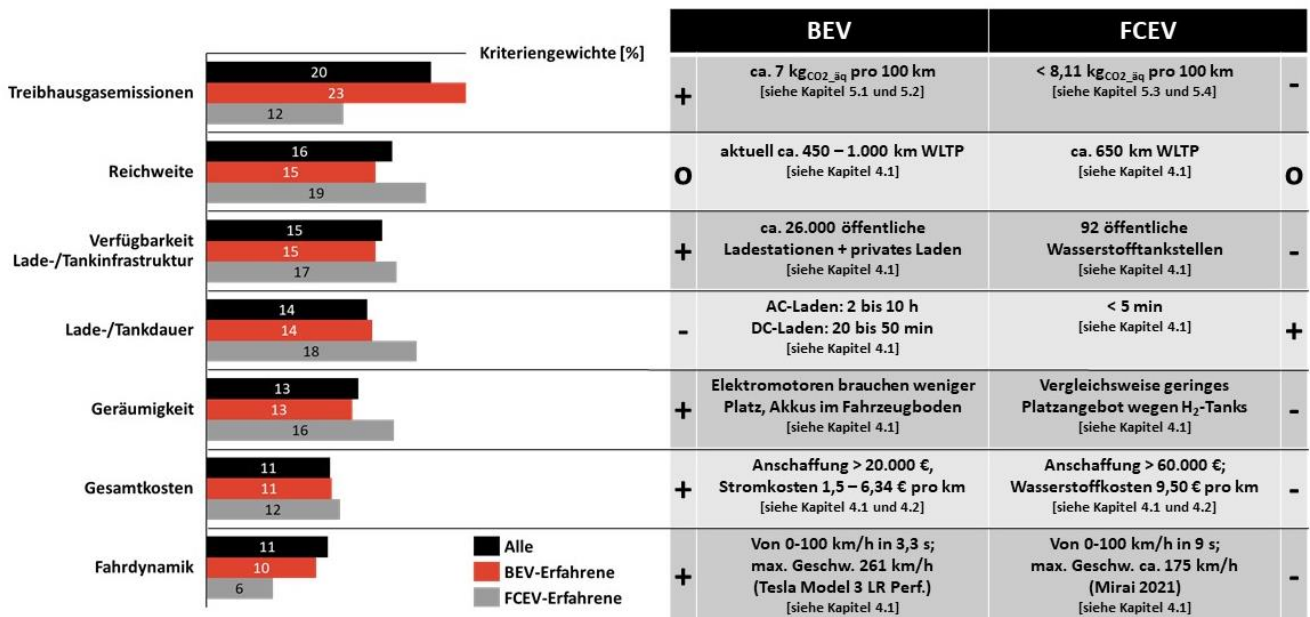


Abbildung 11: Kriteriengewichtung aus der Sicht der gesamten Stichprobe, der BEV und FCEV erfahrenen Teilnehmer*innen sowie Vergleich von BEV und FCEV innerhalb der Kriterien (+ vorteilhaft; 0 ebenbürtig; - unterlegen)

Grundsätzlich ist zu sehen, dass BEV- und FCEV-Erfahrene eine ähnliche Hierarchie bzgl. der Gewichtung der Anschaffungskriterien aufweisen. Es fällt jedoch auf, dass die Reduzierung von *Treibhausgasemissionen* den BEV-Erfahrenen besonders wichtig ist, während diese für FCEV-Erfahrene eher eine untergeordnete Rolle spielen. *Reichweite*, *Lade- bzw. Tankdauer* und die *Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur* haben sowohl für FCEV- als auch für BEV-Erfahrene eine hohe Wichtigkeit. Bei den FCEV-Erfahrenen ist die Wichtigkeit dieser Anschaffungskriterien jedoch noch deutlicher ausgeprägt. Während *Geräumigkeit*, *Gesamtkosten* und *Fahrdynamik* für BEV-Erfahrene ähnlich gewichtet sind und die letzten Plätze in der Hierarchie belegen, ist die *Geräumigkeit* noch deutlich wichtiger für FCEV-Erfahrene als die *Gesamtkosten*. Die *Fahrdynamik* ist mit Abstand am unwichtigsten.

Die Interpretation der Gewichtungen aus den Perspektiven der Teilgruppen kann in zukünftigen Studien genauer untersucht werden. Im Folgenden wird ein Fazit bzgl. des Vergleichs von BEV und FCEV aus der Sicht aller ausreichend konsistenten Umfrageteilnehmer*innen gezogen: BEV schneiden in fast allen Anschaffungskriterien besser als oder zumindest gleich gut wie FCEV ab. Nur bei der *Lade- bzw. Tankdauer* sind FCEV den BEV überlegen. Da es sich hierbei um ein Kriterium handelt, das nur als mäßig wichtig erachtet wird, kann geschlossen werden, dass die batterieelektrische Mobilität der Wasserstoff-Mobilität im PKW-Bereich – aus Sicht der Führerscheinhalter*innen mit Interesse für elektrifizierte Mobilität⁶ – überlegen ist.

Fazit Anschaffungskriterien und Vergleich BEV & FCEV

Die relevanten PKW-Anschaffungskriterien wurden wie folgt von den Umfrageteilnehmer*innen gewichtet (von wichtig nach weniger wichtig): *Treibhausgasemissionen*, *Reichweite*, *Verfügbarkeit Lade-/Tankinfrastruktur*, *Lade- bzw. Tankdauer*, *Geräumigkeit*, *Gesamtkosten* und *Fahrdynamik*. Auf Basis der ermittelten und gewichteten Kriterien schneiden BEV besser ab als FCEV. Nur beim Kriterium „Lade-/Tankdauer“ sind FCEV den BEV überlegen.

⁶ Es handelt sich sowohl bei FCEV als auch bei BEV um elektrifizierte Fahrzeugkonzepte. In beiden Fällen werden die PKW von Elektromotoren angetrieben.

7 Gesamtschau der Aspekte im PKW-Segment

In der Gesamtbetrachtung zeichnet sich ein überraschend klares Bild ab:

Aus ökonomischer Sicht zeigen sich in dieser Untersuchung batterieelektrische PKW (BEV) den Brennstoffzellen-PKW (FCEV) klar überlegen, da diese sowohl bei Anschaffungs- als auch Betriebskosten aktuell, aber auch längerfristig betrachtet, deutlich günstiger abschneiden.

Bei den ökologischen Aspekten ist der aktuelle CO₂-Fußabdruck der Fertigung sowie die teilweise noch verwendeten kritischen Rohstoffe gegenwärtig problematisch, sowohl für FCEV als auch für BEV. Bei beiden Antriebstechnologien werden aber bereits gegenwärtig deutliche Verbesserungen umgesetzt und für die nahe Zukunft (insb. bei erheblicher Senkung der CO₂-Intensität des Strommixes) sollten diese Ansprüche hinsichtlich der Nachhaltigkeit weitestgehend gelöst werden. Bei den FCEV bleibt jedoch dauerhaft das Problem der geringen Well-to-Wheel-Effizienz, welche bewirkt, dass sämtliche auch noch so geringen Emissionsmengen, die entlang der Wertschöpfungskette des Kraftstoffs anfallen, um ein 2-3-faches gehoben werden. Daraus ergab sich eine ökologische Vorteilhaftigkeit der BEV in nahezu allen Szenarien, insb. im Zusammenspiel mit den verschärften Ausbaupfaden für erneuerbare Erzeugung der deutschen Bundesregierung unter Kanzler Scholz (BMWi 2022).

Hinsichtlich der sozialen Aspekte zeichnet sich zunehmend ab, dass die historischen Sorgen gegenüber der Batteriemobilität (BEV könnten nicht die notwendigen Reichweiten erzielen oder bräuchten unververtretbar lange Ladepausen) bereits in Anbetracht der heutigen Marktanteile als weitestgehend überwunden betrachtet werden können. Es zeigt sich zudem, dass die Hemmnisse bzw. Bedenken, die bei potentiellen Nutzer*innen in Bezug auf elektrifizierte Mobilität dennoch bestehen, durch aktive Fahrerfahrung deutlich abnehmen. Es lässt sich daraus schließen, dass bestehende Vorbehalte in der noch weitgehend fahr-unerfahrenen Bevölkerung unangemessen groß sind und die tatsächliche Nutzerfreundlichkeit von BEV und FCEV nicht korrekt widerspiegeln. Darüber hinaus werden aktuelle Weiterentwicklungen im Prototypenstadium (Feststoffbatterien, Integration der Batterie in die Fahrzeugstruktur, leistungsfähigere/günstigere Zellchemie, energiedichtere Batterie-Packs, etc.) die Anforderungen in den kommenden Jahren noch besser erfüllen und somit diese Nachteile der Batteriemobilität voraussichtlich nahezu vollständig beseitigen können. Auch FCEV erreichen in mancher Hinsicht heute schon eine sehr gute Performanz (bspw. hinsichtlich der Reichweite, Fahrkomfort oder Geräuschintensität des Antriebs). Die Tankgeschwindigkeit und die Reichweite ist gegenwärtig etwas besser als beim BEV, wenn auch noch nicht ganz auf dem Niveau herkömmlicher Verbrenner. Da hier im Wesentlichen physikalische Herausforderungen limitierend sind (der Druckunterschied beim Tankvorgang und erreichbarer Druck im Tank), scheint eine weitere Steigerung hier auf absehbare Zeit mit dem herkömmlichen Verfahren allenfalls nur noch durch eine weitere Steigerung der (bereits sehr hohen) Druckniveaus erreichbar. Das würde jedoch den Energiebedarf für die Verdichtung wie auch die möglichen negativen Folgen eines ggf. berstenden Tanks weiter verschlimmern.

In Summe ergibt sich somit aktuell eine starke Dominanz der Batterieantriebstechnologie, da diese in nahezu jedem betrachteten Aspekt beim individuellen Personenverkehr etwa gleich gut oder besser als die Brennstoffzellentechnologie abschneidet und auf absehbare Zeit kaum Faktoren zu erkennen sind, die diesen Zustand signifikant verändern könnten. Diese Erkenntnis findet sich mittlerweile selbst in den meisten "H₂-philen" Veröffentlichungen. Noch finden sich dort jedoch häufig Szenarien mit gemischten Absatzmärkten, bei denen zumindest ein Anteil der Fahrzeuge wasserstoffbetrieben fahren. Doch selbst dieser Versuch eines scheinbaren Kompromisses scheint bei genauerer Betrachtung wenig überzeugend. Die vorangehend erläuterten Abschätzungen der Kosten zur optimistischen Seite hängen stark von den getroffenen Annahmen bspw. einer sehr hohen Auslastung von Wasserstofftankstellen ab, um die hohen Investitionskosten in

nützlicher Frist abschreiben zu können. Sollte nur ein kleiner Teil der PKW mit Brennstoffzelle fahren, geht diese Rechnung für immer weniger Tankstellen auf. Dies wiederum wirkt sich unmittelbar auf den Akzeptanz-Aspekt der Verfügbarkeit der Tankinfrastruktur sowie den ökonomischen Aspekt des Zapfsäulenpreises aus. Demnach ergibt sich damit die Gefahr einer sich selbst verstärkenden Abwärtsspirale, sofern nicht ein stabiles Gleichgewicht bei sehr hohen Marktdurchdringungen erreicht werden kann. Die Situation ist dabei nicht mehr mit der Koexistenz von Diesel und Benzin zu vergleichen, da dort die zusätzlichen Kosten für die Belieferung, Bereitstellung eines zusätzlichen Tanks und Erweiterung der Zapfanlage mit geringeren Investitionskosten verbunden ist und gleichzeitig hohe Synergieeffekte erlaubte. Die Erschließung und Belieferung einer Tankstelle mit Wasserstoff (durch eine kilometerlange Pipeline oder mehrere Druck-LKW) und die aufwändigen Verdichter und Hochdruckspeicher bedingen dabei vergleichsweise viel größere Investitionen. Gleichzeitig sind kaum Synergieeffekte mit der Beladung von BEV zu erwarten, da diese über ein gänzlich anderes Konzept (dezentrale Ladesäulen statt lokaler Tankstelle) erfolgen würde, wodurch sich die Kosten für den Betrieb der Tankstelle nicht weiter umlegen lassen. Ob FCEV sich daher bei geringer Marktdurchdringung halten können, scheint aus heutiger Sicht fraglich.

8 Konsequenz für die Situation bei schweren Nutzfahrzeugen

Die bisherigen Betrachtungen richteten sich primär auf PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Während sich mittlerweile die meisten aktuellen Studien im Ergebnis für dieses Segment den hier präsentierten Schlussfolgerungen anschließen, sieht dies gegenwärtig für (schwere) Nutzfahrzeuge noch anders aus. Unabhängig der Entwicklungen im PKW-Segment wird diese Nische häufig als „sicherer Hafen“ für den Wasserstoffantrieb angesehen. Als Begründung werden häufig (a) die zu geringe Reichweite von Batterie-LKW, (b) zu lange Ladezeiten, sowie (c) die durch die schwere Batterie reduzierte Nutzlast genannt (H2-Mobility 2021; Roland Berger 2020). In der Praxis zeigt sich jedoch, dass schon heute ein erheblicher Teil der Distributionsrouten im Lieferverkehr „ad-hoc“ oder nach geringfügigen Umstellungen mit heutigen Reichweite aktueller Batterie-LKW darstellbar ist und die angekündigten Modelle der nächsten Monate bzw. wenigen Jahre nahezu alle gängigen Routen (mit nachladen) zulassen (Fraunhofer ISI 2021; Ifeu et al. 2021). Ab einer Batterie-Kapazität von etwa 800 kWh kann die Beladung an sog. „Megawatt Charging Systems“ innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten erfolgen, sodass kein zusätzlicher Verzug entsteht (ab etwa 2023, Öko-Institut e.V. et al. 2021, S. 27). Zuletzt muss festgestellt werden, dass es sich bei der Herausforderung der Gewichtsbegrenzung nicht um eine physikalische, sondern primär um eine regulatorische Herausforderung handelt. In diesem Kontext laufen gegenwärtig auf nationaler und europäischer Ebene diverse Anläufe, mit dem Ziel, das zulässige Gesamtgewicht von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben zu erhöhen (vgl. bspw. EU-Richtlinie 2015/719 und BMVI 2018). Schon heute setzten sich daher bei leichten Nutzfahrzeugen Batterie-LWK durch (e-mobil BW 2021, S. 10), ab 2025 erwarten Ifeu et al. (2021), dass eher „die Fahrzeugverfügbarkeit, die Konfigurierbarkeit von Fahrzeugen für bestimmte Kundenwünsche, die Installation und der Netzanschluss von betrieblicher Ladeinfrastruktur sowie die Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Technologie bei den LKW-Betreibern“ limitierende Faktoren sind, als die rein techno-ökonomischen Aspekte. Eine detaillierte Untersuchung weiterer technischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte von Antriebsalternativen im Fernverkehr findet sich in der Dissertation von Mareev (2018) und zeigt, dass sich viele der hier getroffenen Aussagen hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit, unmittelbar vom PKW- auf das Nutzfahrzeugsegment übertragen lassen.

In der bestehenden Literatur werden jedoch die Segmente des Individual- und des Güterverkehrs in der Regel als weitestgehend separate Fragestellungen betrachtet. Allerdings scheinen diese nicht so unabhängig voneinander zu sein wie viele Autoren annehmen. So hängt das Nutzfahrzeugsegment stark von Skalen- und Lerneffekten des persönlichen Individualverkehrs ab, da dort deutlich höhere Absatzzahlen realisiert werden.

Bei einem stark/ausschließlich batterie-basierten PKW-Segment werden die bestehenden Vorteile dieser Technologie bei den Nutzfahrzeugen voraussichtlich auch noch überproportional ausgebaut. Umgekehrt wurde bereits die essenzielle Bedeutung einer hohen Auslastung für die Wasserstoffinfrastruktur erläutert. Falls jedoch der PKW-Sektor und der überwiegende Teil der leichten Nutzfahrzeuge wie auch der schweren Nutzfahrzeuge für kurze Routen nicht zur Auslastung der Infrastruktur beitragen, wird es zusätzlich noch schwieriger werden, einen wirtschaftlichen Betrieb bei vertretbaren Abgabepreisen zu erreichen. Wie auch bei den PKW liegt möglicherweise eine Situation vor, in der Wasserstoff in einer Nische allein nicht ökonomisch überlebensfähig ist.

Literaturverzeichnis

ACEA (Hg.) (2021): Making the transition to zero-emission mobility. Enabling factors for alternatively-powered cars and vans in the European Union. European Automobile Manufacturers' Association. Brüssel. Online verfügbar unter https://www.acea.auto/files/ACEA_progress_report_2021.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

ADAC (Hg.) (2021): Es gurgelt und summt: ADAC Test des neuen Toyota Mirai. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Agora Verkehrswende (Hg.) (2019): Verteilnetzausbau für die Energiewende. Elektromobilität im Fokus. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Netzausbau_Elektromobilitaet/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_EV-Grid_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

ARK Invest (Hg.) (2021): Big Ideas 2021. New York. Online verfügbar unter https://research.ark-invest.com/hubfs/1_Download_Files_ARK-Invest/White_Papers/ARK%E2%80%93Invest_BigIdeas_2021.pdf.

BDEW (2019): Meinungsbild E-Mobilität. Meinungsbild der Bevölkerung zur Elektromobilität. Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190527_Fakten-und-Argumente-Meinungsbild-E-Mobilitaet.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2022.

Bieker, Georg (2021): A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. Berlin. Online verfügbar unter https://www.alectra.com/sites/default/files/assets/pdf/Global_LCA_passenger_cars-07_2021.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

BloombergNEF (2021): Hitting the EV Inflection Point. Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe. Hg. v. Transport and Environment. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/2021_05_05_Electric_vehicle_price_parity_and_adoption_in_Europe_Final.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BDMV) (16.08.2021): Deutschlandnetz: Scheuer stellt 1.000 Standorte für Schnellladesäulen und Preismodell vor. Berlin, 087/2021. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/087-scheuer-1000-standorte-schnellladesaeulen-preismodell.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die nationale Wasserstoffstrategie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi) (2022): Eröffnungsbilanz Klimaschutz. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22.

Burkold, Steffen (2020): Blauer Wasserstoff. Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades. Hg. v. Greenpeace Energy. Online verfügbar unter <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>, zuletzt geprüft am 07.12.2021.

Cardella, Umberto Federico (2018): Large-scale hydrogen liquefaction under the aspect of economic viability. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1442078>.

Demir, Murat Emre; Dincer, Ibrahim (2018): Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. In: *international journal of hydrogen energy* 43 (22), S. 10420–10430. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.002.

Deutscher Bundestag (Hg.) (2019): Kosten und Fördermöglichkeiten von Ladestationen für Elektrofahrzeuge. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/675848/91eb74a2dbaafe8607cf73ee9e46331f/WD-5-111-19-pdf-data.pdf>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Deutscher Bundestag (Hg.) (2021): Ergebnis der Förderung von Wasserstoff-Pkws durch die Bundesregierung. Berlin.

European Commission (Hg.) (2021): Speeding up European climate action towards a green, fair and Prosperous future. EU Climate Action Progress Report. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/system/files/2021-11/policy_strategies_progress_com_2021_960_en.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Flügge, B.; Walter, C. (2018): Smart Spaces. In: B. Flügge (Hg.): Smart Mobility in der Praxis: Das Auto – unverzichtbar für den intermodalen Verkehr? Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher), S. 107–118.

Hackbarth, A.; Madlener, R. (2016): Willingness-to-pay for alternative fuel vehicle characteristics: A stated choice study for Germany. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 85, S. 89–111. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.005.

Hänsch-Petersen, Lars (2021): Diese Autostromtarife machen das Laden von E-Autos günstiger. Hg. v. Auto Bild. Online verfügbar unter <https://www.autobild.de/artikel/autostrom-vertrag-strom-fuers-e-auto-e-auto-stromtarif-vergleich-zu-hause-wallbox-19481535.html>, zuletzt aktualisiert am 26.08.2021, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Haustein, S.; Jensen, A. F. (2018): Factors of electric vehicle adoption: A comparison of conventional and electric car users based on an extended theory of planned behavior. In: *International Journal of Sustainable Transportation* 12 (7), S. 484–496. DOI: 10.1080/15568318.2017.1398790.

International Energy Agency (2019): The Future of Hydrogen. Paris. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

International Energy Agency (IEA) (Hg.) (2021): Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

IRENA (2018): Renewable Energy Prospects for the European Union. Online verfügbar unter <https://www.irena.org/publications/2018/Feb/Renewable-energy-prospects-for-the-EU>, zuletzt geprüft am 06.12.2018.

KBA (2022): Jahrbilanz 2021. Zahlen, Daten, Fakten. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html, zuletzt geprüft am 21.03.2022.

König, Adrian; Nicoletti, Lorenzo; Schröder, Daniel; Wolff, Sebastian; Waclaw, Adam; Lienkamp, Markus (2021): An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. In: *WEVJ* 12 (1), S. 21. DOI: 10.3390/wevj12010021.

Kraftfahrtbundesamt (05.10.2021): Fahrzeugzulassungen im September 2021. Flensburg. Immen, Stephan. Online verfügbar unter

https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugzulassungen/2021/pm40_2021_n_09_21_pm_komplett.html, zuletzt geprüft am 09.11.2021.

Kreidelmeyer, Sven; Dambeck, Hans; Kirchner, A.; Wünsch, Marco (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Hg. v. Prognos und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transaktionspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 07.12.2021.

Maingau Energie (Hg.) (2021): Die Vor- und Nachteile von Elektroautos - mehr platz im Innenraum. Online verfügbar unter <https://www.maingau-energie.de/blog/die-vor-und-nachteile-von-elektroautos>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

McKinsey (2020): Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective. Hydrogen Council. Online verfügbar unter https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf, zuletzt geprüft am 10.11.2021.

Nelder, Chris; Rogers, Emily (2019): Reducing EV Charging Infrastructure Costs. Hg. v. Rocky Mountain Institute. Basalt, USA. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Chris-Nelder/publication/338660434_Reducing_EV_Charging_Infrastructure_Costs/links/5e2237d6299bf1e1fab9ed9c/Reducing-EV-Charging-Infrastructure-Costs.pdf.

NewMotion (2021): EV driver survey report 2021. Unter Mitarbeit von M. Lane. Online verfügbar unter <https://newmotion.com/en/knowledge-center/reports-and-case-studies/ev-driver-survey-report>, zuletzt geprüft am 24.11.2021.

Nicholas, Michael; Hall, Dale; Lutsey, Nic (2019): Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across US markets. In: *International Council on Clean Transportation*, S. 1–39. Online verfügbar unter <https://theicct.org/publications/charging-gap-US>, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

NOW GmbH (Hg.) (2021): Auswertung KBA-Zahlen. Berlin. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/11/KBA_Report_10-2021.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Regett, Anika; Böing, Felix; Conrad, Joehen; Fattler, Steffen; Kranner, Constanze (2018): Emission assessment of electricity: Mix vs. marginal power plant method. In: 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM): IEEE, S. 1–5. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8469940>, zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Reuß, M.; Grube, T.; Robinius, M.; Preuster, P.; Wasserscheid, P.; Stolten, D. (2017): Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. In: *Applied Energy* 200, S. 290–302. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.

Reuß, Markus; Grube, Thomas; Robinius, Martin; Stolten, Detlef (2019): A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. In: *Applied Energy* 247, S. 438–453. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.064.

Robinius, Martin; Linßen, Jochen Franz; Grube, Thomas; Reuß, Markus; Stenzel, Peter; Syranidis, Konstantinos et al. (2018): Comparative analysis of infrastructures: hydrogen fueling and electric charging of vehicles: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag.

Rogers, E. M. (1962): Diffusion of innovations. New York: Free Press of Glencoe.

Römer, D.; Steinbrecher, J. (2021): Die Elektromobilität nimmt Fahrt auf – doch wer setzt sich eigentlich ans Steuer? KfW Research (Fokus Volkswirtschaft, 331). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/351658938_Die_Elektromobilitat_nimmt_Fahrt_auf_-_doch_wer_setzt_sich_eigentlich_ans_Steuer, zuletzt geprüft am 14.12.2021.

Statista (Hg.) (2021a): Durchschnittliche Reichweite von Elektrofahrzeugen in Deutschland von 2017 bis 2025. (in Kilometern). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/443614/umfrage/prognose-zur-reichweite-von-elektroautos/>, zuletzt aktualisiert am 03.12.2021.

Statista (2021b): Ladeinfrastruktur in Deutschland. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/101151/dokument/ladeinfrastruktur/>, zuletzt geprüft am 14.01.2022.

Statista (2021c): Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/85267/dokument/wasserstoff/>, zuletzt geprüft am 14.01.2022.

Sternberg, André; Hank, Christoph; Hebling, Christopher (2019): Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km. In: *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (Ed.). Freiburg. Available online at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presseund-medien/news/2019/fraunhofer-ise-vergleicht-treibhausgas-emissionen-von-batterie-undbrennstoffzellenfahrzeugen.html>*, Accessed on 10. S. 2019, zuletzt geprüft am 01.12.2021.

Thompson, Simon T.; James, Brian D.; Huya-Kouadio, Jennie M.; Houchins, Cassidy; DeSantis, Daniel A.; Ahluwalia, Rajesh et al. (2018): Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. In: *Journal of Power Sources* 399, S. 304–313. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.100.

Tschöke, H. (2019): Hybridantriebe und Range Extender. In: G. P. Merker und R. Teichmann (Hg.): *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise und alternative Antriebssysteme : Verbrennung, Messtechnik und Simulation*. Unter Mitarbeit von Gerhard Haußmann. 9., korrigierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 365–390.

VDA (2021): Mobilität und Verkehr – So denkt Deutschland. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung zum Mobilitätsverhalten in Deutschland. Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA). Berlin. Online verfügbar unter https://www.vda.de/dam/jcr:25bd78c7-6798-415b-964d-26e597addfc5/VDA_5580_Broschuere_Mobilitaet_und_Verkehr_RZ-web-Einzelseiten.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2021.

Vrain, Emilie; Wilson, Charlie (2021): Social networks and communication behaviour underlying smart home adoption in the UK. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 38, S. 82–97. DOI: 10.1016/j.eist.2020.11.003.

Wiehl, G. (2021): Übersicht aktuell verfügbare Elektroautos. Online verfügbar unter https://docs.google.com/spreadsheets/d/1m3QqVURB3-GGnMnqkdGvrA-n6IDpCkSf-hOtRzhLy_k/edit#gid=0, zuletzt aktualisiert am 18.12.2021, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Wietschel, Martin; Kühnbach, Matthias; Stute, Judith; Gnann, Till; Marwitz, Simon; Klobasa, Marian (2018): Auswirkung der Elektromobilität auf die Haushaltsstrompreise in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP21-2018_Elektromob_Haushaltsstrompreise_Wi_et_al.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2021.