

WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLENAUTOS Der Schlüssel zur Mobilitätswende?



Eine Erläuterung und Analyse der aktuellen Wasserstoff-Brennstoffzellenautos auf funktioneller, ökologischer und ökonomischer Ebene.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Der Antriebsstrang	
2.1 Das Herzstück: Die Brennstoffzelle	
2.1.1 Funktionsweise der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle	3
2.1.2 Konzepte für optimierte zukünftige Brennstoffzellen	5
2.2 Die Lithiumionenbatterie als Zwischenspeicher	6
2.3 Der weitere Antriebsstrang	7
3 Gasförmiger Wasserstoff als Treibstoff	
3.1 Gewinnung des Wasserstoffs	8
3.2 Treibstofflagerung und Sicherheit in Brennstoffzellenautos	9
3.3 Reichweite von Brennstoffzellenautos und das aktuelle Tankstellennetz	11
4. Nachhaltigkeit eines Brennstoffzellenautos	
4.1 Kostenstruktur und ökologische Auswirkungen der Produktion von Brennstoffzellenautos	13
4.2 Langlebigkeit eines Brennstoffzellenautos	14
4.3 Recycling von Brennstoffzellen.....	15
5. Fazit	17
6. Anhang	19
7. Literaturverzeichnis.....	25
8. Eigenständigkeitserklärung und Veröffentlichungserlaubnis.....	28

1. Einleitung

Bis 2050 Klimaneutral werden und so den Klimawandel bekämpfen. Dieses Ziel hat sich die Europäische Kommission im Dezember 2019 gesetzt¹. Um dies zu erreichen, soll der Ausstoß der verkehrsbedingten Emissionen um 90% gesenkt werden². Um die Mobilitätswende zu beschleunigen, fördert aktuell z.B. die Bundesregierung die Verbreitung von Elektroautos mit finanziellen Anreizen, wie dem Umweltbonus. Dieser bezuschusst den Kauf eines dieser PKW³. Neben reinen Batterieelektrofahrzeugen und Plug-In-Hybriden wird auch der Einsatz von Brennstoffzellen (BZ) bezuschusst. Mit diesen wird sich diese Facharbeit auseinandersetzen.

Bereits 2007 bezeichnete die Daimler AG die Brennstoffzelle als die alternative Antriebstechnologie mit dem größten Potenzial.⁴ 2009 startete Mercedes-Benz dann mit der B-Klasse F-Cell die erste Kleinserie eines mit Wasserstoff betriebenen PKW. Ab 2014 sollte dieser in der Großserie produziert werden.⁵ Doch es dauerte bis Oktober 2018, bis der erste, mit der emissionsfreien Technologie ausgerüstete Mercedes-Benz an einen Kunden ausgeliefert wurde.⁶ Die Technologie scheint also doch nicht so einfach umzusetzen so sein, wie zuerst vermutet. Wo gibt es also Schwierigkeiten in der Konstruktion von BZ-Autos und wie wirken sich diese auf die Nutzer aus? Bringt die BZ-Technologie überhaupt die erhoffte klimafreundliche Alternative zum Verbrenner? Sind BZ-Autos bei der aktuellen Infrastruktur alltagstauglich? Diese Kernfragen sollen im Folgenden beantwortet werden.

Um die Fragen schlüssig beantworten zu können, wird zunächst die Funktionsweise der aktuellen Technologien in BZ-Autos erläutert. Dabei konzentriert sich die Facharbeit auf die Aspekte, welche spezifisch für BZ-Autos sind. Beginnend wird die PEM-BZ erklärt und aufgezeigt, wo bei dieser die aktuellen Forschungsschwerpunkte liegen. Danach wird der sonstige Antriebsstrang, welcher im Wesentlichen aus einem Lithium-Ionen-Akku und einem Elektromotor besteht, knapp erklärt.

¹ Europäische Kommission: Der europäische Grüne Deal, Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, S. 2, Brüssel 2019.

² Ebenda, S.12.

³ Bundesregierung: So funktioniert der neue Umweltbonus. 18.11.2019. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/umweltbonus-1692646>, 29.12.2019.

⁴ Daimler AG: Geschäftsbericht 2007. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2007.pdf>, 03.01.2020. S.98.

⁵ Daimler AG: Geschäftsbericht 2011. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2011.pdf>, 03.01.2020. S.42.

⁶ Daimler AG: Mercedes Benz GLC F-Cell. Besonderer Hybrid mit Brennstoffzelle. 27.09.2019. <https://www.daimler.com/produkte/pkw/mercedes-benz/glc-f-cell.html>, 03.01.2020.

Darauf folgt eine Übersicht zu gasförmigem Wasserstoff als Treibstoff. Aufgrund des geringen Rahmens kann jedoch auch hier nur auf die Punkte, die in direktem Zusammenhang mit dem Fahrzeug stehen, detailliert eingegangen werden.

In dem letzten Kapitel wird die Nachhaltigkeit analysiert. Dieses beinhaltet sowohl die Langlebigkeit der Autos und die Recyclingmöglichkeiten von BZ, als auch die ökologischen Auswirkungen und Kosten der Herstellung der PKW. Abgeschlossen wird diese Facharbeit mit einem Fazit, ob es schlussendlich sinnvoll ist, BZ-Autos als eine Massentechnologie weiter zu fördern und zu entwickeln, um die Mobilitätswende zu beschleunigen, oder ob doch auf eine andere Technologie gesetzt werden sollte.

2. Der Antriebsstrang

2.1 Das Herzstück: Die Brennstoffzelle

Eine BZ basiert grundsätzlich auf ihrem Aufbau aus zwei Elektroden, die eine Membran trennt, welche lediglich für ein bestimmtes Ion durchlässig ist. Dazu kommt ein externer Leiter, an den eine Last angeschlossen ist. Damit der, in die BZ eingeleitete, Wasserstoff mit dem Sauerstoff reagieren kann, muss also eins der Edukte zunächst ionisiert werden, um die Membran passieren zu können. Zum Ladungsausgleich fließt schließlich die entsprechende Anzahl an Elektronen durch den externen Leiter. Dieser Fluss von Elektronen wird genutzt, um z.B. einen Motor anzutreiben⁷.

2.1.1 Funktionsweise der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle

Bei genauerer Betrachtung gibt es verschiedene Arten von BZ. Diese unterscheiden sich unter anderem in dem Treibstoff, den sich durch die Membran bewegenden Ionen und vor allem der benötigten Betriebstemperatur. Daraus ergeben sich deren Einsatzfelder. In der Autoindustrie wird heute hauptsächlich auf sogenannte Polymerelektrolytmembran-BZ (PEMBZ) gesetzt. Diese haben mit den neusten Elektrolyten ein Betriebsfenster von ca. 30°C bis über 100°C⁸. Sie müssen also weder sonderlich gekühlt noch stark geheizt werden.

Um die Funktionsweise einer BZ zu verstehen, ist es hilfreich die Reaktionen an der jeweiligen Elektrode, meist bestehend aus Kohlenstoff und beschichtet mit einem Katalysator, einzeln zu betrachten. In die Anode werden die Wasserstoff Moleküle eingeleitet, um dort zu je zwei H⁺-Ionen, also zwei Protonen, oxidiert zu

⁷ Dicks, Andrew L.; Rand, David A. J.: Fuel Cell Systems Explained. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 32018. S. 7 f.

⁸ Ebenda, S. 17

werden. Bei diesem Prozess werden 2 Elektronen (e^-) frei⁹. Um die Geschwindigkeit dieser Reaktion und somit die Effizienz der BZ zu erhöhen, werden in BZ Edelmetalle als Katalysatoren eingesetzt. Als der am besten funktionierende Katalysator hat sich dabei Platin herausgestellt¹⁰. Der Elektrolyt hat die Aufgabe die Protonen zu transportieren und besteht meist aus Nafion. Dabei handelt es sich um ein fluoriertes Ethylen oder Polyethylen, also einem Polyethylen, bei dem alle Wasserstoffatome durch Fluor ersetzt wurden. An dies wird zudem je eine Sulfonsäuregruppe (SO_3H) gebunden. Die Bindung zwischen dem Sulfon und dem Proton innerhalb der Sulfonsäuregruppe ist nur schwach, weshalb das Proton zeitweise abgegeben und später durch ein neues ersetzt werden kann. So wird der Elektrolyt leitend für die Protonen und transportiert diese schließlich durch die Membran zu der Kathode¹¹. Den freien Elektronen ist es hingegen nicht möglich durch die Membran zu treten, weshalb sie durch den externen Leiter fließen und dort eine Arbeit verrichten können.

In die Kathode wird die sauerstoffhaltige Luft eingeleitet. Damit der Sauerstoff jedoch mit den Protonen und Elektronen zu Wasser reagieren kann, muss er zunächst in einzelne Ionen geteilt werden. Da dies nicht spontan passiert, wird besonders hier Platin als Katalysator benötigt. Dieses absorbiert zunächst die Sauerstoffmoleküle und desorbiert dann die Sauerstoff-Ionen¹². An der so genannten Dreiphasengrenze (siehe Abb. 1) treffen Protonen, Elektronen und Sauerstoff am Platin zusammen, sodass sie zu Wasser reagieren.

Die Gesamtreaktion ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) hat eine negative Reaktionsenthalpie, was bedeutet, dass nach der Reaktion weniger Energie in den Teilchen gespeichert ist, als zu Beginn¹³. Nach dem Energieerhaltungssatz verschwindet Energie jedoch nie, sondern verändert nur ihre Form. Daher ist es möglich, einen Teil der freigegebenen Energie in elektrische und schließlich in kinetische Energie umzuwandeln und so das Auto zu beschleunigen.

Liegt das produzierte Wasser in flüssiger Form vor, so liegt die höchste, theoretisch erreichbare Zellspannung bei 1,48 V. In der Realität verliert ein System hingegen immer etwas Energie, z.B. in Form von ungenutzter Wärme. Dazu ist es sehr energieaufwendig die perfekten Bedingungen für die Reaktion zu schaffen.

⁹ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. S. 145

¹⁰ Tymen, Simon: Palladium-Platinum nanoparticles : well-structured bimetallic catalysts for fuel cells. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 2018. S.6

¹¹ Dicks, Andrew L.; Rand, David A. J., S. 73.

¹² Tymen, Simon, S. 6.

¹³ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 146 ff.

Daher wird die Effizienz einer BZ in dem Anteil der tatsächlichen maximalen Spannung, von 1,48 V angegeben. Bei 80°C liegt die maximale Zellspannung z.B. bei 1,18 V und somit die Effizienz bei 80% (Für weitere Werte siehe Abb. 2). Grundsätzlich lässt sich sagen, dass sich die Effizienz einer BZ antiproportional zu der Betriebstemperatur verhält. Das Problem ist jedoch, dass bei niedrigen Temperaturen die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt. Auch dies ist ein Grund für die Wichtigkeit des Katalysators¹⁴.

2.1.2 Konzepte für optimierte zukünftige Brennstoffzellen

Damit BZ eine kompetitive Alternative zu Verbrennungsmotor und Lithiumionenakkumulator darstellen können, müssen sie vorrangig günstiger werden und eine längere Lebensdauer haben. Jedoch hat die BZ momentan auch noch in den Bereichen der Leistungsdichte, also der Leistungsfähigkeit pro in Anspruch genommenem Volumen und Gewicht, der Effizienz und dem Ansprechverhalten, also wie schnell die erbrachte Leistung reguliert werden kann, Verbesserungsbedarf¹⁵.

Wie erwähnt ist ein Problem der BZ die Lebensdauer, welche durch den fortschreitenden Leistungsverlust limitiert wird. Die Gründe für diesen liegen größtenteils in dem Degradieren der Elektroden und der Membran. Ein Stressfaktor für BZ sind z.B. schnelle Temperaturänderungen, die deren Struktur beschädigen können. Besonders bei Temperaturen unter 0°C kann es zu Rissen kommen, die dann die Leitfähigkeit des Elektrolyten einschränken. Es ist also wichtig, dass, z.B. beim Kaltstart, ein ausgewogenes Temperaturmanagement betrieben wird. Ein weiteres Risiko des Degradierens bietet eine unregelmäßige Feuchtigkeit in der BZ. So kann sich die Membran auf bis zu 150% ihrer ursprünglichen Dicke ausdehnen, wenn sie zu wässrig wird und so den Elektrolyt beschädigen¹⁶.

Zusätzlich zu dem Degradieren des Elektrolyten, spielt auch das Altern des Katalysators, sprich der Platinpartikel, eine tragende Rolle für die Geschwindigkeit des Leistungsverlustes einer BZ. Für die Funktionsstärke des Platins ist es wichtig, dass deren Partikelgrößen im Nanometerbereich liegen, und somit eine große Oberfläche bieten. Mit fortschreitender Betriebszeit kommt es jedoch zu einem Wachstum der Partikel. Dieser kann z.B. auftreten, wenn sich kleine Schmutzpartikel der einfließenden Luft an den Platinpartikeln auflösen, oder eine

¹⁴ Dicks, Andrew L.; Rand, David A. J., S. 33 ff.

¹⁵ Kell, Manfred; Eichlseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 74 f.

¹⁶ Ackermann, Stefan: Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Vergleich von AEM-Membran-Elektroden-Einheiten. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität. 2018. S. 11.

altersbedingte Oxidation des Platins auftritt. Letztere wird besonders durch häufige Änderungen in der Aktivität des Katalysators gefördert¹⁷.

Erschwert wird der Einstieg von BZ-Autos in den Automobilmarkt zudem durch ihren hohen Preis. Dies ist unter anderem auf die noch sehr geringe Stückzahl der Fahrzeuge zurückzuführen. Ein weiterer Grund hierfür ist der hohe Preis des Platins, der, Einschätzungen zufolge, auch in Zukunft nicht fallen wird. Es ist also essenziell die Menge an verwendetem Platin zu reduzieren, um BZ-Autos konkurrenzfähig werden zu lassen¹⁸. Ein Ansatz, um dies zu erreichen ist, Partikel aus Platin und einem weiteren Metall zu synthetisieren und so den Anteil von Platin im Katalysator zu senken. Eine Experimentreihe mit Palladium als hinzugegebenes Metall zeigte, dass sich Katalysatoraktivität erreichen lässt, die nur minimal schlechter ist als die von BZ mit reinen Platinnanopartikeln als Katalysator¹⁹. Da Palladium allerdings noch teurer ist, besteht das Ziel nun darin, eine kostengünstigere Alternative zu Palladium zu finden.

2.2 Die Lithiumionenbatterie als Zwischenspeicher

Im Vergleich zu anderen Anwendungen hat ein Auto, wie in 2.1.2 angesprochen, eine sehr wechselhafte Leistungsanforderung. So rollt es z.B. in dem einen Moment konstant mit 50 km/h über die Straße und soll im Nächsten möglichst schnell auf 100 km/h beschleunigen. Da jedoch genau diese schnellen und häufigen Änderungen in der Leistungsanforderung, wie in Kapitel 2.1.1 erläutert, das Degradieren der BZ beschleunigen, versucht man den Betrieb der BZ möglichst gleichmäßig zu halten. Um dies zu ermöglichen, wird in den heutigen BZ-Autos eine Lithiumionenbatterie (Li⁺-Batterie) als Zwischenpuffer eingesetzt²⁰.

Wie also funktioniert die Li⁺-Batterie? Wie die BZ basiert auch die Li⁺-Batterie darauf, dass Anode und Kathode durch eine Membran getrennt werden, die nur für ein bestimmtes Ion durchlässig ist. In diesem Fall übernimmt das Li⁺-Ion die Funktion des mobilen Ions. Jedoch unterscheiden sich, im Gegensatz zu der BZ, bei der Li⁺-Batterie die Elektroden in den verwendeten Werkstoffen. Dabei besteht die eine Elektrode aus einem festen Metalloxid, z.B. Mangan(III)-oxid (Mn₂O₄), an welches sich die Li⁺-Ionen binden können. Die andere Elektrode hingegen besteht meist aus Graphit, an das sich das Lithium anlagern kann.

¹⁷ Ebenda, S. 12.

¹⁸ Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian: „Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles“, in: Int J Life Cycle Assessment. Nr. 22/2017, S. 104.

¹⁹ Tymen, Simon, S. 72 f.

²⁰ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 178 f.

Im geladenen Zustand befinden sich die Li^+ -Ionen in dem Graphit. Wenn der externe Leiter geschlossen ist, wandern die Li^+ -Ionen aus dem Graphit zu der jetzt als Kathode fungierenden Elektrode. Dabei fällt ihre innere Energie auf ein niedrigeres Energieniveau. Es baut sich also eine Spannung auf, mit welcher z.B. der Elektromotor eines BZ-Autos betrieben werden kann²¹.

2.3 Der weitere Antriebsstrang

Für den Antrieb eines BZ-Autos werden grundlegend noch zwei weitere Arten von Bauteilen benötigt. Dies sind zum einen Spannungswandler. Sie haben die Aufgabe, die Spannungen zwischen BZ und Batterie anzugleichen und den Gleichstrom dieser in Wechselstrom für den Elektromotor zu wandeln²².

Dieser Elektromotor ist das letzte elementare Bauteil eines BZ-Autos. Während bei Verbrennungsmotoren die Volumenarbeit direkt in mechanische Energie umgewandelt wird, bieten BZ und Batterie lediglich elektrische Energie. Die Elektromotoren des Autos haben also die Aufgabe, diese in mechanische Energie und so in die kinetische Energie des gesamten Fahrzeuges umzuwandeln.

Um dies zu erreichen verwenden Elektromotoren die Lorentzkraft. Diese wirkt auf, sich in einem Magnetfeld bewegende, Ladungen. In BZ-Autos werden hauptsächlich sogenannte Drehfeldmaschinen verwendet²³. Diese basieren darauf, dass durch eine Dreiphasenwechselspannung ein Drehfeld, also ein rotierendes Magnetfeld, aufgebaut wird. Auch wenn der Rotor, also der sich bewegende Teil eines Elektromotors, zu Beginn ruht, bewegen sich die Elektronen darin somit relativ zum Magnetfeld. Es wirkt also die Lorentzkraft, womit ein Drehmoment an dem Motor anliegt²⁴. Liegt keine Spannung an, fungiert der Motor wie ein Generator. So kann beim Bremsen Energie zurückgewonnen werden. Dies ist ein entscheidender Vorteil zu Autos mit Verbrennungsmotor, bei denen die beim Bremsen abgebaute Energie als Wärme an der Bremse anfällt²⁵.

²¹ Jiang, Jiuchun; Zhang, Caiping: Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles, Singapur: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 12015, S. 9 f.

²² Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 179.

²³ Ebenda, S.179.

²⁴ Schröder, Dierk: Elektrische Antriebe – Grundlagen. Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 52013, S. 277 ff.

²⁵ Ebenda, S. 3.

3 Gasförmiger Wasserstoff als Treibstoff

3.1 Gewinnung des Wasserstoffs

Eine Frage für die Funktionalität der BZ-Autos ist, ob eine Herstellung des Treibstoffes, also des Wasserstoffs, in ausreichender Menge möglich ist. Heute gibt es verschiedenste Szenarien in denen Wasserstoff entsteht und dementsprechend als Treibstoff gewonnen werden könnte. Beispielsweise wird eine Gewinnung von Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen betrieben, bei der jedoch Kohlenstoffmonoxid als Nebenprodukt entsteht²⁶. Dieses Verfahren macht etwa 95% der heutigen gezielten Produktion von Wasserstoff aus. 40% des gesamten entstandenen Wasserstoffs stammt jedoch aus der Industrie. Dort fällt es z.B. als Nebenprodukt bei dem Raffinieren von Rohöl an. Die heute einzige Alternative dazu, die das Potenzial hat vollkommen emissionsfrei betrieben zu werden, ist Spaltung von Wasser in einer Elektrolyse²⁷.

Bei der Elektrolyse wird das Prinzip einer BZ umgedreht. Das bedeutet, dass eine angelegte Spannung zu der Spaltung von Wasser an einer der Elektroden und dem Transport eines, der dabei entstehenden Ionen (O^- , OH^- oder H^+) durch eine Membran zu der jeweils anderen Elektrode führt. Aufgrund des günstigeren Preises bei größeren Anlagen, wird bei der industriellen Elektrolyse heute, und voraussichtlich auch in Zukunft, auf die AEL, also die alkalische Niedrigtemperaturelektrolyse, gesetzt.

In dieser wird meist 20-40% Kali- oder Natronlauge als Elektrolyt eingesetzt. Der Elektrolyseur befindet sich also durchgängig mit beiden Elektroden in einer wässrigen Lösung. Im Gegensatz zu der in 2.1 beschriebenen PEM-BZ werden bei der AEL keine Protonen (H^+), sondern Hydroxidionen (OH^-) verwendet. Diese entstehen bei der Reduktion von Wasser mit zwei Elektronen an der Kathode zu Wasserstoff und den eben genannten Hydroxidionen. Der freigewordene, gasförmige Wasserstoff steigt auf Grund seiner geringeren Dichte auf. Da sich eine alkalische Lösung dadurch definiert, dass sie Hydroxidionen enthält, ist sie für diese leitend. Die Hydroxidionen gelangen so in die Anode, wo sie zu Wasser oxidiert werden. Dabei werden die, in der Kathode aufgenommenen, Elektronen wieder freigesetzt und es entsteht Sauerstoff²⁸. Heute werden vor allem bipolare AEL-Systeme

²⁶ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 91.

²⁷ Ebenda, S. 71 f.

²⁸ Noack, Christoph; ...; Schneider, Gregor-Sönke: Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkafern unter Druck. Stuttgart: 05.02.2015, S. 10 f.

eingesetzt (siehe Abb. 3). Diese sind im Gegensatz zu den alten unipolaren Systemen effizienter, kompakter und sind dazu fähig, unter einem höheren Druck betrieben zu werden. Während die Kosten für den Bau von Elektrolyseuren mit ca. 1000 €/kW heute noch recht hoch liegen, soll der Preis in Zukunft auf ca. 600 €/kW sinken²⁹. Dies hängt damit zusammen, dass größere Anlagen preisgünstiger sind. Auch wenn größere Anlagen ein größeres Investment bedeuten würden, wäre dies in Zukunft mit dem Transportsektor als Abnehmer realisierbarer als heute.

Ein Nachteil von Wasserstoff als Treibstoff im Vergleich zu Strom für Reibatterieelektroautos ist jedoch die geringere Effizienz. Während bei Batterieelektroautos lediglich beim Laden 10 % der Energie „verloren“ geht, gibt es in der Wasserstoffinfrastruktur mehrere Prozesse, bei denen Energieverluste zu bemerken sind. So muss Energie aufgewendet werden für das Elektrolysieren des Wassers, das mehrfache verdichten des Wasserstoffs und in vielen Fällen auch für einen Transport des Wasserstoffs von dem Elektrolyseur zu der Tankstelle. Damit hat die gesamte Strom-Wasserstoff-Kette nur eine Effizienz von ca. 50 %³⁰.

3.2 Treibstofflagerung und Sicherheit in Brennstoffzellenautos

Wasserstoff ist über einer Temperatur von $-252,88^{\circ}\text{C}$ gasförmig. Daher ist es für den Gebrauch in Autos sinnvoll, den Wasserstoff in diesem Aggregatzustand zu speichern. Wasserstoff hat jedoch bei Normbedingungen, sprich 1,01 bar und 0°C , eine Dichte von nur $89,88\text{ g/m}^3$. Um dennoch genug Wasserstoff speichern zu können, wird das Gas beim Betanken stark komprimiert³¹. So kann eine gute Reichweite gewährleistet werden. Der aktuelle Standardbetankungsdruck liegt bei 700 bar³². Bei diesem Druck hat der Wasserstoff bei 25°C eine Dichte von $39,3\text{ kg/m}^3$. Um diesem Druck standzuhalten, sind die Tanks, aufgrund der recht gleichmäßigen Spannungsverteilung, meist als Zylinder mit abgerundeten Enden geformt.

Eine große Rolle bei der Konstruktion der Tanks spielen die verwendeten Werkstoffe, welche für die Stabilität und Abdichtung sorgen müssen. Aktuelle Tanks wiegen deshalb das 20- bis 40-fache des in ihnen gespeicherten Wasserstoffs und tragen somit zu dem erhöhten Fahrzeuggewicht bei³³. So wiegt z.B. der Mercedes-Benz GLC F-Cell mit 2130 kg bis zu 400 kg mehr als die GLC-Varianten mit

²⁹ Ebenda, S.12 ff.

³⁰ Bekel, Kai, Pauliuk, Stefan: "Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany", in: Int J Life Cycle Assess 24/2019. S. 2224.

³¹ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 54.

³² Mercedes Benz: Der neue GLC F-CELL, 12.09.2017. <https://www.mercedes-benz.com/de/fahrzeuge/personenwagen/glc/der-neue-glc-f-cell/>, 04.01.2020.

³³ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S.117 f.

Verbrennungsmotor^{34 35}. Um für eine langlebige Sicherheit zu sorgen und dabei das Gewicht möglichst niedrig zu halten, verwenden Hersteller heute verschiedene Arten von Kompositbehältern. Dabei besteht der Tank zu einem Teil oder ganz aus Kohlenstoff-Fasern, welche trotz geringem Gewicht für eine hohe Stabilität sorgen. Bei Teil-Kohlenstoff-Faser-Tanks besteht die innerste Schicht, der sogenannte Liner, meist aus einem austenitischen Stahl, welcher mindestens 18% Chrom und 8% Nickel enthält und auch in einer Wasserstoffumgebung stabile Stoffeigenschaften aufweist. Andere Liner werden aus einer Aluminiumlegierung gefertigt. Liner verhindern das Diffundieren des Wasserstoffs durch den Tank und verhindern, dass sich der Wasserstoff an der Oberfläche bindet. Anderenfalls bestünde die Gefahr von einer Versprödung des Materials. Je nachdem wie dick der Liner ist, werden um ihn herum Kohlenstoff-Fasern geschichtet. Andere Tanks bestehen komplett aus Kohlenstoff-Fasern und erreichen daher ein besseres Verhältnis des Eigengewichts zur gespeicherten Masse. Allerdings sind die Tanks mit Kohlenstoff-Faseranteil sehr teuer in der Produktion und tragen damit zu dem hohen Preis der BZ-Autos bei³⁶. Aktuelle BZ-Autos wie der Hyundai NEXO haben dabei nicht nur einen Wasserstofftank verbaut, sondern speichern den Wasserstoff in mehreren aneinander gereihten Zylindertanks. Im Fall des Hyundai NEXO sind die drei Tanks unter dem Kofferraum und der Rückbank positioniert (siehe Abb. 4)³⁷.

In Sicherheitsaspekten hat das BZ-Auto gegenüber einem Auto mit Verbrennungsmotor den Vorteil, dass es im Normalbetrieb keinerlei toxische Stoffe emittiert. Allerdings wird verdichteter Wasserstoff als „extrem entzündbar“ eingestuft und kann bei Erwärmung explodieren³⁸. Was passiert also, wenn Wasserstoff dem Tank entweicht?

Zunächst ist eine Entzündung im Tank selber sehr unwahrscheinlich. Wie erwähnt, werden die Tanks mit bis zu 700 bar befüllt. Es herrscht also ein starker Überdruck, verglichen zu dem äußeren Druck von etwa einem bar. Entsteht nun also ein Leck in dem Tanksystem, strömt der Wasserstoff aus dem Tank, und es gelangen keine Teilchen in den Tank. So fehlt dem Wasserstoff der Sauerstoff, um oxidiert werden zu können. Zudem sind die Hersteller dazu verpflichtet, dass die Fahrzeuge vor

³⁴ Rudschies, Wolfgang: Mercedes GLC F-Cell: Elektroauto mit Brennstoffzelle, 29.10.2019. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes/mercedes-glc-fuel-cell/>, 05.01.2020.

³⁵ ADAC: Mercedes GLC 250 4MATIC)G-TRONIC (15-18). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes/glc/253/248581/#technische-daten>, 05.01.2020.

³⁶ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 117 f.

³⁷ Hyundai: Der Hyundai NEXO. <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>, 05.01.2020.

³⁸ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 275.

Erreichen einer kritischen Wasserstoff-Luft-Mischung ein Warnsignal an die Insassen des Fahrzeuges abgeben³⁹.

Was passiert aber, wenn der austretende Wasserstoff in Brand gerät? Tatsächlich fällt der Schaden, bei ausströmendem Wasserstoff geringer aus als bei auslaufendem Benzin, wenn der jeweilige Kraftstoff in Brand gerät. In einem Versuch dazu wurden zeitgleich ein Auto mit Benzintank und ein identisches Auto mit Wasserstofftank entzündet. Bei dem Benziner wurde ein ca. 1,6mm großes Loch in eine Benzinleitung gebohrt und bei dem Wasserstofftank wurde das Druckventil so manipuliert, dass der Wasserstoff innerhalb von 100 Sekunden herausströmt⁴⁰.

Nachdem beide durch einen Funken gezündet wurden zeigt sich, dass bei dem BZ-Auto lediglich eine schmale, violette Flamme aufsteigt. Das Auto mit Benzintank steht hingegen nahezu komplett in Flammen. Im weiteren Verlauf wird die Flamme des BZ-Autos immer kleiner, bis sie vollkommen erlischt, sobald der Wasserstofftank leer ist. Das benzinbetriebene Fahrzeug steht hingegen auch nach fast 3 Minuten noch in Flammen (siehe dazu Abb. 5)⁴¹. Bei diesem Versuch betrug die heißeste gemessene Oberflächentemperatur an dem BZ-Auto 47,2°C. Im Inneren wurden nur 19,4°C gemessen⁴². Für eine große Explosion müsste der Tank also, trotz seiner sehr stabilen Bauweise und dem Überdruck, großen Schaden nehmen. Zu einem Schaden dieses Ausmaßes gibt es noch keine validen Studien.

3.3 Reichweite von Brennstoffzellenautos und das aktuelle Tankstellennetz

Ein Kritikpunkt an Batterieelektroautos ist immer wieder die mangelnde Reichweite⁴³. Deshalb sollen BZ-Autos, mit Reichweiten von bis zu 666 km beim Hyundai NEXO, die langstreckentaugliche Alternative bieten⁴⁴. Wie alltagstauglich sind jedoch heutige BZ-Autos mit der aktuell vorhandenen Wasserstoffinfrastruktur?

Wie genannt, haben aktuelle BZ-Autos eine höhere Reichweite als die Batterieelektroautos. So hat das Tesla Model S laut Tesla eine maximale Reichweite von

³⁹ Ebenda, S. 279.

⁴⁰ Swain, Dr. Micheal R.: Fuel Leak Simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, U. S. Department of Energy, NREL/CP-570-30535, 2001 <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf>, 05.01.2020. S. 2.

⁴¹ Ebenda, S. 8 – 11.

⁴² Ebenda, S. 3.

⁴³ ADAC: Alternative Antriebe – Reichweitenvergleich. 06.07.2018: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/alternative-antriebe/?redirectId=quer.alterativeantriebe>, 01.03.2020.

⁴⁴ Hyundai Motor Deutschland: Hyundai Nexo. Technische Daten. 09.2018: <https://www.hyundai.news/fileadmin/de/Pressemappen/Nexo/hyundai-nexo-sep2018-technische-daten.pdf>, 01.03.2020.

610 km⁴⁵. Damit ist es das Batterieelektroauto mit der deutlich höchsten Reichweite. Trotzdem liegt es damit rund 60 km hinter dem Hyundai NEXO. Auch andere BZ-Autos, wie z.B. der Honda Clarity, bieten Reichweiten von über 600 km. Dazu kommt, dass BZ-Autos innerhalb von 3 bis 5 Minuten vollgetankt sind⁴⁶. Für längere Fahrten sind sie also besser geeignet als Elektroautos, die selbst an Schnellladestationen über 40 Minuten zum Laden brauchen⁴⁷.

Ein Nachteil von BZ-Autos ist jedoch, dass man das Auto nicht an der heimischen Steckdose auftanken kann, wie es bei Batterieelektroautos der Fall ist. Wie beim Auto mit Verbrennungsmotor muss man dafür eine Wasserstofftankstelle aufsuchen. Diese verdichten Wasserstoff auf 700 bar. Aufgrund des Überdrucks strömt der Wasserstoff dann innerhalb von wenigen Minuten in den Tank des BZ-Autos⁴⁸. Jedoch gibt es von diesen Tankstellen derzeit nur 82 in Deutschland (siehe Abb. 6). Diese befinden sich hauptsächlich in Ballungsräumen wie Hamburg oder dem Ruhrgebiet. Während es dort bereits ein recht dichtes Tankstellennetz gibt, ist das Netz in Mittel- und Nordostdeutschland, sowie in besonders ländlichen Gebieten noch nicht gut ausgebaut. So müsste ein Schweriner Besitzer eines BZ-Autos jedes Mal nach Rostock oder Hamburg fahren, um sein Auto tanken zu können. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich dieses Problem in Zukunft erübrigen wird, da mit der Anzahl an BZ-Fahrzeugen auch der Bedarf und somit das Angebot an Wasserstofftankstellen steigen wird.

So befinden sich aktuell noch 23 Tankstellen in der Realisierungsphase. Um diese Entwicklung zu stärken, fördert die Bundesregierung Wasserstofftankstellen und Elektrolyseure. Dabei wird darauf geachtet, dass der Wasserstoff möglichst nur mit erneuerbaren Energien produziert wird. Diese Förderung soll außerdem dazu beitragen, den Preis von Wasserstoff weiter zu senken⁴⁹. Aktuell kostet ein Kilogramm Wasserstoff an der Tankstelle 9,50 €/kg. Auch wenn Diesel schon ab ca. 1,10 €/L erhältlich ist (Preisangaben für Hamburg am Abend des 01.03.2020)⁵⁰, liegt der Preis pro 100 km bei einem VW Tiguan somit mit ca. 6,80 €/100 km⁵¹ nur etwa

⁴⁵ ADAC: Alternative Antriebe – Reichweitenvergleich, 01.03.2020.

⁴⁶ H2 Mobility Deutschland: Wasserstoffautos. Alle Modelle im Überblick. <https://h2.live/wasserstoffautos>, 01.03.2020.

⁴⁷ Tesla, 01.03.2020

⁴⁸ Hyundai Motor Deutschland, 09.03.2020.

⁴⁹ BMVI: Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). <https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/nipii-massnahmen-bmvi.pdf>, S. 6 f. 01.03.2020.

⁵⁰ InfoRoad GmbH: <https://www.clever-tanken.de/>, 01.03.2020.

⁵¹ ADAC: VW Tiguan im ADAC Test: Der SUV-Bestseller. 25.04.2019. <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-tiguan/>, 01.03.2020.

1 € niedriger als bei einem Hyundai NEXO, der im einen Wasserstoffverbrauch von 0,84 kg/100 km hat⁵².

4. Nachhaltigkeit eines Brennstoffzellenautos

4.1 Kostenstruktur und ökologische Auswirkungen der Produktion von Brennstoffzellenautos

Die Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Produktion von BZ-Autos umfasst verschiedene Formen der Umweltbelastung. So wird nicht nur die Menge an Treibhausgasen angegeben, sondern auch die Versäuerung der Umwelt durch den Ausstoß von Schwefeldioxid (SO₂), sowie von verschiedenen Stickoxiden (NO_x) und die Menge an verschiedenen, für den Menschen oder die Natur, toxischen Stoffen. Aufgrund dessen, dass sich die Karosserie, sowie das Interieur nicht zwangsläufig von dem anderer Autos unterscheidet, wird dabei nur auf den Antriebsstrang eingegangen.

Wie in Abb. 7 gezeigt, wirken sich die verschiedenen Bestandteile eines BZ-Autos unterschiedlich stark auf die Umweltaspekte aus. Aufgrund der technischen Entwicklung in den letzten 4 Jahren und des Anstiegs der Stückzahl auf mehrere tausend BZ-Autos pro Jahr⁵³, ist der tatsächliche Stand 2020 ein ungefährender Mittelwert aus den Daten für 2017 und der konservativeren Vorhersage für 2030.

Das Ziel der BZ-Autos ist es, eine klimafreundliche Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu bieten. Daher stehen besonders der Ausstoß von Treibhausgasen, SO₂ und NO_x im Fokus dieser Untersuchung. Beim Betrachten der Abb. 7 wird deutlich, dass besonders zwei Bestandteile problematisch für die Umweltbilanz des BZ-Autos sind. Das erste dieser Bestandteile bietet dabei der Wasserstofftank. Dieser ist für ca. 50% der freiwerdenden Treibhausgase verantwortlich. Der Grund dafür sind die Kohlenstofffaserverbundstoffe, aus denen die Tanks bestehen. Diese sind unter anderem sehr energieaufwendig in der Produktion. Dazu tragen die Tanks aktuell und voraussichtlich auch in Zukunft massiv zu den Produktionskosten eines BZ-Autos bei. Da auch dies hauptsächlich auf die Kohlenstofffaserverbundstoffe zurückzuführen ist, gilt es als ein Ziel der Forschung,

⁵² H2 Mobility Deutschland: Wasserstoffautos. Alle Modelle im Überblick, 01.03.2020.

⁵³ Hyundai: Hyundai präsentiert Wasserstoff-Fahrplan bis 2030. 14.12.2018, <https://www.hyundai.news/de/modell-news/hyundai-praesentiert-wasserstoff-fahrplan-bis-2030/?L=0>, 08.03.2020.

deren Anteil in den Tanks zu senken, ohne das Gewicht massiv zu erhöhen oder die Sicherheit der Insassen des Fahrzeuges zu gefährden⁵⁴.

Der zweite im Sinne der Umwelt problematische Bestandteil eines BZ-Autos ist das Platin. Dieses wird, wie in Kapitel 2.1 erläutert, als Katalysator in der BZ eingesetzt. Anders als bei den Tanks geht es jedoch im Fall des Platins nicht um die industrielle Verarbeitung, sondern den Abbau. Dabei werden große Mengen an SO₂ freigesetzt, welches nicht nur als Treibhausgas wirkt, sondern auch für eine Versäuerung des Regens und somit auch des Bodens sorgt. Zusätzlich dazu kommt es bei dem Abbau von Platin zu einer starken Verschmutzung des Wassers sowie der Luft durch eine starke Staubbildung⁵⁵. Des Weiteren kann der Abbau von Platin, besonders aufgrund des Entstehens von SO₂, auch beim Menschen zu Gesundheitsproblemen führen. Der Großteil der weiteren toxischen Stoffe entsteht bei der Entsorgung der Peripherie der BZ⁵⁶.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 angeführt trägt, das Platin zusätzlich zu dem hohen Preis der BZ-Autos bei und wird die auch in Zukunft. Um den Abbau von Platin und die damit einhergehenden Nachteile bzw. Schäden so gering wie möglich zu halten, wird versucht das Platin in BZ zu verringern (Siehe Kapitel 2.1.2) und Platin aus alten BZ zu recyceln (Siehe Kapitel 4.3). Aktuell wird der Gesamtpreis von BZ-Autos noch stark von den geringen Stückzahlen bestimmt. Steigen diese weiter würde der Preis sinken, da Entwicklungskosten breiter verteilt würden und die Produktionskosten aufgrund eines höheren Automatisierungsgrades sinken würden⁵⁷.

4.2 Langlebigkeit eines Brennstoffzellenautos

Um die Umwelt zu schützen ist es wichtig, dass so wenig Ressourcen wie möglich verbraucht werden. Daher sollte ein BZ-Auto nicht nur emissionsfrei betrieben werden können, sondern auch möglichst lange und ohne das Benötigen von vielen Ersatzteilen einsetzbar sein. Zudem macht eine hohe Langlebigkeit ein Produkt attraktiver für den Kunden.

Im Verlauf der Recherche für diese Facharbeit hat sich herausgestellt, dass aktuell Hersteller von BZ-Autos kaum Angaben für den längeren Betrieb ihrer Fahrzeuge machen. Eine Bewertung der Langlebigkeit und der nötigen Maßnahmen zur

⁵⁴ Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian, S 104.

⁵⁵ Wittstock, Rikka; Pehlken, Alexandra; Wark, Michael: „Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling“, in: Recycling 1/2016, S. 344.

⁵⁶ Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian, S 104.

⁵⁷ Ebenda, S. 104

Instandhaltung der Fahrzeuge ist also nur eingeschränkt möglich und wird hier am Beispiel des Hyundai NEXO durchgeführt.

Vom Werk aus besitzt der NEXO eine allgemeine Fahrzeuggarantie von 5 Jahren ohne Kilometerbeschränkung. Die Garantie auf die, in Kapitel 2.2 erläuterte, Lithiumionenbatterie gilt hingegen nur für die ersten 200.000 km bzw. 8 Jahre⁵⁸. Die Wahrscheinlichkeit, dass bereits kurz nach 200.000 km, bzw. schon davor Probleme auftreten ist jedoch sehr hoch, da die Batterie nur eine Kapazität von 1,56 kWh⁵⁹ hat und aktuelle Lithiumionenbatterien bereits nach ca. 2000 Ladezyklen nur noch ca. 30% der ursprünglichen Kapazität aufweisen⁶⁰.

Auch das BZ-System erreicht nur knapp die 200.000 km Marke, wenn das Auto mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von über 36 km/h gefahren wird. Das liegt daran, dass BZ momentan nur eine Lebensdauer von ca. 5.500 h haben⁶¹. Um sicherzustellen, dass sich keine Probleme entwickeln muss der Hyundai NEXO, ähnlich wie andere Autos, alle 30.000 km bzw. alle zwei Jahren zu einer Inspektion⁶². Sollten so die 200.000 km erreicht werden, kann das BZ-Auto, bei einer durchschnittlichen, jährlichen Fahrleistung von ca. 14.000 km⁶³, immerhin ca. 14 Jahre betrieben werden, ohne das BZ-System oder die Batterie zu tauschen.

Der sonstige Antriebsstrang hat kaum Punkte, die häufig mechanischem Stress ausgesetzt sind. So besteht ein Elektromotor aus deutlich weniger Teilen als ein Otto- oder Dieselmotor. Dazu ist dieser ohne eine Kupplung direkt an ein einstufiges Getriebe angeschlossen. Zudem wird die mechanische Bremse durch das Rekuperieren und somit Bremsen des Elektromotors entlastet⁶⁴. Es entfallen also viele der Verschleißpunkte eines herkömmlichen Autos oder werden zumindest entlastet. Somit sollte ein BZ-Auto, durch das Tauschen von BZ und Batterie, über deutlich weitere Strecken als 200.000 km verwendbar sein.

4.3 Recycling von Brennstoffzellen

Um, möglichst ressourcensparend und somit nachhaltig zu sein, sollten BZ-Autos jedoch nicht nur lange betrieben, sondern auch am Ende ihres „Lebens“ recycelt

⁵⁸ Hyundai: Das Garantiepaket zu Ihrem neuen Hyundai. <https://www.hyundai.de/beratung-kauf/garantien/>, 07.03.2020.

⁵⁹ Hyundai Motor Deutschland, 07.03.2020.

⁶⁰ K. H. Chen and Z. D. Ding, „Lithium-ion battery lifespan estimation for hybrid electric vehicle“, in: The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, 2015, S. 5602-5605.

⁶¹ Ahmadi, Pouria; Kjeang, Erik: „Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles“, in: International Journal of Energy Research. 2016, S. 10.

⁶² Hyundai Motor Deutschland, 07.03.2020.

⁶³ Kraftfahrt-Bundesamt: Verkehr in Kilometern (VK). Revisionsbericht. Flensburg, Kraftfahrt-Bundesamt, 12019. S. 8.

⁶⁴ Hyundai Motor Deutschland, 07.03.2020.

werden. So können Materialien immer wieder eingesetzt werden. Aktuell werden jedoch recht wenige PKW recycelt. Der Grund dafür ist, dass die meisten PKW, die in Deutschland keine neuen Besitzer mehr finden, in Osteuropäische Länder verkauft werden. Von dort aus gelangen sie schließlich, nach einer weiteren Nutzungsphase, in Entwicklungsländer. In diesen findet jedoch selten Recycling statt, weshalb die meisten Fahrzeuge lediglich auf einen Schrotthof ausrangiert werden.

Allerdings ist die Chance, dass bei BZ-Autos ein höherer Anteil in der EU verbleibt sehr hoch, da die Notwendigkeit einer Wasserstoffinfrastruktur die PKW für ein Entwicklungsland uninteressant macht⁶⁵. Wird ein BZ-Auto über mehrere BZ-Lebenszyklen betrieben ist dies grundsätzlich umwelt- und ressourcenschonender als die Fahrzeuge nach einem Zyklus auszurangieren, da so nur die BZ ersetzt werden muss und nicht das gesamte restliche Fahrzeug.

Die ausrangierten BZ könnten dann recycelt werden. Das Ziel des Recyclings von BZ liegt dann vor allem darin, möglichst viel Platin zurückzugewinnen. Damit soll in Zukunft ein Teil des benötigten Platins gedeckt und so die in Kapitel 4.1 angesprochene Umweltbelastung verringert werden. Problematisch ist jedoch, dass das Platin bei der Herstellung der BZ fest in das Nafion (zur Erläuterung siehe Kapitel 2.1.1) eingebettet wird. Daher ist es sehr schwierig reines Platin aus alten BZ zu gewinnen.

Die meisten aktuell verfügbaren Methoden, wie das Lösen des Platins aus dem Elektrolyten durch verschiedene Laugen, sind jedoch stark umweltbelastend. Der Grund dafür ist, dass sich unter anderem das Fluor aus dem Material freisetzen kann. Daher sind diese nur geringfügig einsetzbar. Aus diesem Grund wird momentan an Alternativen geforscht, die Platin aus dem Nafion lösen, ohne Fluor freizusetzen. So hat beispielsweise die Daimler AG ein Patent angemeldet, das beschreibt, dass die BZ zunächst einem Ultraschall ausgesetzt wird. So soll in Zukunft nicht nur das Platin, sondern auch ein Teil der Membran oder des noch intakten Elektrolyten wiederverwendet werden⁶⁶. Wie gut dies in der Praxis funktioniert kann, aufgrund der bislang nicht vorhandenen, ausrangierten Serienfahrzeugen mit BZ-Technik, noch nicht abschließend bewertet werden und bleibt daher abzuwarten.

⁶⁵ Wittstock, Rikka; Pehlken, Alexandra; Wark, Michael. S. 347.

⁶⁶ Ebenda, S. 350 f.

5. Fazit

In Anbetracht der in dieser Facharbeit dargelegten Fakten lässt sich die Frage, ob BZ-Autos ein Schlüssel zur Mobilitätswende sind, grundsätzlich mit ja beantworten. Allerdings ist dafür entscheidend, dass die folgenden drei Voraussetzungen erfüllt sind: Klimaneutraler Strom, ein flächendeckendes Wasserstofftankstellennetz und ein niedrigerer Preis.

Wie bereits in der Einleitung erläutert, ist es das Ziel der Mobilitätswende den Ausstoß von Treibhausgasen im Verkehrssektor drastisch zu senken bzw. letztendlich den Null zu reduzieren. Dies ist nur möglich, wenn der Treibstoff, mit dem die Fahrzeuge betrieben werden, auch Klima- und CO₂-neutral ist. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, bietet die Elektrolyse die Möglichkeit Wasserstoff, ohne den Ausstoß klimarelevanter Gase, zu produzieren. Dazu muss diese jedoch mit grünem Strom betrieben werden. Solange die Elektrolyse zu Teilen mit Strom aus Kohle oder Erdgas betrieben wird, spielt der Energieverbrauch der Fahrzeuge noch eine tragende Rolle für die Treibhausgasbilanz. In diesem Fall ist das Batterieelektroauto die bessere Alternative zu dem herkömmlichen Auto mit Verbrennungsmotor⁶⁷. Der Grund dafür ist, dass, wie in Kapitel 3.1 geschildert, das direkte Laden mit rund 90% eine deutlich höhere Effizienz hat als der Umweg, über Wasserstoff und die BZ, bei dem etwa 50% der Energie verloren gehen.

Wird der Wasserstoff hingegen mit grünem Strom betrieben hat das BZ-Auto die beste Treibhausgasbilanz (siehe Abb. 8). Nach etwa 150.000 km sind einem kompakten BZ-Auto mit einer Reichweite von ca. 580 km so insgesamt ca. 7,2 t CO₂eq (Treibhausgase äquivalent zu 7,3 t CO₂) weniger anzurechnen als einem kompakten PKW mit Benzinmotor (beispielsweise vergleichbar mit einem VW Golf). Auch einem Batterieelektroauto mit einer Reichweite von nur 420 km wären auf dieser Strecke ungefähr 1,5 t CO₂eq mehr anzurechnen als dem BZ-Auto. Das klimatechnisch problematische Bauteil bei dem Batterieelektroauto ist die Lithiumionenbatterie. Diese ist nicht nur sehr teuer und bei hohen Kapazitäten sehr schwer, sondern zudem ist sie sehr klimaschädlich. So würde, bei einer doppelt so großen Batterie, das Batterieelektroauto für mehr Treibhausgase verantwortlich sein, als das herkömmliche Auto (siehe Abb.8). Für Fahrzeuge, die eine hohe Reichweite benötigen, ist das BZ-Auto mit seinen Reichweiten von über 600 km (siehe Kapitel 3.3) also die beste Wahl.

⁶⁷ Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian: S.118 f.

Allerdings liegt der Vorteil des Batterieelektroautos in dieser Skalierbarkeit der Reichweite. So ließe sich der Treibhausgasausstoß bei der Produktion, durch eine kleinere Batterie, deutlich verringern. Für kleine Autos, die beispielsweise nur in der Stadt fahren und dort nur kurze Strecken bewältigen, ist dies also die bessere Alternative. In ländlichen Regionen hingegen kommt es oft zu längeren Arbeitswegen. Für diese Menschen ist also ein Auto mit einer größeren Reichweite wichtig. Ist die zweite Voraussetzung, also das Bestehen eines flächendeckenden Tankstellennetzes, erfüllt, so ist das BZ-Auto für diese Menschen die klimafreundliche Mobilitätslösung. Damit diese Voraussetzung jedoch erfüllt wird, muss die Strategie Wasserstofftankstellen in Ballungsräumen zu errichten so umgeändert werden, dass das Ziel darin besteht den ländlichen Raum zu decken. So würde sich den ca. 35 Millionen Deutschen, die in Gemeinden mit bis zu 20.000 Einwohnern leben, eine sinnvolle Alternative zum Verbrennungsmotor bieten⁶⁸. Auch für andere Transportmittel, wie LKWs, Busse oder Bahnen, die eine hohe Reichweite und schnelle Tankzeiten fordern, wäre die BZ-Technologie eine klimafreundlichere Alternative⁶⁹.

Zu guter Letzt muss das BZ-Auto aber vor allem günstiger werden. Der Hyundai NEXO hat so z.B. einen Listenpreis von 69.000 €⁷⁰. Auch wenn Umweltsubventionen den Preis noch verringern, ist dieser für einen SUV der Mittelklasse sehr hoch. Wie in Kapitel 4.1 geschildert, sollte der Preis jedoch mit ansteigenden Stückzahlen fallen und somit BZ-Autos der breiteren Bevölkerung zugänglich machen.

Abschließend lässt sich sagen, dass das BZ-Auto durchaus den Ausstoß von Treibhausgasen im Transportsektor senken kann. Sinnvoll ist ein Einsatz dabei in ländlichen Regionen, in denen die Menschen auf höhere Reichweiten und individuelle Fortbewegungsmöglichkeiten angewiesen sind. Klar ist allerdings auch, dass BZ-Autos keinen CO₂-neutralen Personenverkehr ermöglichen, da bei der Produktion und Entsorgung Treibhausgase freigesetzt werden. Die klimafreundlichste Art sich fortzubewegen bleiben somit, neben dem Fahrrad, die Öffentlichen Verkehrsmittel⁷¹. Besonders Menschen, die in Städten leben, sollten daher, im Sinne der Umwelt, auf diese zurückgreifen.

⁶⁸ Zeit Online: Stadt, Land Vorurteile. 12.09.2017: <https://www.zeit.de/feature/deutsche-bevoelkerung-stadt-land-unterschiede-vorurteile>, 10.03.2020.

⁶⁹ Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 137 ff.

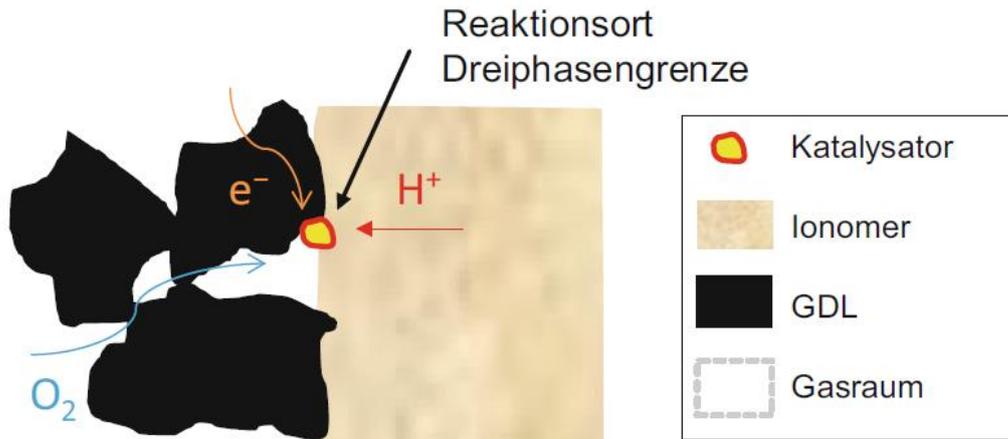
⁷⁰ ADAC: Hyundai Nexo 1.Generation. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/nexo/1generation/>, 10.03.2020.

⁷¹ Umweltbundesamt: Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland – Bezugsjahr 2018. 15.01.2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/bilder/dateien/vergleich_der_durchschnittlichen_emissionen_einzelner_verkehrsmittel_im_personenverkehr_bezugsjahr_2018_tabelle.pdf, 10.03.2020.

6. Anhang

Abb.1

Dreiphasengrenze in der Kathode einer BZ.



Quelle: Kell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander, S. 147.

Abb. 2

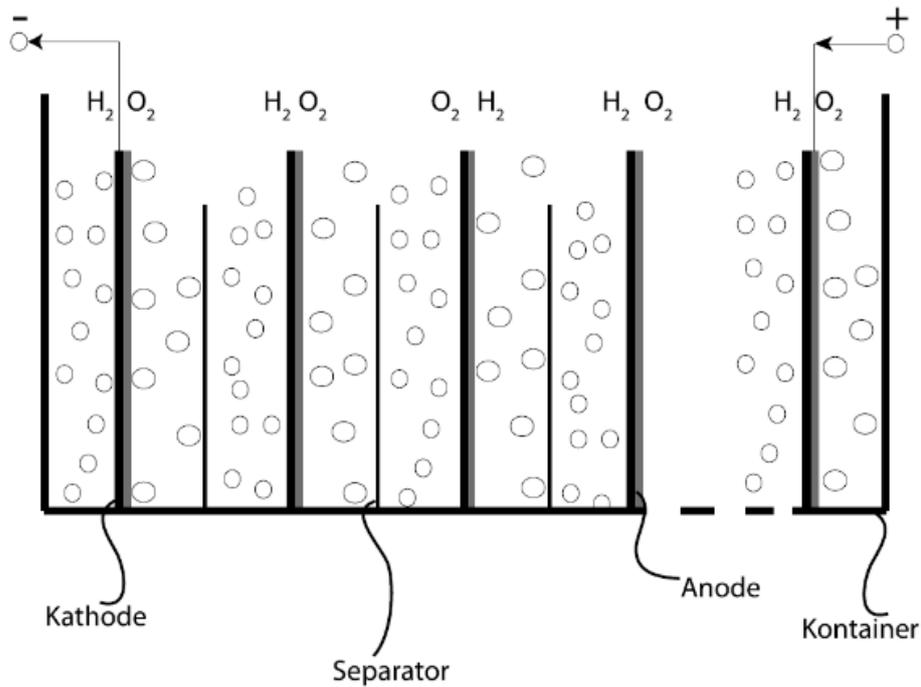
Kennwerte für den Betrieb einer Brennstoffzelle bei verschiedenen Temperaturen.

Form of water product	Temperature (°C)	$\Delta\bar{g}_f$ (kJ mol ⁻¹)	Maximum open-circuit voltage (V)	Efficiency limit (HHV) (%)
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.3	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

Quelle: Dicks, Andrew L.; Rand, David A. J., S. 34.

Abb. 3

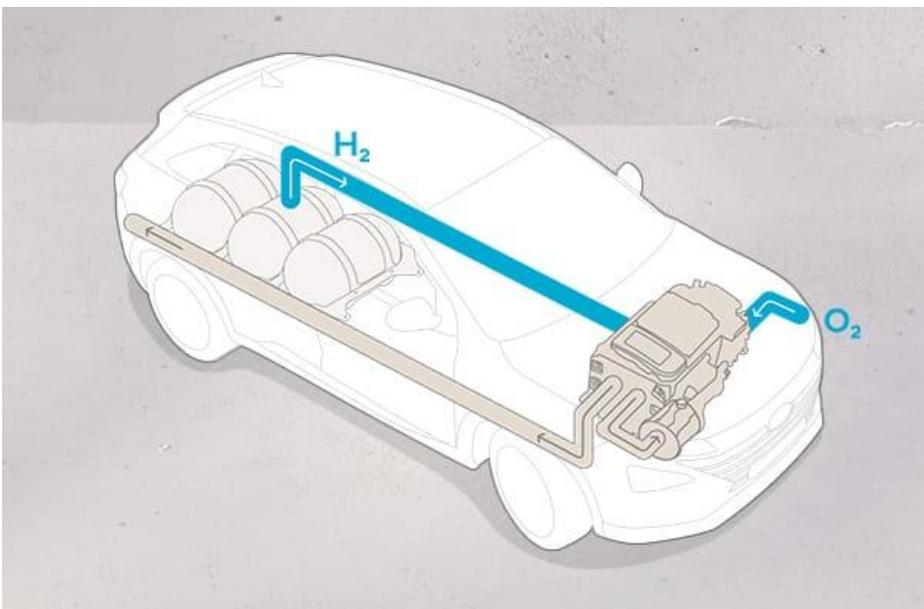
Bipolares Design eines alkalischen Elektrolyseurs (AEL).



Quelle: Noack, Christoph; ...; Schneider, Gregor-Sönke: S. 14.

Abb. 4

Die Position der Tanks im Hyundai NEXO.



Quelle:
[https://www.hyundai.de/modelle/nexo-\(1\)/img/nexo_technik_step1.aspx/](https://www.hyundai.de/modelle/nexo-(1)/img/nexo_technik_step1.aspx/)

Abb. 5

Das Brandbild nach einer Minute.



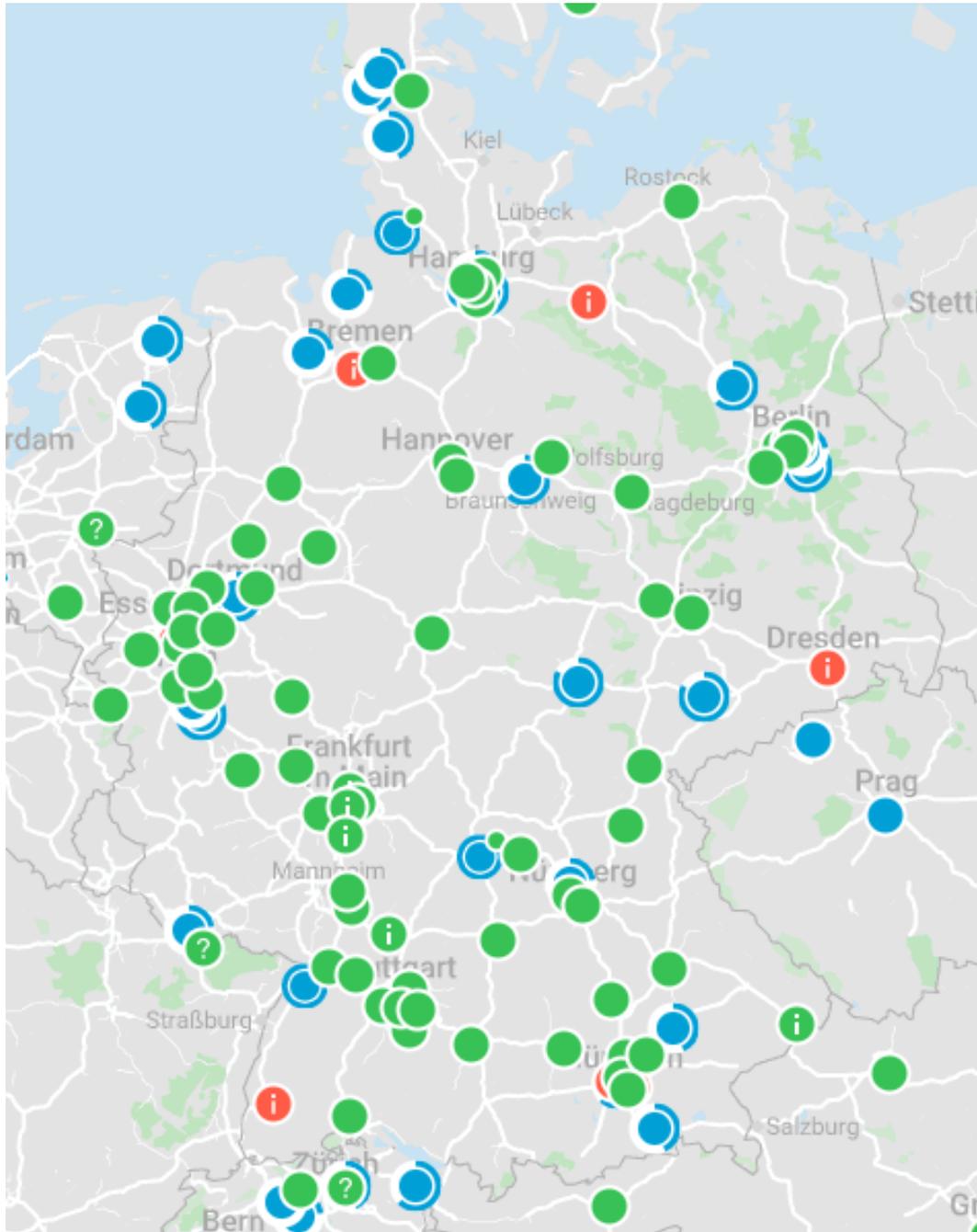
Quelle :

Swain, Dr. Micheal R.: Fuel Leak Simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, U. S. Department of Energy, NREL/CP-570-30535, 2001
<https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf>,
05.01.2020.

S. 9.

Abb. 6

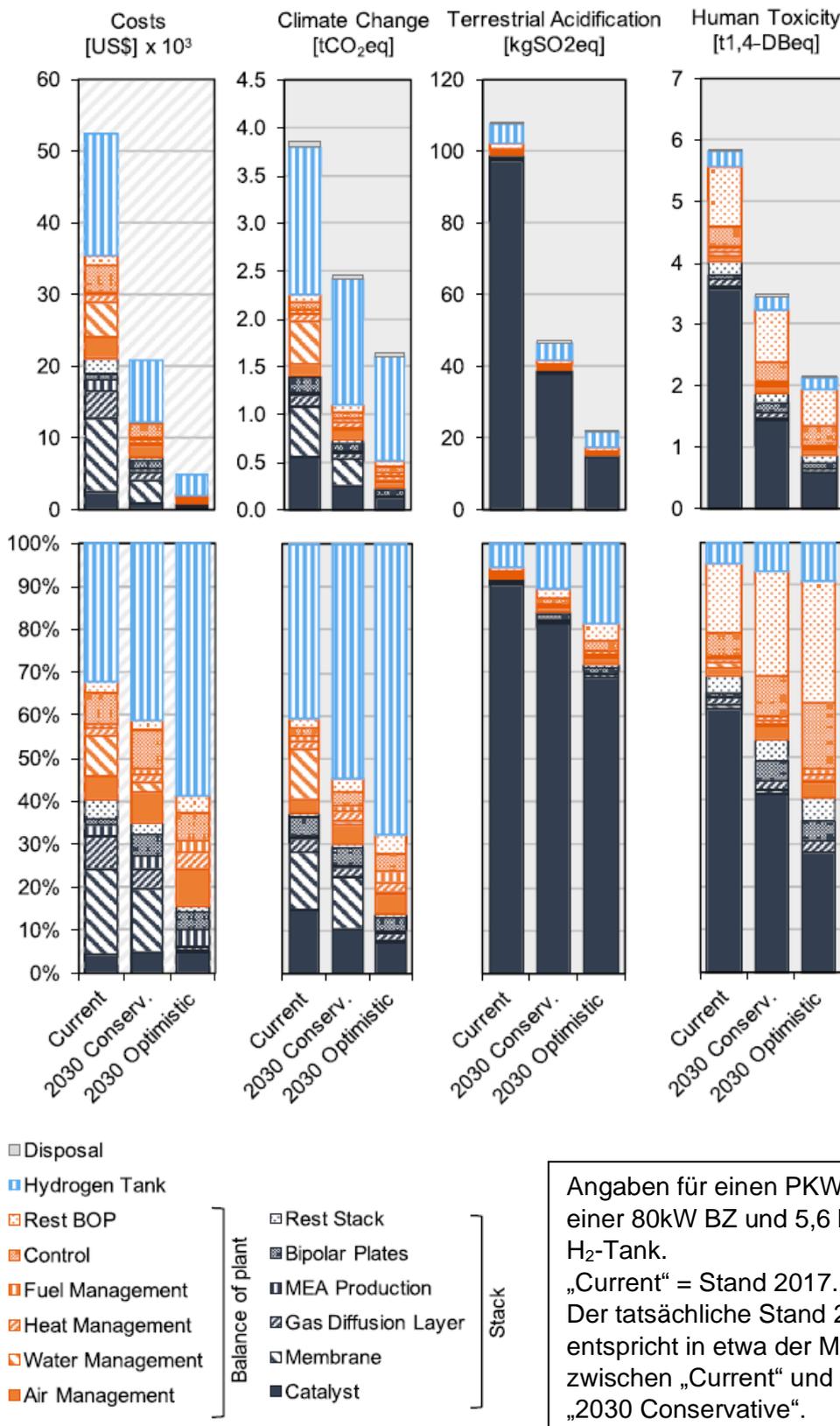
Wasserstofftankstellen in Deutschland (Grün = in Betrieb; Rot = Störung/ Wartung; Blau = geplant/ in der Realisierung).



Quelle: H2 Mobility Deutschland: <https://h2.live/tankstellen>, 01.03.2020

Abb. 7

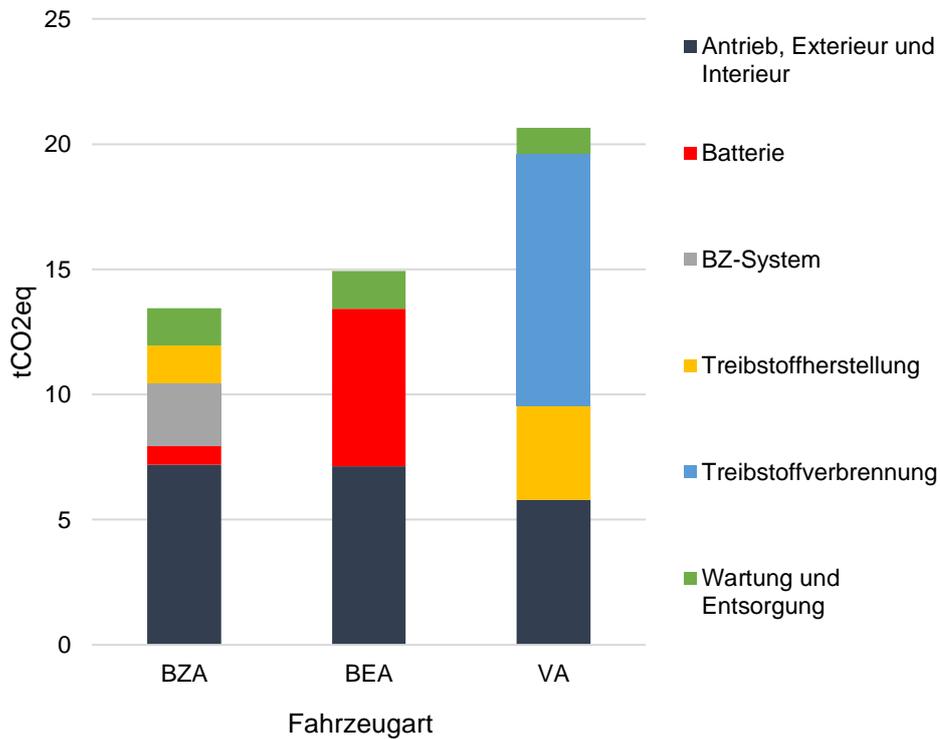
Kosten und Umweltauswirkungen der Produktion des Antriebstrangs von BZ-Autos.



Quelle: Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian: „Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles“, in: Int J Life Cycle Assessment. Nr. 22/2017, S. 105.

Abb. 8

Treibhausgasbilanz von einem kompakten BZ-Auto im Vergleich (nach 150.000km).



Daten nach:

Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian: „Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles”, in: Int J Life Cycle Assessment. Nr. 22/2017, S. 94–110.

BZA = BZ-Auto der mit einer Reichweite von ca. 580 km.
 BEA = kompaktes Batterieelektroauto mit einer Reichweite von ca. 320 km.
 VA = Kompakter PKW mit Verbrennungsmotor und einer Reichweite von ca. 900 km.

Alle drei PKWs sind in eine Größenordnung mit z.B. VW Golf oder Ford Focus einzuordnen.

BZ-Auto und BEA werden mit Windstrom betrieben.

7. Literaturverzeichnis

Bücher:

- Dicks, Andrew L.; Rand, David A. J.: Fuel Cell Systems Explained. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., ³2018.
- Europäische Kommission: Der europäische Grüne Deal, Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel: 2019.
- Jiang, Juichun; Zhang Caiping: Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles. Singapur: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., ¹2015.
- Kell, Manfred; Eichlseder, Helmut; Trattner, Alexander: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Springer Vieweg, ⁴2018.
- Krafftahrt-Bundesamt: Verkehr in Kilometern (VK). Revisionsbericht. Flensburg, Krafftahrt-Bundesamt, ¹2019.
- Noack, Christoph; Burggraf, Fabian; Hosseiny, Seyed Schwan; Lettenmeier, Philipp; Kolb, Svenja; Belz, Stefan; Kallo, Josef; Friedrich, K. Andreas; Pregger, Thomas; Cao, Karl-Kiên; Heide, Dominik; Naegler, Tobias; Borggreffe, Frieder; Bünger, Ulrich; Michalski, Jan; Raksha, Tetyana; Voglstätter, Christopher ;Smolinka, Tom; Crotogino, Fritz; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Schneider, Gregor-Sönke: Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Stuttgart: DLR, 05.02.2015
- Schröder, Dierk: Elektrische Antriebe – Grundlagen. Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, ⁵2013.

Dissertationen:

- Ackermann, Stefan: Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Vergleich von AEM-Membran-Elektroden-Einheiten. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität. 2018.
- Tymen, Simon: Palladium-Platinum nanoparticles : well-structured bimetallic catalysts for fuel cells. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 2018.

Zeitschriftenartikel und Aufsätze:

- Ahmadi, Pouria; Kjeang, Erik: „Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles“, in: International Journal of Energy Research. 1/2016, S. 10.
- Bekel, Kai, Pauliuk, Stefan: “Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany“, in: Int J Life Cycle Assess 24/2019. S. 2220–2237.
- K. H. Chen and Z. D. Ding, "Lithium-ion battery lifespan estimation for hybrid electric vehicle", in: The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, 2015, S. 5602-5605.

- Miotti, Marco, Hofer, Johannes; Bauer, Christian: „Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles“, in: Int J Life Cycle Assessment. Nr. 22/2017, S. 94–110.
- Wittstock, Rikka; Pehlken, Alexandra; Wark, Michael: „Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling“, in: Recycling 1/2016, S. 343-364.

Internetquellen:

- ADAC: Alternative Antriebe – Reichweitenvergleich. 06.07.2018: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/alternative-antriebe/?redirectId=quer.alterativeantriebe>, 01.03.2020.
- ADAC: Hyundai Nexo 1.Generation. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/nexo/1generation/>, 10.03.2020
- ADAC: Mercedes GLC 250 4MATIC G-TRONIC (15-18). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes/glc/253/248581/#technische-daten>, 05.01.2020.
- ADAC: VW Tiguan im ADAC Test: Der SUV-Bestseller. 25.04.2019. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-tiguan/>, 01.03.2020.
- BMVI: Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). <https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/nipii-massnahmen-bmvi.pdf>, 01.03.2020.
- Bundesregierung: So funktioniert der neue Umweltbonus. 18.11.2019. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/umweltbonus-1692646>, 29.12.2019.
- Daimler AG: Geschäftsbericht 2007. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2007.pdf>, 03.01.2020.
- Daimler AG: Geschäftsbericht 2011. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2011.pdf>, 03.01.2020.
- Daimler AG: Mercedes Benz GLC F-Cell. Besonderer Hybrid mit Brennstoffzelle. 27.09.2019. <https://www.daimler.com/produkte/pkw/mercedes-benz/glc-f-cell.html>, 03.01.2020.
- Hyundai: Das Garantiepaket zu Ihrem neuen Hyundai. <https://www.hyundai.de/beratung-kauf/garantien/>, 07.03.2020
- Hyundai: Der Hyundai NEXO. <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>, 05.01.2020.
- Hyundai: Hyundai präsentiert Wasserstoff-Fahrplan bis 2030. 14.12.2018, <https://www.hyundai.news/de/modell-news/hyundai-praesentiert-wasserstoff-fahrplan-bis-2030/?L=0>, 08.03.2020.
- Hyundai Motor Deutschland: Hyundai Nexo. Technische Daten. 09.2018: <https://www.hyundai.news/fileadmin/de/Pressemappen/Nexo/hyundai-nexo-sep2018-technische-daten.pdf>, 01.03.2020.
- H2 Mobility Deutschland: <https://h2.live/tankstellen/>, 01.03.2020
- H2 Mobility Deutschland: Wasserstoffautos. Alle Modelle im Überblick. <https://h2.live/wasserstoffautos/>, 01.03.2020

- ¹Rudschies, Wolfgang: Mercedes GLC F-Cell: Elektroauto mit Brennstoffzelle, 29.10.2019. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes/mercedes-glc-fuel-cell/>, 05.01.2020.
- Swain, Dr. Micheal R.: Fuel Leak Simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, U. S. Department of Energy, NREL/CP-570-30535, 2001 <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf>, 05.01.2020.
- Umweltbundesamt: Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland – Bezugsjahr 2018. 15.01.2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/bilder/dateien/vergleich_der_durchschnittlichen_emissionen_einzelner_verkehrsmittel_im_personenverkehr_bezugsjahr_2018_tabelle.pdf, 10.03.2020.
- Zeit Online: Stadt, Land Vorurteile. 12.09.2017: <https://www.zeit.de/feature/deutsche-bevoelkerung-stadt-land-unterschiede-vorurteile>, 10.03.2020.

Titelbild:

[https://www.hyundai.de/modelle/nexo-\(1\)/img/nexo_highlight_modul1_detail.aspx/](https://www.hyundai.de/modelle/nexo-(1)/img/nexo_highlight_modul1_detail.aspx/), 06.01.2020.

8. Eigenständigkeitserklärung und Veröffentlichungserlaubnis

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebene Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken kenntlich gemacht habe.

Oyten, den
Ort

17.03.2020
Datum


Unterschrift

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Oyten, den
Ort

17.03.2020
Datum


Unterschrift