

Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven

Studie

Dr. Oliver Ehret
Center of Automotive Management (CAM)

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven

Studie

Januar 2020

DVGW-Förderkennzeichen G 201910

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht Stand, Trends und Zukunftsperspektiven der wasserstoffbasierten Mobilität hinsichtlich der Leitfrage, inwieweit zukünftig lukrative Märkte für die Hersteller und Transporteure von Wasserstoff (H₂) entstehen könnten. Daneben wird eine Reihe spezieller technischer, ökonomischer und ökologischer Erkenntnisinteressen verfolgt.

Es zeigt sich, dass eine substantielle politische Unterstützung und zunehmende Dynamik der H₂-Mobilität in der EU, Deutschland und weiteren untersuchten Ländern besteht. Durch Technologieförderprogramme unterstützt, bauen privatwirtschaftliche und öffentliche Akteure Flotten mit Brennstoffzellen (BZ) betriebener Fahrzeuge sowie H₂-Infrastrukturen aus.

Regulative Vorgaben der EU insbesondere zur Begrenzung des Ausstoßes von Kohlendioxid (CO₂) von PKW und LKW sowie zur Beschaffung CO₂-freier Fahrzeuge wirken als starke Treiber der H₂-Mobilität. Zentrale Anforderungen sind derzeit nur durch brennstoffzellen- oder batterieelektrische Fahrzeuge zu erfüllen. Der Einsatz erneuerbarer und CO₂-armer Kraftstoffe inklusive von H₂ ist gefordert.

Weltweit sind um die 18.000 BZ-PKW im Einsatz und asiatische Hersteller bauen ihre Produktionskapazitäten deutlich aus. Im April 2019 waren in der EU etwa 1.500 BZ-PKW in Betrieb und die Beschaffung weiterer 1.400 Fahrzeuge geplant. BZ-Busse werden in größeren Stückzahlen betrieben. Voraussichtlich kommen in den nächsten Jahren über 2.000 schwere BZ-LKW in der Schweiz und den USA zum Einsatz. Die heute noch hohen Kosten von BZ-Fahrzeugen werden Studien und Stakeholdern zufolge durch Skaleneffekte deutlich sinken.

Mitte Januar 2020 sind in Deutschland 81 Tankstellen für BZ-PKW in Betrieb und 24 Anlagen in Realisierung. Bei zunehmender Nachfrage kann das Netz in den nächsten Jahren auf 400 Tankstellen wachsen. Im April 2019 waren EU-weit 173 Tankstellen einsatzbereit und 50 in Realisierung. Tankanlagen für Busse werden bedarfsgerecht aufgebaut. Die H₂-Versorgung per Wasserelektrolyse spielt hierbei eine zunehmend wichtige Rolle.

Studien ermitteln einen zukünftig stark steigenden H₂-Bedarf und gehen für Deutschland von mehreren hundert Terawattstunden bis 2050 aus. Für Europa werden H₂-Volumina im Petawattstundenbereich erwartet. Davon entfallen jeweils beträchtliche Anteile auf die H₂-Mobilität.

Ein Potenzialvergleich der H₂-basierten und der Gasmobilität zeigt in vielerlei Hinsicht eine ähnliche Zukunftsfähigkeit der Technologien. Beispielsweise verursachen beide über den Lebenszyklus nur sehr geringe Treibhausgasemissionen. Die oben genannten regulativen Vorgaben verschaffen der H₂-Mobilität aber wesentliche zukunftsgerichtete Vorteile.

Der für die Marktperspektiven der H₂-Mobilität wichtige regulative Rahmen ist relativ weit entwickelt. Während die Rahmenbedingungen der Marktentwicklung insgesamt förderlich sind, wird dennoch die Behebung verschiedener Defizite empfohlen.

Die Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität beginnt erst, entfaltet aber eine zunehmende Dynamik. Aller Voraussicht nach werden für die Hersteller und Transporteure von H₂ mittelfristig attraktive Märkte entstehen. Diese könnten durch den Aufbau von Erzeugungsanlagen für erneuerbaren H₂ oder die Bereitstellung von Infrastrukturen für Herstellung und Verteilung des H₂ für den Verkehr bedient werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Aufgabenstellung	1
2	Inhalte und Vorgehen	2
3	Wasserstoffmobilität in Europa	4
3.1	H ₂ -Mobilität auf überstaatlicher Ebene der Europäischen Union.....	4
3.2	Deutschland prinzipiell gut für H ₂ im Verkehr positioniert.....	6
3.3	Neue Dynamik der H ₂ -basierten Mobilität in Frankreich.....	8
3.4	Kontinuierlicher Ausbau der H ₂ -Mobilität im Vereinigten Königreich	10
3.5	Wiedererstarkung der H ₂ -basierten Mobilität in den Niederlanden.....	11
3.6	Unstetige Entwicklungen der H ₂ -Mobilität in Norwegen	13
3.7	Vergleichende Betrachtung im Kontext anderer Länder	14
4	Regulatorische Rahmenbedingungen.....	16
4.1	EU-Regularien zur Förderung der H ₂ -Mobilität	16
4.2	Politische Initiativen zur Förderung der H ₂ -Mobilität in Deutschland	19
4.3	Regulative Besonderheiten und Entwicklungsbedarfe in Frankreich.....	21
4.4	Gut entwickelter regulativer Rahmen im Vereinigten Königreich	22
4.5	Förderliche Rahmenbedingungen in den Niederlanden.....	22
4.6	Wirkungsvolle Anreize und Vorgaben in Norwegen	23
4.7	Die Umsetzungsebene gesetzlicher Bestimmungen.....	23
5	Vertiefende Untersuchung der H ₂ -Mobilität.....	24
5.1	Technologiekonzepte verschiedener BZ-Fahrzeugtypen.....	24
5.2	Der Markthochlauf von BZ-PKW: Akteure, Produkte, Perspektiven	26
5.3	Die zunehmende Bedeutung von Brennstoffzellenbussen.....	29
5.4	Brennstoffzellen-Lastkraftwagen als Zukunftstechnologie	32
5.5	Akzeptanz gegenüber BZ-Fahrzeugen und Wasserstoffinfrastruktur.....	37
5.6	Treibhausgasemissionen und Lebenszyklusbewertungen.....	39
5.7	Wasserstoff und Brennstoffzellen im Schienenbereich	43
6	Vertiefende Betrachtung der H ₂ -Infrastruktur	45
6.1	Klimafreundliche Verfahren der Wasserstoffproduktion	45
6.2	H ₂ -Transport mit Trailern und Pipelines.....	48
6.3	Wasserstofftankstellen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge	49
6.4	H ₂ -Tankstellen für Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge	53
7	Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage	55
7.1	Befunde der vorliegenden Untersuchung	55
7.2	Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse	56
7.3	Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen	57
7.4	Studie Transformationsstrategien für das Energiesystem.....	58
7.5	Hydrogen Roadmap Europe.....	59
8	Abgleich Potenziale H ₂ mit anderen Gasen	61
8.1	Fahrzeugverfügbarkeit	61
8.2	Betankungsinfrastruktur	62
8.3	Akzeptanz gegenüber Fahrzeugen.....	64

8.4	Nachhaltigkeit der Antriebskonzepte	65
8.5	Eignung zur Erfüllung regulatorischer Vorgaben	66
8.6	Fazit zu Marktperspektiven.....	67
9	Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H ₂ -Mobilität.....	70
9.1	Zugrundelegung von Well-to-Wheel- oder Lebenszyklusansätzen	70
9.2	Schaffung eines Herkunftsnachweissystems für H ₂	71
9.3	Ambitionierte Umsetzung der AFID	71
9.4	Optimierung der Genehmigungsverfahren für H ₂ -Tankstellen.....	71
9.5	Förderung von Marktaktivierung und F&E für BZ-Fahrzeuge.....	72
9.6	Förderung von Marktaktivierung und F&E für H ₂ -Infrastruktur	72
9.7	Restriktive Maßnahmen	74
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	75
10.1	Zusammenfassung und Ergebnisinterpretation	75
10.2	Schlussfolgerungen.....	81
	Literaturverzeichnis	83
	Abkürzungsverzeichnis.....	101
	Abbildungsverzeichnis.....	103
	Tabellenverzeichnis.....	104

1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. befasst sich seit langem mit Einsatzoptionen für komprimiertes Erdgas (*Compressed Natural Gas*: CNG) und Flüssigerdgas (*Liquefied Natural Gas*: LNG) im Verkehrsbereich. Als Beitrag für eine größere Nachhaltigkeit wurden auch die Potenziale von Biogas und synthetischem Erdgas untersucht. Mit der vorliegenden Studie sollen Stand, Trends und Zukunftsperspektiven der wasserstoffbasierten Mobilität in Deutschland und ausgewählten europäischen Ländern aufgezeigt werden. Dabei wird die Leitfrage verfolgt, welche wirtschaftlichen Potenziale im Bereich der Produktion und des Transports von H₂ der Gaswirtschaft durch das Aufkommen der H₂-Mobilität erwachsen.

Der DVGW treibt den Einsatz von *Power-to-X*-Technologien (PtX-Technologien) im stationären Bereich voran und verfügt über umfassende Kenntnisse zur Herstellung und Nutzung von per Wasserelektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien (EE) produziertem H₂. Zudem betreibt die Gasindustrie ein flächendeckendes Erdgas-Pipelinennetz, dass in vielerlei Hinsicht für den Transport von H₂ geeignet ist und welches bei einer im Zuge der Energiewende zugunsten von erneuerbarem H₂ nachlassenden Erdgasnachfrage auch längerfristig als wertvolles Investitionsgut genutzt werden könnte.

Sollte sich die H₂-Mobilität als vielversprechende Zukunftsoption erweisen, entstünden lukrative Kraftstoffmärkte, für deren Bedienung die Gasindustrie sehr vorteilhafte Voraussetzungen vorweisen kann. Die vorliegende Studie wurde beauftragt, um dem DVGW und die von ihm vertretenen Akteure über Stand, Trends und Zukunftsperspektiven der H₂-basierten Mobilität zu informieren. Überdies sollen die Fachöffentlichkeit und Stakeholder aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft profitieren. Neben den skizzierten übergeordneten Erkenntnisinteressen geht die Studie auch diversen an verschiedene Themenkomplexe gebundenen Detailfragen nach, welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden.¹

¹ Die Studiererstellung wurde von einem Beirat begleitet, der sich aus den Herren Dr. Dietrich Gerstein und Dr. Michael Walter (beide DVGW), sowie Wolfgang Köppel (Engler-Bunte-Institut) und Ronny Erler (DBI-Gruppe) zusammensetzte.

2 Inhalte und Vorgehen

Kapitel 3 liefert einen Überblick zur H₂-Mobilität in der Europäischen Union (EU) und ausgewählten europäischen Ländern. Dadurch wird ersichtlich, welche Dynamik die wasserstoffbasierte Mobilität derzeit in Europa entwickelt und welche Marktpotenziale sich hinsichtlich H₂ als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge abzeichnen. Die EU ist naturgemäß der in Europa wichtigste politische Akteur und sowohl hinsichtlich von Technologieförderung wie auch Gesetzgebung zentral. Neben der EU werden Deutschland, Frankreich, das Vereinigte Königreich, die Niederlande und Norwegen erforscht. Damit werden Länder unterschiedlicher Größe und Anbindung an die EU untersucht, welche sich durch relativ umfassende sowie gut dokumentierte Aktivitäten im Bereich der H₂-Mobilität auszeichnen und somit zur Untersuchung anbieten. Die Länder werden im gesamteuropäischen wie auch internationalen Kontext verortet, um eine ausgewogene Beurteilung der Innovationsdynamik zu gewährleisten. Die Analyse konzentriert sich auf Maßnahmen politischer Unterstützung und Förderprogramme, Technologieprojekte und Industrieakteure, den Ausbau von H₂-Tankstellennetzen und BZ-Fahrzeugflotten, sowie die Positionierung von EU und Ländern im globalen Kontext.

Kapitel 4 vertieft die Analyse des vorangegangenen Kapitels und fokussiert auf regulatorische Rahmenbedingungen der H₂-basierten Mobilität. Gesetzliche Vorgaben gehören zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Zukunftschancen von Antriebskonzepten und ihre Erforschung verrät viel über Marktperspektiven. Der Analyseschwerpunkt liegt auf für die H₂-Mobilität zentralen EU-Regularien und insbesondere auf Richtlinien zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen von Fahrzeugen, sowie der als *Clean Vehicles Directive* (CVD) bekannten Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. Daneben werden auch einschlägige nationale Rahmenbedingungen und politische Initiativen in den zuvor untersuchten Ländern analysiert, treten aber in ihrer Bedeutung deutlich hinter den EU-Regularien zurück. Überdies wird die Umsetzungsebene der Gesetze diskutiert. Die Untersuchung zeigt für den Markthochlauf der H₂-Mobilität vorteilhafte Aspekte auf und liefert zentrale Bausteine für die Entwicklung von Handlungsempfehlungen in Kapitel 9.

Kapitel 5 knüpft an Kapitel 3 an und erarbeitet ein vertiefendes Verständnis H₂-basierter Mobilität. Neben Erkenntnissen zu fahrzeugseitigen Aspekten liefert das Kapitel auch Anhaltspunkte für einen wachsenden Kraftstoff- bzw. H₂-Bedarf. Zunächst werden Technologiekonzepte für BZ-Fahrzeuge aller Klassen vorgestellt und dann der von asiatischen Herstellern getriebene beginnende Markthochlauf von Personenkraftwagen skizziert. Die wachsende Bedeutung von BZ-Bussen und die ersten Kommerzialisierungsinitiativen für BZ-betriebene Lieferfahrzeuge und Lastkraftwagen werden gleichfalls diskutiert. Im Kapitel werden auch Fragen gesellschaftlicher Akzeptanz und der Nachhaltigkeit der H₂-Mobilität, letzteres anhand von Treibhausgas- und Lebenszyklusanalysen adressiert. Mit Schienenfahrzeugen wird abschließend ein weiteres BZ-Einsatzfeld im Mobilitätsbereich portraitiert.

Kapitel 6 leistet eine vertiefende Betrachtung von H₂-Infrastrukturen zur Versorgung der H₂-Mobilität. Eine ausreichende Verfügbarkeit von Betankungsinfrastruktur ist eine wesentliche Voraussetzung für den Markterfolg von Fahrzeugen und die Analyse infrastruktureller Gegebenheiten lässt Rückschlüsse zu entstehenden H₂-Nachfragen zu. H₂-Infrastrukturen umfassen Anlagen zur Herstellung, Verteilung und Abgabe von H₂ für PKW, Busse sowie LKW und werden diskutiert. Produktionsverfahren wie die Wasserelektrolyse, der Transport mit *Trailern*, die Infrastrukturinitiative *H₂ Mobility*, sowie Tankstellen für Busse stehen als Inhalte heraus.

Kapitel 7 widmet sich der Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage anhand der bis dahin erzielten Ergebnisse dieser Studie sowie externer Untersuchungen. Die Fragestellung ist unmittelbar für die Einschätzung der mit dem Aufkommen der H₂-Mobilität verbundenen Marktperspektiven für Hersteller und Transporteure von H₂ relevant. Die im Vorfeld des Kapitels abgeschlossenen Recherchen zeigen Trends zur Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität, lassen aber keine genauen Aussagen zur zukünftigen H₂-Nachfrage zu. Demgegenüber ermöglichen drei wissenschaftliche Analysen eine Quantifizierung der bis 2050 für Deutschland erwarteten H₂-Bedarfe. Ein Strategiepapier erweitert den Blick auf Europa und legt Zahlen zum voraussichtlich zukünftig realisierbaren H₂-Volumen vor.

Kapitel 8 vergleicht den Stand und die Zukunftspotenziale H₂-basierter Mobilität mit denen der Gasmobilität. Während die vorliegende Studie verschiedenste Aspekte der H₂-Mobilität untersucht, stellt sie die Befunde bislang nicht zur Gasmobilität in Bezug. Neben dem Zukunftsthema H₂-basierter Mobilität ist jedoch das angestammte Geschäftsfeld der Gasmobilität von großem Interesse für die Gasindustrie. Daher ist ein Vergleich der Marktperspektiven beider Mobilitätsoptionen hochrelevant. Das Kapitel erweitert die Diskussion der H₂-Mobilität um punktuelle Analysen der Gasmobilität und stellt die Potenziale Beider gegenüber. Dabei werden Fahrzeugverfügbarkeit, Betankungsinfrastruktur, Akzeptanz, Nachhaltigkeit, sowie die Eignung zur Erfüllung regulatorischer Vorgaben analysiert.

Kapitel 9 entwickelt auf Grundlage von Kapitel 4 und der weiteren Diskussion dieser Studie Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H₂-Mobilität. Zunächst werden die schon hinsichtlich ihrer Vorzüge analysierten EU-Regularien mit Fokus auf Defizite und Entwicklungsbedarfe adressiert. Im Ergebnis werden positive Effekte für den Markthochlauf ebenso wie Schwachpunkte angesprochen und in Handlungsvorschläge zur Fortsetzung bzw. Korrektur regulatorischer Trends überführt. Zudem werden Fördernotwendigkeiten hinsichtlich von Marktaktivierung und F&E für BZ-Fahrzeuge und H₂-Infrastrukturen mit stärkerem Augenmerk auf Deutschland untersucht. Schließlich werden restriktive Maßnahmen erörtert, welche komplementäre Beiträge zum Markterfolg der H₂-basierten Mobilität leisten können. Auch die Schlussfolgerungen zu Förderung und Restriktionen münden in Handlungsempfehlungen.

Kapitel 10 fasst die Inhalte und Ergebnisse der Studie zusammen und zieht übergeordnete Schlussfolgerungen. Die H₂-basierte Mobilität entfaltet eine zunehmende Dynamik und wird voraussichtlich attraktive Märkte für die Hersteller und Transporteure von EE-H₂ schaffen.

Methodisch ist anzumerken, dass die Studie substantielle Aussagen zur H₂-Mobilität erbringt, andere Antriebskonzepte aber nur bis zu einem gewissen Grad berücksichtigt. Während ein Vergleich von H₂- und Gasmobilität erfolgt, werden nur punktuelle Bezüge zu Batteriefahrzeugen hergestellt. Damit werden Entwicklungen bei wichtigen Alternativtechnologien von potenzieller Bedeutung für die H₂-Mobilität nur eingeschränkt erfasst. Dies mindert die Aussagekraft der Studie bezüglich zukünftiger Entwicklungen, ist aber angesichts des verfolgten Erkenntnisinteresses einer umfassenden Analyse nur der H₂-Mobilität unvermeidbar.

3 Wasserstoffmobilität in Europa

Dieses Kapitel liefert einen Überblick zur H₂-Mobilität in der Europäischen Union und zeigt auf, welche Kommerzialisierungsdynamik sich entwickelt. Neben der EU werden Deutschland, Frankreich, das Vereinigte Königreich, die Niederlande und Norwegen erforscht. Zudem werden EU und Länder im gesamteuropäischen wie auch internationalen Kontext verortet.

3.1 H₂-Mobilität auf überstaatlicher Ebene der Europäischen Union

Die Europäische Union ist bezüglich des Markthochlaufs H₂-basierter Mobilität in zweierlei Hinsicht relevant: Einerseits unterstützt sie Forschung und Entwicklung (F&E) sowie Marktaktivierung durch umfangreiche Förderprogramme; andererseits werden auf EU-Ebene in den Mitgliedsstaaten umzusetzende Regularien erlassen, welche einen erheblichen Einfluss auf Entwicklung und Kommerzialisierung von H₂- und BZ-Technologien ausüben. In diesem Abschnitt werden lediglich die Förderaktivitäten vorgestellt, Regularien werden im Kapitel 4 behandelt.

In der EU werden technologische Entwicklung und Marktvorbereitung von H₂- und BZ-Technologien durch öffentliche Förderprogramme seit langem unterstützt. So wurden z.B. schon zu Beginn des neuen Jahrtausends von *Daimler* entwickelte BZ-Busse in einem groß angelegten Demonstrationsprojekt in 9 Städten u.a. in Deutschland, dem Vereinigten Königreich und den Niederlanden erprobt. In den Folgejahren wurde die Förderung erheblich ausgeweitet: Im Rahmen des zentralen *7th Framework Programme of the European Community* wurden zwischen 2007 und 2013 zunächst 940 Millionen Euro aufgebracht, die je zur Hälfte durch die EU und durch die Zuwendungsempfänger aus Industrie und Wissenschaft beigesteuert wurden. Die inhaltliche Ausgestaltung und Bereitstellung von Fördermitteln erfolgte durch das *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)*, einer von der Europäischen Kommission sowie Industrie und Wissenschaft getragenen Public-Private-Partnership [1].

Die Gelder wurden für Demonstrations- und F&E-Projekte zur Weiterentwicklung von H₂- und BZ-Technologien verwendet. Trotz erheblicher erzielter Fortschritte wurde eine Fortsetzung des Förderprogramms für die Erreichung marktlicher Wettbewerbsfähigkeit als erforderlich befunden. Daher wurden mit der Verabschiedung des *Horizon 2020 Framework Programme for Research and Innovation* weitere Mittel zur Verfügung gestellt: für die Jahre 2014 bis 2020 ist ein gemeinschaftlich durch EU und Fördermittelpfänger zu finanzierendes Budget von mindestens 1,3 Milliarden Euro vorgesehen, wobei sich die EU zur Übernahme von 665 Millionen Euro verpflichtet hat [2]. Bis zum Jahr 2017 wurden insgesamt 227 Projekte gefördert [3]. Mit diesen Fördervolumina bewegt sich die EU insgesamt in einem ähnlichen Bereich wie Deutschland, wobei die in Deutschland aus nationalen Budgets zur Verfügbar gestellten Fördermittel noch durch EU-Subventionen ergänzt werden.

Das EU-Förderprogramm ist auf die zwei *Säulen* bzw. Bereiche *Transport* und *Energiesysteme* aufgeteilt, die eine ähnliche Gewichtung erfahren. Im Transportbereich werden Demonstrations- und F&E-Projekte für BZ-betriebene PKW, Busse und LKW gefördert; aber auch Flurförderzeuge, Schienenfahrzeuge sowie weitere Anwendungen entwickelt und erprobt. Die technologische Verbesserung und der Aufbau von H₂-Infrastruktur v.a. für die Betankung von PKW und Nutzfahrzeugen sind weitere zentrale Fördergegenstände. Im Bereich Energiesysteme werden u.a. PtX-Systeme mit Wasserelektrolyseuren aufgebaut und betrieben. Nahezu die Hälfte des Gesamtbudgets gilt dem Transportbereich [4].

Das Förderprogramm zielt primär auf Kostenreduzierungen bei Fahrzeugen und Betankungsinfrastruktur. Obgleich weiterhin technischer Optimierungsbedarf gesehen wird, gilt der Ausbau von Flotten und Tankstellennetz als ein zentrales Ziel. Herausragende Beispiele für Förderprojekte sind *Hydrogen Mobility Europe 2* (H2ME 2) mit einem Budget von 102 Millionen Euro und *Clean Hydrogen in European Cities* (CHIC) mit einem Volumen von 82 Millionen Euro. In H2ME 2 wird derzeit der Betrieb von 1.100 BZ-PKW und der Aufbau von 20 neuen H₂-Tankstellen in acht Ländern realisiert [3]. In CHIC wurden 54 BZ-Busse und 9 groß dimensionierte Tankstellen in 9 europäischen Städten im Alltagsbetrieb erprobt [5]. PKW, Busse und Infrastruktur wurden und werden auch in verschiedenen anderen, teilweise groß angelegten, Projekten entwickelt und erprobt. Da die Akteure sowohl EU- wie auch nationalstaatlich finanzierter Förderprogramme Wert auf ein koordiniertes Vorgehen legen, ergänzen sich v.a. beim Aufbau von Infrastruktur oftmals europäische und nationale Projekte.

Als Programmorganisation ist das FCH JU auch für die Umsetzung des Förderprogramms zuständig. Die vordringlichste Aufgabe des FCH JU ist die Organisation der jährlichen Förderaufrufe bzw. *Calls*, auf die sich an der Durchführung von Projekten Interessierte bewerben können. Als Beispiel sei der Call vom Januar 2019 genannt, welcher ein Budget von 80,8 Millionen Euro beinhaltete, von denen 27,3 Millionen Euro auf den Transportbereich und 28,5 Millionen Euro auf Energiesysteme entfielen [4]. Der EU-Förderanteil an den Projektbudgets variiert insbesondere entsprechend der jeweiligen Innovationsgehalte und liegt z.B. bei CHIC bei 26 von 82 Millionen Euro und bei H2ME 2 bei 35 von 102 Millionen Euro [3].

Der Stand der H₂-Mobilität in der Europäischen Union wird zusammenfassend in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Dabei werden die politischen Zielgrößen der EU für die Anzahl von BZ-Fahrzeugen (PKW, Busse, LKW) und Tankstellen (700 bzw. 350 bar Druckwasserstoff mit H₂-Herstellung vor-Ort bzw. H₂-Anlieferung von entferntem Produktionsort) dem Stand vom April 2019 gegenübergestellt, sowie zentrale Akteure und Fördermaßnahmen skizziert. Die Angaben zum Stand beinhalten die Fahrzeuge und Tankstellen der gesamten EU einschließlich der national geförderten Einheiten, die in Klammern gesetzten Werte beziehen sich ausschließlich auf EU-geförderte Einheiten. Einige Aussagen werden im späteren Studienverlauf wieder aufgegriffen und vertiefend behandelt.

Tabelle 3-I: BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen in der EU [2].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	keine strategischen Zielgrößen, jedoch starke politische Unterstützung und ambitionierte Ziele in Einzelprojekten	1.520 (650) PKW in Betrieb (zusätzliche 1.390 geplant) ²⁾	an Demonstrationsprojekten Beteiligte	Zuschuss der EU je Fahrzeug
BZ-Busse		71 (50) Busse in Betrieb (weitere 305 geplant)		
BZ-LKW ¹⁾		(15 Müllfahrzeuge, weitere 12 geplant)		
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	keine strategischen Zielgrößen, jedoch starke politische Unterstützung und ambitionierte Ziele in Einzelprojekten	insgesamt 173 (47) Tankstellen für PKW, Busse, etc. in Betrieb (zusätzliche 50 geplant), Abdeckung aller vier sowie weiterer Tankstellenarten	an Demonstrationsprojekten Beteiligte	Zuschuss der EU je Tankstelle
700 bar angeliefert				
350 bar vor-Ort				
350 bar angeliefert				
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Einschließlich Schweiz und Norwegen			

Die dargestellten umfassenden Aktivitäten und die große Zahl bereits in Betrieb befindlicher oder geplanter Fahrzeuge und Tankstellen verdeutlichen, dass die Förderangebote gut angenommen werden und ansehnliche Resultate zeitigen. Überdies wird die H₂-Mobilität nicht nur in der geschilderten zentralen Förderinitiative, sondern auch mit anderen und in späteren Studienteilen aufgegriffenen EU-Fördermaßnahmen vorangetrieben. Damit entwickelt sich die EU zu einem international wichtigen Technologieakteur. Wie unter 3.7 und 5.2 diskutiert, sieht sie sich allerdings mit starken Wettbewerbern insbesondere aus Asien konfrontiert, die bei der Kommerzialisierung von H₂- und BZ-Technologien ambitioniert voranschreiten und schon heute europäische Akteure überrunden.

3.2 Deutschland prinzipiell gut für H₂ im Verkehr positioniert

Vor etwa zwei Jahrzehnten machten Daimler und andere Unternehmen ihr Engagement für die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen publik und mobilisierten eine substantielle Unterstützung durch die Politik. Schon bald wurden diverse F&E- und Demonstrationsprojekte begonnen. In dem 2006 verabschiedeten *Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* (NIP) stellte die Bundesregierung 700 Millionen Euro für Demonstrations- und F&E-Projekte bereit, die von der Industrie und anderen projektdurchführenden Parteien um weitere 700 Millionen Euro ergänzt wurden. Mit dem umfassenden Fördervolumen setzte das ursprüngliche NIP in der EU und weltweit Standards. Das Programm lief bis 2016 und trug wesentlich zur Technologieentwicklung und Kostensenkung bei.

Angesichts eines weiter bestehenden Förderbedarfs wurde das Programm als *NIP2* bis 2026 verlängert und mit zusätzlichen Fördermitteln versehen [6]. Für den Zeitraum bis 2019 wurden regierungsseitig bereits 250 Millionen Euro zugesagt, die wiederum durch private Mittel zu ergänzen sind [7]. Insgesamt wird auch für NIP2 ein Gesamtbudget von 1,4 Milliarden Euro avisiert. Im Gegensatz zum Vorläuferprogramm kommt das Geld nicht nur F&E- und Demonstrationsprojekten, sondern auch Maßnahmen der Marktaktivierung zugute. Dies ist dem erreichten hohen Reifegrad der Technologien geschuldet, der technische Herausforderungen zugunsten einer Unterstützung des breiten Markteintritts in den Hintergrund treten lässt. Während das federführend vom *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (BMVI) verantwortete Nationale Innovationsprogramm die zentrale Förderinitiative des Bundes ist, unterstützen auch andere und unter 4.2 angesprochene Ministerien H₂- und BZ-Technologien. Überdies werden H₂ und BZ auf Ebene der Bundesländer gefördert.

Schon im ursprünglichen NIP nahm der Verkehrsbereich eine dominante Stellung ein und absorbierte einen Großteil des Budgets. In zahlreichen Projekten wurden insbesondere BZ-betriebene PKW, Busse, Flurförderzeuge sowie Schienenfahrzeuge entwickelt und erprobt. Auch der Aufbau von Betankungsinfrastruktur und die Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff wurde gefördert [8]. Ein Großteil der Aktivitäten im Verkehrsbereich wurde in dem Leuchtturmprojekt *Clean Energy Partnership* (CEP) gebündelt. Zu Spitzenzeiten engagierten sich 20 Unternehmen in Demonstrationsprojekten und waren über 100 BZ-PKW von *Audi*, *BMW*, *Daimler*, *Honda*, *Hyundai*, *Toyota*, *Volkswagen* und weiteren Herstellern im Einsatz. Dazu wurden einige BZ-Busse hauptsächlich von *EvoBus* und *Solaris* erfolgreich erprobt. Ende 2016 waren 30 H₂-Tankstellen für PKW und mehrere Tankstellen für Busse in Betrieb. An 5 Tankstellen wurde per Wasserelektrolyse unter Nutzung erneuerbarer Energien hergestellter Wasserstoff abgegeben [9]. Überdies sind heute in Deutschland rund 50, aus unterschiedlichsten Budgets geförderte, PtX-Anlagen in Betrieb oder Planung und bauen das Potenzial regenerativer H₂-Bereitstellung für den Verkehr weiter aus [10].

Auch im NIP2 kommt dem Verkehrsbereich eine zentrale Rolle zu. Wie unter 4.2, 5.2, 5.3, 5.4, 5.7 und 6.3 aufgezeigt, wird die Kommerzialisierung u.a. von PKW, Bussen und Schienenfahrzeuge primär von der Wirtschaft mit öffentlicher Unterstützung vorangetrieben. So vertreibt der Automobilbauer Daimler seit 2018 seinen BZ-PKW *Mercedes-Benz GLC F-CELL* als Vorserienmodell und bietet seinen schon länger am Markt aktiven asiatischen Wettbewerbern Paroli. Im Bereich der Infrastruktur sticht die Industrieinitiative *H₂ Mobility* heraus und setzt mit dem geplanten Aufbau von 100 H₂-Tankstellen für PKW bis 2020 und 400 Anlagen bis 2023 auch international Standards. Im Gegensatz zu H₂-Mobility-Initiativen in anderen EU-Ländern entwickelte die deutsche Initiative nicht nur Planungen, sondern setzt diese auch in einem Joint Venture verschiedener Firmen um. Im Rahmen des NIP angebotene Zuschüsse für BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen, einschließlich der elektrolytischen H₂-Produktion, reduzieren die Mehrkosten gegenüber konventionellen Technologien erheblich.

Die Koordination und inhaltliche Umsetzung des Förderprogramms erfolgt durch die *Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* (NOW GmbH). Sie fungiert als Anlaufstelle für Interessenten im Förderbereich F&E und Demonstration und ist jederzeit für Projektvorschläge im Einklang mit dem Themenspektrum des NIP2 offen. So werden z.B. BZ-betriebenen LKW und Schienenfahrzeuge sowie der Aufbau von H₂-Tankstellen für Nutzfahrzeuge gefördert. NOW koordiniert auch befristete Förderaufrufe im Bereich der Marktaktivierung, welche u.a. die Anschaffung von BZ-Fahrzeugen für den Flottenbetrieb und den Aufbau von H₂-Infrastruktur unterstützen. So wurde in verschiedenen Aufrufen u.a. der Kauf von BZ-PKW und BZ-Bussen, sowie der Aufbau von H₂-PKW-Tankstellen einschließlich von Wasserelektrolyseuren bezuschusst [11]. Die zugrundeliegende Förderrichtlinie sieht eine Übernahme von bis zu 40 Prozent der Investitionsmehrkosten gegenüber vergleichbarer konventioneller Technologie vor. Beispielsweise wurden 2017 die Beschaffungskosten des BZ-PKW *Hyundai ix35 Fuel Cell* von 65.000 Euro auf 48.000 Euro und die des *Toyota Mirai* von 79.000 Euro auf 57.000 Euro reduziert (Kosten gerundet) [12]. Für die Zukunft sind weitere Förderaufrufe sowie eine Verbesserung der Förderoptionen geplant.

Die umfassende öffentliche Förderung und das Engagement v.a. der Unternehmen entfalten ihre Wirkung im Entstehen einer respektablen und in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigten Technologielandschaft. Die politischen Zielgrößen der Bundesregierung zur Anzahl von BZ-Fahrzeugen und Tankstellen werden mit dem Stand im April 2019 verglichen und wesentliche Akteure und Fördermaßnahmen genannt. Einige Aussagen werden in späteren Studienabschnitten weiter ausgeführt.

Tabelle 3-II: BZ-Fahrzeuge und H2-Tankstellen in Deutschland [13].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	keine strategischen Zielgrößen, jedoch starke politische Unterstützung und ambitionierte Ziele in Einzelprojekten	505 in Betrieb	Einzelakteure, Flottenbetreiber ²⁾	NIP-Kaufzuschuss Flottenfahrzeuge
BZ-Busse		21 in Betrieb	Einkaufsgemeinschaften, Städte	Kaufzuschuss NIP (auch EU-Mittel)
BZ-LKW ¹⁾		2 in Betrieb	Einzelakteure ²⁾	F&E-Förderung NIP
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 04-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	keine Zielgrößen	nicht bekannt	H ₂ Mobility	NIP-Zuschuss für Bau / Elektrolyseur
700 bar angeliefert	100 bis 2019 ²⁾ 400 bis 2023 ²⁾	64 in Betrieb, weitere 27 geplant		NIP-Zuschuss für Bau (EU-Mittel)
350 bar vor-Ort	keine Zielgrößen	nicht bekannt	Einzelakteure, Anlagenbetreiber ²⁾	NIP-Zuschuss für Bau (EU-Mittel) ²⁾
350 bar angeliefert				
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Angaben basieren auf Diskussion unter 6.3, Zielgrößen für Tankstellen Stand 2018			

Hinsichtlich des Förderangebots nimmt Deutschland in der EU eine herausragende Position ein. Als Ergebnis der umfangreichen Innovationstätigkeit ist Deutschland auch im internationalen Vergleich hinsichtlich von Technologieentwicklung und Kommerzialisierung prinzipiell gut aufgestellt. Beim Aufbau des Tankstellennetzwerkes nimmt Deutschland sogar bislang eine internationale Führungsposition ein. Wie unter 3.7 und 5.2 diskutiert, erwächst Deutschland jedoch starke Konkurrenz aus Asien, was die eigentlich gute Ausgangslage relativiert. Von den weltweit mindestens 15.000 BZ-PKW sind nur etwa 500 in Deutschland zugelassen.

3.3 Neue Dynamik der H₂-basierten Mobilität in Frankreich

Frankreich zählt schon seit einigen Jahren zu den EU-Ländern, die sich vergleichsweise stark für Wasserstoff und Brennstoffzellen engagieren. Eine Reihe von Projekten auch im Bereich der H₂-Mobilität wurden mit staatlicher Unterstützung durchgeführt. Spätestens 2016 gewann das Thema jedoch stark an Bedeutung und gelangte, informiert durch eine Studie der auch als *H₂ Mobility France* bekannten Stakeholder-Initiative *Mobilité Hydrogène France*, prominent auf die Regierungsagenda.

Die Studie erachtete ein Marktpotenzial von 800.000 Fahrzeugen und 600 Tankstellen für das Jahr 2030 als realisierbar und stellte konkrete Markteintrittspfade vor, wobei zunächst Cluster ortsgebundener Flotten aufgrund der geringeren Infrastrukturanforderungen eine zentrale Rolle spielen. Die Mitglieder der Initiative trieben einerseits H₂-basierte Mobilität durch eigene Projekte voran und appellierten andererseits an die Regierung, die Kommerzialisierung der H₂-Mobilität durch Formulierung politischer Strategien und die Ausweitung öffentlicher Förderung zu unterstützen [14].

Ein überraschend starker diesbezüglicher Impuls wurde im Juni 2018 gesetzt, als der französische Umweltminister einen Strategieplan vorstellte, der den Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Wirtschaftsbereichen vorsieht und Frankreich zu einer international führenden Position im Bereich der H₂- und BZ-Technologien verhelfen soll [15]. Der Plan zielt auf die weitere Dekarbonisierung der französischen Energieversorgung und die Hebung beträchtlicher, in einer Studie ermittelter, Arbeitsplatz- und Umsatzpotenziale. Bis zum Jahr 2023 sollen 5.000 mit BZ-PKW-Technologie ausgestattete leichte Nutzfahrzeuge und 200 Fahrzeuge aus dem Schwerlastbereich (LKW, Busse, Schiffe, Züge) auf Frankreichs Verkehrswegen unterwegs sein, bis 2028 sollen es 20.000 bis 50.000 leichte und 800 bis 2.000 schwere Fahrzeuge sein.

Die Infrastruktur für alle Fahrzeugtypen soll bis 2023 auf 100 Tankstellen und bis 2028 auf 400 bis 1.000 Stationen ausgebaut werden. Auch zum Ausbau eines H₂-basierten Zug- und Schiffsverkehrs, sowie zum stationären Bereich werden Planungen vorgelegt: So sollen bis 2023 10 Prozent des industriell verwendeten H₂ aus erneuerbaren Quellen stammen, bis 2028 sollen es 20 bis 40 Prozent sein. Ab 2020 soll es dafür ein System der Rückverfolgbarkeit für H₂ geben. Darüber hinaus sollen die technischen Voraussetzungen für die Einspeisung von H₂ ins Gasnetz geregelt werden. Der oben angesprochene Clusteransatz wird beibehalten.

Insbesondere wurde auch eine Initialfinanzierung in Höhe von 100 Millionen Euro öffentlicher Förderung für die Umsetzung des Strategieplans bereitgestellt [16]. In verschiedenen seitdem erfolgten Förderaufrufen wurden entsprechende Mittel für Projekte auch im Bereich der H₂-Mobilität bereits eingesetzt [17]. Zur Veranschaulichung von Fördermaßnahmen und entstehenden Technologielandschaft werden nachfolgend drei zentrale Projekte dargestellt.

Das *Zero Emission Valley* in der Region *Auvergne-Rhône-Alpes* sticht als Flaggschiffprojekt auch in Gesamteuropa heraus: Zwischen 2017 und 2023 sollen 1.000 BZ-Fahrzeuge, 20 H₂-Tankstellen und 15 Wasserelektrolyseure in Betrieb genommen werden [18]. Das von der Region *Auvergne-Rhône-Alpes* und der EU bezuschusste Projektbudget beträgt 70 Millionen Euro und die Umsetzung hat begonnen [19].

In Paris betreibt das Startup *Société du Taxi Electrique Parisien* seit 2015 eine *Hype* genannte Flotte von BZ-Taxis in Zusammenarbeit mit dem Gase-Unternehmen *Air Liquide*, dass die H₂-Betankungsinfrastruktur zur Verfügung stellt, sowie weiteren Firmen. Mitte 2018 erreichte die Flotte einen Umfang von 100 Fahrzeugen und soll bis Ende 2020 weiter auf 600 wachsen [17]. Zum Einsatz kommen Fahrzeuge von Toyota und Hyundai. Das Projekt wird mit 31 Millionen Euro aus verschiedenen EU-Budgets gefördert [20].

In der Stadt *Pau* kommt ab Ende 2019 erstmals in Frankreich eine Flotte von BZ-Bussen zum Einsatz [18]. Dabei handelt es sich um acht eigens für die lokalen Anforderungen entwickelte 18-Meter BZ-Busse des Herstellers *Van Hool*. Der Wasserstoff für die Busbetankung wird vor Ort per Wasserelektrolyse ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt. Das Projektvolumen beträgt 13,5 Millionen Euro, von denen 7 Millionen Euro von der öffentlichen Hand und insbesondere dem FCH JU der EU beigesteuert werden [21].

Abschließend werden der Stand und die Zukunftsperspektiven der H₂-Mobilität in Frankreich tabellarisch zusammengefasst. Dabei werden die politischen Ziele zur Anzahl von BZ-Fahrzeugen und Tankstellen mit dem Stand von Ende 2018 abgeglichen und wichtige Akteure und Fördermaßnahmen vorgestellt. Offenkundig geht die Gesamtheit der Maßnahmen über die oben beschriebenen zentralen Aktivitäten hinaus.

Tabelle 3-III: BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen in Frankreich [17].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 10-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	5.000 bis 2023, bis 50.000 bis 2028	324 in Betrieb	Akteure in nationalen Clustern	Nationale Kaufzuschüsse (EU-Mittel)
BZ-Busse	insgesamt 200 bis 2023, bis zu 2.000 bis 2028	0 in Betrieb	an EU-Projekten Beteiligte	Kaufzuschüsse (u.a. EU-Mittel)
BZ-LKW ¹⁾		1 in Betrieb	Firmenkooperation	nicht bekannt
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 11-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	insgesamt 100 bis 2023, bis zu 1.000 bis 2028	0	in nationalen Clustern engagierte Akteure	Nationale (und EU) Zuschüsse
700 bar angeliefert		3 ²⁾		
350 bar vor-Ort		4 ²⁾		
350 bar angeliefert		14 ²⁾		
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Zwei Anlagen kombinieren 700- und 350-bar-Betankung			

3.4 Kontinuierlicher Ausbau der H₂-Mobilität im Vereinigten Königreich

Das Vereinigte Königreich setzt sich seit langem für Wasserstoff und Brennstoffzellen auch im Mobilitätsbereich ein. So beteiligte sich London bereits an den europaweit ersten groß angelegten Demonstrationsprojekten für BZ-Busse kurz nach der Jahrtausendwende und hält seitdem mit zahlreichen anderen Akteuren an der Entwicklung und Kommerzialisierung entsprechender Technologien fest. Die britische Regierung unterstützt die Innovationstätigkeit mit regelmäßigen und unten beispielhaft dargestellten Fördermaßnahmen.

Wesentliche Schritte zur Entwicklung einer nationalen Strategie werden seit 2011 von der Infrastrukturinitiative *UK H₂ Mobility* vollzogen: Der Zusammenschluss im Bereich der H₂-Mobilität tätiger Unternehmen und Vertreter öffentlicher Stellen erarbeitete zunächst einen ambitionierten Handlungsplan zum Aufbau einer auf regionalen Clustern basierenden Betankungsinfrastruktur bei gleichzeitigem Ausbau des BZ-Fahrzeugbestands. In einer seit 2015 laufenden Phase der Technologieertüchtigung werden erstmals Tankstellen und Fahrzeuge in größerer Anzahl in Projekten in Betrieb genommen und so die Grundvoraussetzungen für einen etwa ab 2020 vorgesehenen breiteren Markteintritt geschaffen [22]. Die von UK H₂ Mobility kommunizierten Zielvorstellungen von 330 Tankstellen bis zum Jahr 2025 und 1.150 Einheiten bis 2030 werden in einer aktuellen EU-Studie als offizielle Ziele benannt [23].

Ein weiterer Schritt der Strategieformulierung wurde Ende 2016 in Form einer Roadmap für H₂ und BZ im Vereinigten Königreich kommuniziert [24]. Die Roadmap wurde im Auftrag der Regierung erarbeitet und zielt auf die Erschließung ökologischer und ökonomischer Vorteile durch die genannten Technologien. Sie ist vergleichsweise zurückhalten formuliert und nennt nur wenige ambitionierte quantitative Ziele, weist aber dennoch erhebliche Potenziale aus. Neben dem Verkehrssektor werden auch PtX-Technologien schwerpunktmäßig behandelt. Für den Verkehrssektor empfiehlt die Roadmap ein verstärktes Engagement der heimischen Industrie bei der Herstellung von Fahrzeugen mit typischerweise kleineren Produktionsvolumina, insbesondere schwere BZ-Nutzfahrzeuge und Fahrzeuge mit BZ-Range-Extender, die gut zu den Kapazitäten britischer Firmen passen. Infrastrukturseitig wird ein Fokus auf regionale Tankstellen-Cluster zur Versorgung insbesondere von Flottenfahrzeugen gelegt, um die Wirtschaftlichkeit durch bessere Auslastung zu verbessern und Investitionsrisiken zu mindern. Der Politik wird eine verstärkte Technologieförderung nahegelegt, die Maßnahmen wie Investitions- bzw. Kaufzuschüsse für Tankstellen und Fahrzeuge beinhaltet und sich wiederum auf lokale geclusterte Innovationsaktivitäten bezieht.

Die britische Regierung entspricht dem Ersuchen um Technologieunterstützung durch eine Reihe von Förderaufrufen auch im Bereich der H₂-basierten Mobilität. Zentral sind derzeit Fördermittel des *Office for Low Emission Vehicles* für Fahrzeuge und Infrastruktur im Rahmen des Programms *Hydrogen for Transport* mit einem Volumen von 23 Millionen £ [25]. Im ersten Teil des Programms wurde 2017 der Aufbau bzw. die Umrüstung von 9 H₂-Tankstellen, sowie die Anschaffung der damit versorgten ortsgebundenen Flottenfahrzeuge, mit knapp 9 Millionen £ bezuschusst [26]. Im Februar 2019 wurde die Entscheidung zur Nutzung zusätzlicher 14 Millionen £ im zweiten Programmteil verlautet: In 5 Projekten wird der Aufbau weiterer 5 Tankstellen und die Beschaffung von 73 flottengebundenen BZ-PKW und 33 BZ-Bussen gefördert. Neben dem genannten Programm bestehen weitere nationale Förderangebote.

Auch die Technologieförderung der EU wird umfassend und insbesondere für Busse in Anspruch genommen: Beispielsweise kamen 8 der insgesamt 54 im Rahmen des bereits erwähnten EU-Projekts CHIC bis Ende 2016 erprobten BZ-Busse des britischer Herstellers *Wrightbus* in London zum Einsatz [5]. Im Jahr 2017 nahm die britische Hauptstadt im Zuge des EU-Projekts *3Emotion* drei weitere Busse in Betrieb. Im Rahmen des EU-Vorhabens *Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe* (JIVE) wurde die Beschaffung zusätzlicher 26 Busse für London, einschließlich von Doppeldeckerfahrzeugen beschlossen. In Aberdeen sind 10 Busse im Einsatz; der Kauf weiterer 10 Fahrzeuge wurde im Zuge verschiedener EU-Projekte avisiert. Die Beschaffung von Busflotten für vier weitere britische Städte wurde beschlossen [27]. Auch zahlreiche Fahrzeuge und Tankstellen des EU-Vorhabens *Hydrogen Mobility Europe 2* wurden dem Vereinigten Königreich zugewiesen [3]. Aufgrund des laufenden *Brexit*s kann derzeit jedoch keine Aussage zur Zukunft der Vorhaben getätigt werden.

Die nachfolgende Tabelle fasst den Stand der H₂-Mobilität im Vereinigten Königreich Stand Dezember 2018 zusammen.

Tabelle 3-IV: BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen im Vereinigten Königreich [25].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 12-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	keine offiziellen landweiten Zielgrößen, jedoch politische Unterstützung und regionale Ziele	100 in Betrieb, zusätzliche 73 geplant	an Förderprojekten Beteiligte	Nationales Förderprogramm
BZ-Busse		20 in Betrieb, weitere 53 geplant		Nationale (und EU) Förderprogramme
BZ-LKW ¹⁾		0 in Betrieb	keine Aktivitäten	keine Förderung
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 12-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	keine offiziellen landweiten Zielgrößen, jedoch politische Unterstützung und regionale Ziele	insgesamt 13 Tankstellen mit 700- und 350-bar-Technologie in Betrieb, zusätzliche 5 geplant	Bau und Betrieb durch nicht-staatliche Akteure wie Firmen, Kommunen, etc.	Nationale (und EU) Förderprogramme
700 bar angeliefert				keine nationale (aber EU-) Förderung
350 bar vor-Ort				
350 bar angeliefert				
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Zwei Anlagen kombinieren 700- und 350-bar-Betankung			

3.5 Wiedererstarkung der H₂-basierten Mobilität in den Niederlanden

Auch die Niederlande gehören zu den europäischen Nationen, die schon vor etwa 20 Jahren in die Förderung von Wasserstoff und Brennstoffzellen einstiegen. So nahmen die Niederlande an EU-Busprojekten teil und verfügten über ein nationales Förderprogramm für H₂ und BZ, während heimische Firmen erste BZ-LKW entwickelten. Obwohl zahlreiche lokale and regionale Initiativen die Technologie weiter unterstützen, verlor nach Abklingen des letztendlich von

Daimler angestoßenen internationalen Hypes um BZ-Fahrzeuge das Thema politisch an Gewicht. Dies änderte sich jedoch in den letzten Jahren wieder deutlich, wie die Beauftragung einer H₂-Roadmap durch die Regierung zeigt.

Die im März 2018 veröffentlichte Roadmap ermittelt den möglichen Beitrag von Wasserstoff zur Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung bis 2050, zeigt relevante Akteure und Aktivitäten auf und spricht Handlungsempfehlungen für zur Erschließung des Potenzials erforderliche Schritte aus [28]. Die Roadmap weist Wasserstoff eine Schlüsselrolle bei der Realisierung einer klimaneutralen Energieversorgung zu und betont die Bedeutung einer durch H₂ beförderten Sektorenkopplung. Dabei konzentriert sie sich auf Verkehr und Industrie, da beide Sektoren besonders hohe Minderungen von CO₂-Emissionen erzielen müssen. Zudem gilt der Mobilitätsbereich als attraktiver Markt für nachhaltigen H₂ und sind die Niederlande nach Deutschland der europaweit größte H₂-Hersteller [29]. Für den Verkehrsbereich wird ein Clusteransatz empfohlen, um die beste Auslastung der teuren H₂-Tankstellen durch gleichzeitige Bedienung verschiedenartiger Anwendungen - von PKW über Busse und andere Nutzfahrzeuge idealerweise in Flotten – zu gewährleisten. Der Politik und Wirtschaft werden ein verstärktes Technologieengagement und konkrete Maßnahmen z.B. hinsichtlich des Ausbaus der Tankstelleninfrastruktur und des breiteren Einsatzes von Bussen empfohlen.

In dem Ende 2018 veröffentlichten Entwurf des *Dutch Climate Agreement*, einem zentralen Bestandteil der niederländischen Klimapolitik, werden wesentliche Inhalte der Roadmap übernommen. Der Entwurf enthält ein eigenes Kapitel zu Wasserstoff und betrachtet Letzteren als wichtiges Element einer CO₂-freien und sektorenübergreifenden Energieversorgung und Rohstoffbereitstellung für die Industrie. Die Ausarbeitung einer Umsetzungsstrategie ebenso wie die zukünftige Bereitstellung von zusätzlichen 30 bis 40 Millionen Euro öffentlicher Förderung pro Jahr wird beschlossen. Das Geld soll insbesondere dem Aufbau von Elektrolysekapazitäten von bis zu 4 Gigawatt bis 2030 zugutekommen [30].

Während die Roadmap noch einen Mangel an öffentlicher Förderung monierte, war schon Ende 2017 ein Anstieg entsprechender Mittel zu beobachten: 17 Millionen Euro wurden für den Bau von H₂-Tankstellen bereitgestellt und sollten den Bau von 12 neuen Anlagen bis 2020 finanzieren [31]. Überdies wurden nach kleineren Förderbeträgen im Vorjahr im März 2018 an die 4 Millionen Euro für H₂- und BZ-Projekte zur Verfügung gestellt [32]. Überdies profitieren Käufer von BZ-Fahrzeugen von attraktiven und unter 4.5 diskutierten Anreizen.

Niederländische Firmen wie der Bushersteller *VDL* und der LKW-Bauer *DAF* entwickeln zusammen mit Partnern schwere LKW und Müllfahrzeuge unter Inanspruchnahme verschiedener EU-Budgets [28], [33]. Über heute schon in Betrieb befindliche Fahrzeuge hinaus ist außerdem der Einsatz weiterer 50 BZ-Busse im Rahmen des EU-Projekts *JIVE* geplant [32].

Insgesamt erfährt die Entwicklung der H₂-Mobilität in den Niederlanden also derzeit eine neue und starke Dynamik. Die nachfolgende Tabelle gibt dies anhand des Stands vom Dezember 2018 und der ambitionierten Zukunftsplanungen wieder.

Tabelle 3-V: BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen in den Niederlanden [30].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 12-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	2.000 bis 2020, (15.000 bis 2025)	58 in Betrieb	Dutch Hydrogen Platform	Nationale Steuer- vergünstigungen
BZ-Busse	100 bis 2020	8 in Betrieb, zusätz- liche Busse geplant	Regionen, Betei- ligte EU-Projekte	Steuervergünsti- gung (EU-Mittel)
BZ-LKW ¹⁾	500 bis 2020, (3.000 bis 2025)	8 in Betrieb	Fahrzeugaufbauer, Lo- gistikakteure	nicht bekannt
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 12-2018	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	insgesamt 20 bis 2020, (50 bis 2025)	1	verschiedene natio- nale politische Initi- ativen zu nachhalti- gen Kraftstoffen, H ₂ und Klimaschutz	bis zu 100 % Kostenübernahme für Bau, jedoch keine Förderung der Betriebskosten
700 bar angeliefert		1		
350 bar vor-Ort		2		
350 bar angeliefert		2		
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender ²⁾ Zwei Anlagen kombinieren 700- und 350-bar-Betankung			

3.6 Unstetige Entwicklungen der H₂-Mobilität in Norwegen

Auch Norwegen blickt auf ein langjähriges Engagement für Wasserstoff und Brennstoffzellen zurück: Das hohe Aufkommen preisgünstig verfügbarer erneuerbarer Energien motiviert das Land, strombasierte Kraftstoffe im Mobilitätsbereich einzusetzen. Hinsichtlich des Anteils von Batteriefahrzeugen an der gesamten Fahrzeugflotte hat Norwegen eine internationale Spitzenposition erreicht und treibt auch die Kommerzialisierung von BZ-Fahrzeugen voran [34].

Zu den wichtigsten politischen Initiativen zur Förderung von H₂- und BZ-Technologien gehörte die Formulierung einer nationalen Wasserstoffstrategie im Jahr 2005 und der Beginn des groß angelegten Mobilitätsprojekts *HyNor* im Jahr 2009. Allerdings konzentrierte sich das Interesse wichtiger Akteure bald auf Batteriefahrzeuge und führte zu einer zeitweise nachlassenden Unterstützung der H₂-Mobilität. 2016 wurde jedoch ein *White Paper on Energy Policy* veröffentlicht und postulierte eine wichtige Rolle für BZ-Antriebe gerade für schwere Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen. Der *National Transport Plan (2018-2029)* betont dann die Notwendigkeit staatlicher Technologieförderung insbesondere für den Infrastrukturaufbau und sieht konkrete Fördermaßnahmen vor [35]. Eine Neufassung der nationalen Wasserstoffstrategie wird erarbeitet [36]. Damit wendet sich Norwegen heute wieder klar der H₂-Mobilität zu.

Im Zuge des o.g. *HyNor*-Projekts wurden zunächst vier Tankstellen entlang einer *Hydrogen Highway* errichtet und zusammen mit BZ-Fahrzeugen in Betrieb genommen. Nach einem längeren erfolgreichen Projektverlauf wurden die Tankstellen in der zweiten Jahreshälfte 2018 geschlossen [35]. Demgegenüber gewährleisteten eine Reihe anderer Projekte die fortgesetzte Dynamik der H₂-Mobilität: So haben der Tankstellenbetreiber *Uno-X* und der Elektrolyseurhersteller *NEL Hydrogen* in einer gemeinsamen Erklärung die Absicht bekanntgegeben, die in Norwegen derzeit bestehenden 5 H₂-Tankstellen bis 2020 um 20 Einheiten zu ergänzen, sofern dafür öffentliche Fördermittel zur Verfügung gestellt werden [37]. Der Lebensmittelgroßhändler *ASKO* betreibt mehrere von *Scania* gelieferte BZ-LKW und einzelne Industrieakteure kommunizieren ambitionierte Zielvorstellungen für LKW-Flotten [38]. Schließlich werden im EU-Projekten derzeit 5 BZ-Busse betrieben und weitere 10 Fahrzeuge beschafft [27], sowie der Einsatz einer größeren Anzahl von BZ-PKW vorangetrieben [3].

Die Projekte werden infrastrukturseitig durch nationale Fördermittel insbesondere von der Regierungsorganisation *ENOVA* und fahrzeugseitig durch großzügige Kaufanreize unterstützt [36]. Dazu kommen EU-Mittel für die jeweiligen Projekte. Die nachfolgende Tabelle fasst den Stand der H₂-Mobilität in Norwegen Stand März 2019 zusammen.

Tabelle 3-VI: BZ-Fahrzeuge und H₂-Tankstellen in Norwegen [36].

FAHRZEUGE	ZIELGRÖßEN	STAND 03-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
BZ-PKW ¹⁾	keine (offiziellen) Zielgrößen	159 in Betrieb	am nationalen Anreizprogramm Beteiligte	nationale Kaufanreize für Null-Emissions-Fahrzeuge
BZ-Busse		5 in Betrieb		
BZ-LKW ¹⁾		nicht bekannt		
TANKSTELLEN	ZIELGRÖßEN	STAND 03-2019	AKTEURE	FÖRDERUNG
700 bar vor-Ort	keine (offiziellen) Zielgrößen	1 in Betrieb	am nationalen Anreizprogramm Beteiligte	nationale Bezuschussung Bau, keine Förderung Betriebskosten
700 bar angeliefert		4 in Betrieb		
350 bar vor-Ort		1 in Betrieb		
350 bar angeliefert		0 in Betrieb		
ANMERKUNGEN	¹⁾ Einschließlich Fahrzeugen mit BZ-Range-Extender			

3.7 Vergleichende Betrachtung im Kontext anderer Länder

Die oben vollzogene Detailbetrachtung der EU und fünf ausgewählter Länder gibt einen fundierten Überblick zu Stand und Entwicklungstrends H₂-basierter Mobilität in wichtigen europäischen Fahrzeugmärkten mit starkem einschlägigen Technologieengagement. Während sich, trotz leichter Abstriche bei Norwegen, in allen Märkten eine deutliche Dynamik zugunsten der H₂-Mobilität abzeichnet, bleibt das Bild hinsichtlich der Technologieentwicklung in anderen EU-Ländern und internationalen Märkten unvollständig. Daher wird der Erkenntnishorizont durch die Skizzierung ausgewählter Entwicklungen in der EU und Asien erweitert.

Die *Alternative Fuels Infrastructure Directive* (AFID) der EU ist ein guter Indikator des europaweit anzutreffenden Engagements für H₂-basierte Mobilität. Wie unter 4.1 ausführlich dargestellt, werden die EU-Mitgliedsstaaten durch die AFID aufgerufen, *Nationale Strategierahmen* für den Aufbau von Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe zu entwickeln. Während die Erstellung von Strategierahmen für andere Kraftstoffe verbindlich ist, sind die Staaten nicht zur Berücksichtigung von Wasserstoff verpflichtet [39]. Daher kann die freiwillige Entwicklung entsprechender Strategien aussagekräftige Hinweise zum einschlägigen Engagement liefern. Bis heute haben 14 von 28 Mitgliedsstaaten Strategien für den Auf- bzw. Ausbau von H₂-Infrastrukturen vorgelegt. Neben den oben diskutierten Nationen Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich haben auch Belgien, Bulgarien, Estland, Finnland, Italien, Österreich, Schweden, Spanien, Tschechien und Ungarn Strategierahmen für Wasserstoff vorgelegt [40]. Damit erkennen diese Länder H₂-basierte Mobilität als wichtige Zukunftstechnologie an und lassen eine Unterstützung des Markthochlaufs erwarten. Die meisten dieser Länder beteiligen sich auch an einschlägigen EU-Vorhaben: Beispielsweise sind 8 der Nationen mit einer H₂-Infrastrukturstrategie in aktuellen BZ-Busprojekten aktiv [27], während sich weitere Länder in anderen H₂- und BZ-Vorhaben engagieren [3].

Zur adäquaten Einordnung der deutschen und europäischen Aktivitäten zur Kommerzialisierung der H₂-Mobilität ist ein Blick auf internationale Markttrends insbesondere in Asien von Bedeutung. Wie bereits angeklungen und in Kapitel 5 vertiefend diskutiert, nehmen asiatische Firmen heute bei Herstellung und Vertrieb von BZ-Fahrzeugen eine globale Führungsposition ein. Mit Toyota und Honda verfügt Japan über Automobilbauer, die zusammen einen Großteil der weltweit kommerziell vertriebenen BZ-Fahrzeuge liefern.

Der südkoreanische Hersteller Hyundai tritt als Anbieter von BZ-Fahrzeugen erfolgreich in heimischen und internationalen Märkten an. In beiden Ländern verfolgt die Industrie sehr ambitionierte Zielsetzungen für den Markthochlauf von Fahrzeugen und Betankungsinfrastruktur und wird staatlicherseits stark durch Fördermittel und günstige politische Rahmenbedingungen unterstützt. Insgesamt übertrifft das Ausmaß bisheriger Innovationsaktivitäten und der antizipierte Markthochlauf der H₂-Mobilität die entsprechenden Entwicklungen in Deutschland und der EU bei weitem [41].

Dieser Trend wird durch das erst wenige Jahre alte, aber heute umso stärkere Engagement Chinas weiter verstärkt: Ende 2016 stellte die Zentralregierung die Zielsetzung auf, den Bestand an BZ-Fahrzeugen bis 2025 auf 50.000 und bis 2030 auf mindestens 1.000.000 Einheiten auszubauen. Dafür sollen bis 2025 etwa 350 und bis 2030 etwa 1.000 H₂-Tankstellen in Betrieb sein [42]. Für die Erreichung dieser Ziele stellt die Regierung attraktive Subventionen bereit [41]. Die Industrie reagiert einerseits mit dem massiven Aufbau eigener Technologie- und Fertigungskompetenzen und andererseits durch verstärkte Kooperationen mit ausländischen Technologieführern [43]. Beispielsweise nahm der kanadische BZ-Hersteller *Ballard* zusammen mit einem Unternehmen der chinesischen Automobilindustrie eine Produktionsanlage für BZ-Stacks in Betrieb. Noch 2017 begann die Herstellung von 6.000 Stacks für schwere BZ-Nutzfahrzeuge pro Jahr und soll auf 20.000 Stacks ausgeweitet werden [44]. Zahlreiche andere internationale BZ-Hersteller kooperieren gleichfalls mit namhaften chinesische Fahrzeugherstellern und tragen zum Aufbau eines globalen Leitmarkts für die H₂-basierte Mobilität bei: allein die o.g. Stack-Fertigungskapazitäten könnten die europäische Nachfrage mehrfach befriedigen und fordern auch die deutsche Industrie energisch heraus. Überdies reduziert die chinesische Regierung ihre bislang umfassende Förderung batterieelektrischer Fahrzeuge zugunsten der H₂-Mobilität, der jetzt die größte Unterstützung zukommt [42].

4 Regulatorische Rahmenbedingungen

Das Kapitel führt die vorangegangenen Analysen der H₂-basierten Mobilität in der EU sowie den fünf vertiefend betrachteten Ländern weiter. Die Untersuchung fokussiert auf regulatorische Vorgaben und insbesondere auf verschiedene für die H₂-Mobilität zentrale EU-Regularien; daneben werden einschlägige nationale Rahmenbedingungen und politische Initiativen analysiert. Abschließend wird die Umsetzungsebene der Gesetze diskutiert.

4.1 EU-Regularien zur Förderung der H₂-Mobilität

Eine Reihe von EU-Regularien beeinflusst die Markteinführung alternativer Antriebe und entsprechender Fahrzeuge wesentlich. Die Regularien betreffen sowohl verbrennungsmotorische wie auch mit Elektromotoren ausgestattete Fahrzeuge, verschiedenartige fossile und regenerative Kraftstoffe, sowie eine Bandbreite alternativer Infrastrukturen. BZ-Fahrzeuge und H₂ werden nur zum Teil explizit berücksichtigt und stellen nur eine unter mehreren Optionen dar. Die Regularien werden von der EU-Kommission in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsstaaten erarbeitet und per Überführung in nationales Recht durch Letztere umgesetzt. Angesichts der Komplexität der Materie werden nur die wichtigsten Regularien referiert. Die Bedeutung der Regularien für die Marktperspektiven H₂-basierter Mobilität wird angesprochen und positive Wirkungen werden festgestellt. Die Diskussion kritischer Aspekte erfolgt jedoch erst während der Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen zur Förderung der H₂-Mobilität in Kapitel 9.

Einer der wesentlichsten Treiber für die Kommerzialisierung alternativer Antriebskonzepte, einschließlich wasserstoffbetriebener BZ, sind EU-Regularien zur Begrenzung des Kohlendioxid-Ausstoßes der von den Fahrzeugherstellern vertriebenen Fahrzeugflotten. Seit 2009 sind PKW und leichte Nutzfahrzeuge einer CO₂-Regulierung unterworfen, der zufolge der durchschnittliche jährliche Ausstoß aller neu zugelassenen Fahrzeuge eines Herstellers einen niedergelegten Grenzwert in Gramm CO₂ pro Kilometer nicht überschreiten darf. Ab dem Jahr 2021 dürfen die PKW-Flottenemissionen einen Wert von 95 Gramm pro Kilometer (g/km) nicht überschreiten und bereits 2020 wird für leichte Nutzfahrzeuge ein Grenzwert von 147 g/km gelten. Im April 2019 wurden weitere und sehr weitreichende Verschärfungen der Grenzwerte beschlossen: Demnach müssen die CO₂-Flottenemissionen von PKW bis 2025 um 15 und bis 2030 um 37,5 Prozent gegenüber dem Stand von 2021 vermindert werden. Leichte Nutzfahrzeuge müssen zeitgleich Emissionsreduzierungen von 15 bzw. 31 Prozent erreichen. Überdies werden erstmals CO₂-Flottengrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge entwickelt und sehen nach derzeitigem Verhandlungsstand gegenüber 2019 anspruchsvolle Emissionsminderungen von 15 Prozent im Jahr 2025 und um 30 Prozent im Jahr 2030 vor [45].

Bei Nichterreichung der Zielwerte werden empfindliche und zunehmend strenger gehandhabte Strafzahlungen für die jeweiligen Hersteller fällig. Beispielsweise wird ab 2019 ein Strafbetrag von 95 Euro pro g/km Grenzwertüberschreitung pro zugelassenem PKW erhoben [45]. Einer 2018 erschienenen Studie zufolge werden voraussichtlich 8 von 13 in der EU aktiven Autobauer die Zielvorgaben nicht erreichen. Als Konsequenz müsste Volkswagen 1,4 Milliarden Euro, BMW 200 und Daimler 190 Millionen Euro bezahlen [46]. Für schwere Nutzfahrzeuge werden Strafzahlungen von 4.250 Euro pro Gramm und Tonnenkilometer (g/tkm) Grenzwertüberschreitung ab 2025 und 6.800 Euro pro g/tkm ab 2030 diskutiert [45].

Demgegenüber werden Hersteller besonders emissionsarmer PKW und leichter Nutzfahrzeuge mit einem CO₂-Ausstoß von unter 50 g/km begünstigt und können solche *zero- and low-emission vehicles* überproportional gewichtet auf ihre Zielerfüllung anrechnen. Auch die Gesetzesvorhaben für schwere Nutzfahrzeuge sehen vergleichbare Regelungen vor. Damit werden auch BZ-Fahrzeuge der verschiedenen Klassen aufgrund ihres gesetzlichen Status als Null-Emissionsfahrzeuge erheblich aufgewertet und bieten sich als Teil des Antriebsportfolios der Hersteller an. Überdies werden die Verfahren zur Emissionsmessung zunehmend realitätsnäher gestaltet und erhöhen den Druck auf Verbrennungsmotoren [45].

Auch aufgrund des aktuellen Absatzrückgangs CO₂-emissionsarmer Dieselfahrzeuge und der Einführung strengerer Abgastestverfahren ist bereits die Erreichung der für 2021 vorgeschriebenen Flottenemissionsvorgaben unwahrscheinlich. So gehen z.B. CO₂-Emissionen von 95 g/km mit einem Benzinverbrauch von etwa 4,1 bzw. einem Dieserverbrauch von 3,6 Liter pro 100 km einher [45], der deutlich unter den heutigen Durchschnittswerten liegt [47]. Daher wird allgemein anerkannt, dass eine Emissionsreduzierung unterhalb der 95-g/km-Grenze allein mit konventioneller Motorentechnologie nicht möglich ist und eine Nutzung alternativer Antriebskonzepte erfordert. Neben Batterieautos gehören auch BZ-Fahrzeuge zu den relevanten Alternativen und könnten insbesondere bei schweren Fahrzeugen mit hohen Reichweiten eine wichtige Rolle spielen [48]. Daher zahlen die Verschärfungen der Grenzwerte unmittelbar auf die Marktperspektiven von BZ-Fahrzeugen ein.

Die *Renewable Energy Directive* (RED) aus dem Jahr 2009 zielt darauf, den Anteil erneuerbarer Energien an der allgemeinen Energieversorgung der EU zu erhöhen. Speziell für den Verkehrssektor sah die ursprüngliche RED vor, dass bis 2020 mindestens 10 Prozent des in allen Mitgliedsstaaten verwendeten Kraftstoffs auf EE basieren. Die Richtlinie schaffte einige Ansatzpunkte für die Anrechnung von EE-Wasserstoff auf die in den EU-Ländern zu implementierenden Biokraftstoffquoten, erkannte H₂ aber nicht explizit als Biokraftstoff an. Dies änderte sich mit der Ende 2018 verabschiedeten Überarbeitung *RED II*: Darin wird die allgemeine EE-Quote auf 32 Prozent und der EE-Anteil an Kraftstoffen auf 14 Prozent mit Zieljahr 2030 erhöht [49]. Insbesondere werden Wasserstoff aus erneuerbarem Strom und daraus synthetisierte Kraftstoffe als anrechnungsfähige EE-Kraftstoffe anerkannt. Auch der Einsatz von EE-H₂ in Raffinerien für die Herstellung konventioneller Kraftstoffe kann jetzt auf die Quote angerechnet werden [10]. Da in Raffinerien große Mengen an H₂ benötigt werden und somit erhebliche Skaleneffekte entstehen, ist diese Regelung von wesentlicher wirtschaftlicher Bedeutung. Allerdings sind noch nicht alle Fragen zur Umsetzung der Richtlinie geklärt, insbesondere da ein Herkunftsnachweissystem für EE-H₂ erst noch implementiert werden muss. RED II ist bis Mitte 2021 in nationales Recht umzusetzen.

Die *Fuel Quality Directive* (FQD) von 2009 setzt technische Standards für Kraftstoffe und ist insbesondere hinsichtlich der Begrenzung von CO₂-Emissionen relevant. Im Gegensatz zum stoffstrombasierten Ansatz der RED verlangt die FQD nicht den Einsatz gewisser bzw. biogener Rohstoffe bei der Kraftstoffproduktion, sondern die Einhaltung von Emissionsminderungszielen unabhängig von der zugrundeliegenden Kraftstoffart: Bis Ende 2020 muss der CO₂-Gehalt in der EU abgegebener Kraftstoffe gegenüber dem Stand von 2010 um mindestens 6 Prozent sinken. Als Kraftstoffe gelten insbesondere Benzin, Diesel und Biokraftstoff. Während Wasserstoff nicht explizit genannt wird, ermöglicht die FQD doch die Berücksichtigung von EE-Wasserstoff als *erneuerbaren Kraftstoff nicht-biogenen Ursprungs*.

Daher kann EE-Wasserstoff, ebenso wie z.B. EE-Strom und herkömmliche Biokraftstoffe, auf die Erfüllung der 6-Prozent-Minderungsvorgabe angerechnet werden [50]. Da EE-Wasserstoff einen sehr niedrigen CO₂-Gehalt aufweist, ist er von besonderer wirtschaftlicher Wertigkeit. Eine Überarbeitung bzw. Neufassung der FQD ist nicht vorgesehen.

Die bereits angesprochene *Alternative Fuels Infrastructure Directive* aus dem Jahr 2014 unterstützt den Aufbau von Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe. Angesichts der unzulänglichen existierenden Infrastrukturen für strom-, wasserstoff- und erdgasbetriebene Fahrzeuge werden die Mitgliedsstaaten zur Erarbeitung individueller Strategien zum Auf- bzw. Ausbau entsprechender Betankungsnetzwerke aufgefordert. Die AFID zielt darauf, eine EU-weite Mindestabdeckung alternativer Kraftstoffinfrastrukturen zu gewährleisten, gemeinsame technische Standards zu etablieren, und Fahrzeugnutzer mit den neuartigen Treibstoffen vertraut zu machen. Die Mitgliedsstaaten wurden zur Erstellung von *National Policy Frameworks* bzw. *Nationalen Strategierahmen* aufgerufen. Bei der Ausgestaltung hatten sie einigen Freiraum und waren, im Gegensatz zu Strom und Erdgas, nicht zur Berücksichtigung von H₂ verpflichtet [39]. Dennoch legten 14 Mitgliedsstaaten Strategien zum Auf- bzw. Ausbau von Wasserstoffinfrastrukturen bis Ende der Jahres 2025 vor (vgl. 3.7), einschließlich von Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich [40]. Die Nationalen Strategierahmen werden unter 4.2 bis 4.5 angesprochen. Die AFID verankert H₂ als alternativen Kraftstoff und die Notwendigkeit des EU-weiten Aufbaus entsprechender Infrastruktur fest im Kanon entsprechender Regularien und stärkt so das politische Gewicht der H₂-Mobilität erheblich. Allerdings spiegelt die Freiwilligkeit der Maßnahme doch die begrenzte Gestaltungskraft auf europäischer Ebene wider und deutet auf den Vorrang anderer EU-Regularien bzw. nationaler politischer Programme hin. Überdies sind die Strategierahmen aller Mitgliedsstaaten hinsichtlich anderer Antriebskonzepte und v.a. Batteriefahrzeuge deutlich ehrgeiziger.

Die *Clean Vehicles Directive* (CVD) von 2009 verpflichtet Mitgliedsstaaten und die darin ansässigen öffentlichen Behörden und Unternehmen zur Beschaffung emissionsarmer Fahrzeuge [40]. Aufgrund begrenzter Wirksamkeit der ursprünglichen Richtlinie wurde im Juni 2019 eine wesentlich verschärfte Version mit klar definierten Vorgaben beschlossen, die innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umgesetzt werden muss. Demnach müssen bei öffentlichen Beschaffungsmaßnahmen verbindliche Mindestquoten für emissionsarme bzw. -freie Fahrzeuge eingehalten werden, die ja nach Fahrzeugklasse, EU-Mitgliedsland und Zieljahr variieren. Die Mindestquoten können durch nationale Zielsetzungen zusätzlich erhöht werden und sind auch bestimmten privaten Akteuren gegenüber bindend. Je nach Land müssen 17,6 bis 38,5 Prozent der ab August 2021 angeschafften leichten Nutzfahrzeuge weniger als 50 Gramm CO₂ pro Kilometer ausstoßen und ab Anfang 2026 lokal komplett emissionsfrei sein. Deutschland gehört wie die Niederlande und das Vereinigte Königreich zu den Ländern mit den strengsten Vorgaben und muss bereits ab 2021 einen Anteil von 38,5 Prozent erreichen; Frankreich liegt mit 37,4 Prozent nur leicht zurück. Auch für LKW und Busse werden Emissionsvorgaben und Mindestquoten gesetzt: So müssen einerseits emissionsarme alternative Antriebskonzepte genutzt und z.B. Brennstoffzellen, Batterie- und Erdgasfahrzeuge angeschafft und andererseits lokal quasi emissionsfreie Fahrzeuge mit einem CO₂-Ausstoß von unter 1 g/km eingesetzt werden. In Deutschland müssen ab 2021 bereits 10 Prozent der LKW und 45 Prozent der Busse emissionsarm sein und ab 2026 Mindestanteile von 15 bzw. 65 Prozent erreicht werden; die Situation bei den o.g. Ländern ist ähnlich. Überdies ist EU-weit die Hälfte der Beschaffungsziele für Busse durch emissionsfreie Fahrzeuge, im Wesentlichen also Brennstoffzellen- oder Batteriebusse zu erfüllen [51].

Da die CVD insbesondere hinsichtlich von Bussen große Teile gerade für BZ-Antriebe besonders geeigneter Märkte reguliert, kann die Richtlinie als ausgesprochen wirksamer Treiber H₂-basierter Mobilität gelten.

4.2 Politische Initiativen zur Förderung der H₂-Mobilität in Deutschland

Deutschland fördert die H₂-Mobilität nicht nur durch das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, sondern auch verschiedene andere politische Initiativen und strategische Foren. Die Aktivitäten entfalten sich vor dem Hintergrund des *Energiekonzepts* der Bundesregierung und betten sich in den europäischen Kontext ein. Nach einer knappen Analyse der Zielsetzungen des Energiekonzepts für den Verkehrsbereich werden ausgewählte, zentrale Initiativen und Foren hinsichtlich ihrer Rolle für den Markthochlauf der H₂-basierten Mobilität diskutiert. Weitere in Fachkreisen wohlbekannte Aktivitäten werden abschließend nur kurz erwähnt.

Das Energiekonzept von 2010 zielt auf die Verwirklichung einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung. Für den Verkehrssektor wird eine Verminderung des Endenergieverbrauchs um 10 Prozent bis 2020 und um 40 Prozent bis 2050 (vs. 2005) angestrebt. Der Zielkatalog wurde später um die Erhöhung des EE-Anteils im Verkehr auf 10 Prozent bis 2020 erweitert [52]. Der 2016 verabschiedete *Klimaschutzplan 2050* sieht zudem eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) des Verkehrs um 40 bis 42 Prozent bis 2030 (vs. 1990) vor [53]. Für H₂- und BZ-Technologien eröffnet dies beträchtliche Chancen: Auf EE-Basis hergestellter H₂ kann hocheffizient in BZ zu Strom gewandelt und in mobilen wie auch stationären Anwendungen mit geringen THG-Emissionen genutzt werden. Somit zählen H₂ und BZ auf alle Zielsetzungen des Energiekonzepts ein.

Die *Nationale Plattform Zukunft der Mobilität* fungiert als ein zentrales strategisches Beratungsgremium der Bundesregierung und fördert die Elektromobilität, wie auch andere nachhaltige Antriebsoptionen, sowohl hinsichtlich von Batterie- wie auch BZ-Fahrzeugen [54]. Beispielsweise wurden schon vom Vorgängergremium *Nationale Plattform Elektromobilität* die heute als *Umweltbonus* bekannten Kaufprämien für Elektrofahrzeuge empfohlen, welche die Anschaffung von Batterie- und BZ-Fahrzeugen mit bis zu 4.000 Euro bezuschussen und künftig noch erhöht werden. Ein Bericht vom März 2019 untersucht Wege zu einer nachhaltigen Reduktion von THG im Verkehrssektor und spricht neben anderen Antriebskonzepten auch H₂ und BZ erhebliche Potenziale hinsichtlich der Erreichung der Klimaziele für 2030 im Verkehrssektor zu [55].

Für die Umsetzung der Energiewende im Verkehrsbereich ist auch die seit 2013 bestehende *Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie* (MKS) ein zentrales strategisches Gremium der Bundesregierung [56]. Die vom BMVI moderierte MKS leistet eine detaillierte Betrachtung des Verkehrssektors und entwirft nachhaltige Zukunftskonzepte. Dazu werden einerseits regelmäßig Stakeholder konsultiert und Studien zu wichtigen Forschungsfragen beauftragt; andererseits werden Pilotprojekte zur technologischen Validierung und Markteinführung v.a. innovativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte finanziert. Zu den zentralen Zielen der MKS gehören Emissionsminderungen, Effizienzsteigerungen, die verstärkte Nutzung von EE im Verkehrssektor, sowie die bessere Integration von Verkehrs- und Energiewirtschaft durch Sektorenkopplung. Ein besonderes Augenmerk der MKS liegt auf der Gestaltung eines klimafreundlichen Güterverkehrs, auch da für diesen Bereich ein starkes Wachstum prognostiziert wird.

Die Elektrifizierung von Antrieben wird als unerlässlich erachtet: neben reinen Batterie- und Plug-In-Hybridfahrzeugen spielen BZ-Fahrzeuge eine zentrale Rolle. In einem Papier zur Weiterentwicklung der MKS bekräftigt der Bundesverkehrsminister die Bedeutung der H₂-Mobilität und des NIP [53].

Speziell schwere Nutzfahrzeuge werden in einem vom BMVI Mitte 2017 im Rahmen der MKS vorgestellten *Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr* betrachtet [57]. Der Fahrplan wurde von Vertretern der Wirtschaft und Wissenschaft erstellt und untersuchte die Potenziale von Flüssigerdgas v.a. auf Basis erneuerbarer Energien, Wasserstoff und strombasierten Flüssigkraftstoffen im Hinblick auf deren Eignung als Kraftstoff für den schweren Straßengüterverkehr. EE-H₂ spielt in allen analysierten Antriebskonzepten und v.a. bei der direkten Nutzung in BZ-LKW eine zentrale Rolle. In einigem Detailierungsgrad werden Zielvorstellungen zum Markthochlauf von BZ-LKW ab 2020 und zum Eintritt in den Massenmarkt nach 2030 formuliert. Die Resultate gehen in die zukünftige Ausgestaltung der MKS ein und lassen eine zunehmende Bedeutung der H₂-Mobilität erwarten.

Von erheblicher Bedeutung sollten auch einige Mitte 2019 erfolgte Ankündigungen der Bundesregierung sein: So gab die Bundesministerin für Bildung und Forschung bekannt, die bisher von ihrem Ministerium bereitgestellten Mittel für die Wasserstoffforschung in den nächsten drei Jahren auf 180 Millionen Euro zu verdoppeln [58]. Wichtiger noch war eine Verlautbarung des Bundeswirtschaftsministers, der zufolge eine Wasserstoffstrategie für Deutschland erarbeitet wird. Laut Minister soll die Technologieführerschaft Deutschlands ausgebaut und eine internationale Spitzenposition erreicht werden [59]. Die Vorstellung sollte 2020 erfolgen.

Abgesehen von den unter 3.2 und oben skizzierten Fördermaßnahmen speziell für die H₂-basierte Mobilität bietet die Bundesregierung auch technologieneutrale Unterstützung für alternative Antriebssysteme an. Neben den bereits erwähnten Kaufprämien für Elektrofahrzeuge stellt der Bund weitere Anreize für den Erwerb entsprechender Fahrzeuge zur Verfügung: So werden seit 2018 im Rahmen des BMVI-Förderprogramms *Energieeffiziente und/oder CO₂-arme schwere Nutzfahrzeuge* Zuschüsse von bis zu 40.000 Euro für schwere, elektrifizierte LKW gezahlt [60], die den Markthochlauf auch der H₂-Mobilität befördern.

Als wichtige negative Treiber der H₂-Mobilität sind insbesondere die letztlich auf EU-Regulativen zur Gewährleistung urbaner Luftqualität zurückzuführenden Fahrrestriktionen zu nennen, welche insbesondere ältere Dieselfahrzeuge vom städtischen Verkehr ausschließen. In Deutschland wie weltweit erlassen immer mehr und zumeist große Städte Einfahrrestriktionen, die der Limitierung von Schadstoffen, Lärm und des allgemeinen Verkehrsaufkommens dienen und den Einsatz von emissionsarmen bzw. -freien Fahrzeugen erfordern. Auch Kraftfahrzeugsteuern und Mautgebühren, bzw. die Befreiung von oder Reduzierung denselben, sind als bedeutsame Instrumente zur Beförderung alternativer Antriebssysteme zu nennen [61].

Als Indikator der politischen Unterstützung H₂-basierter Mobilität kann auch die Ausformulierung des Nationalen Strategierahmen für die Alternative Fuels Infrastructure Directive herangezogen werden. Deutschland erstellte einen der hinsichtlich H₂-Infrastruktur europaweit ambitioniertesten Pläne [62]. Insbesondere durch die bereits in Abschnitt 3.2. skizzierten Aktivitäten von H₂ Mobility wird der Infrastrukturausbau mit starker Unterstützung der öffentlichen Hand vorangetrieben. Wie unter 6.3 dargelegt, wird das für 2020 gesetzte Ziel von 100 in Betrieb befindlichen Tankstellen erreicht bzw. übertroffen [60]. Dies unterstreicht die Ernsthaftigkeit politischen Willens und Handelns zur Förderung des Markthochlauf der H₂-Mobilität.

Eine umfangreiche Analyse der legislativen Rahmenbedingungen der H₂-Mobilität in Europa wurde im EU-Projekt *HyLaw - Hydrogen Law and removal of legal barriers to the deployment of fuel cells and hydrogen applications* – auch für Deutschland durchgeführt. Die relevante Gesetzgebung wurde mit Hinblick auf die Identifikation und Beseitigung der rechtlichen Barrieren für den kommerziellen Einsatz von H₂- und BZ-Anwendungen erforscht. Die Analyse kam zu dem Schluss, dass der deutsche regulative Rahmen Ende 2018 im Vergleich zu anderen EU-Ländern bereits gut und detailliert entwickelt war [63]. Nur relativ wenige schwerwiegende Hindernisse für den Markthochlauf werden identifiziert und in Kapitel 9 diskutiert. Wie auch bei den nachfolgend untersuchten anderen EU-Ländern werden überwiegend Hemmnisse auf europäische Ebene aufgezeigt und Empfehlungen zur Abhilfe ausgesprochen

4.3 Regulative Besonderheiten und Entwicklungsbedarfe in Frankreich

Jenseits der bereits unter 3.3 abgehandelten Initiativen fallen auch einige während der Recherche aufgefundene und in Deutschland nicht anzutreffende regulative Besonderheiten auf: Insbesondere wurde Ende 2018 von den zuständigen Gremien des Großraum Paris beschlossen, ab dem Jahr 2024 die Einfahrt von Dieselfahrzeugen in den *Parisian super-peripheral* zu unterbinden und dieses Verbot 2030 auf alle Verbrennerfahrzeuge auszuweiten [17]. Der Beschluss geht weit über die in Deutschland bestehenden Umweltzonen hinaus und verbessert die Marktperspektiven von BZ- und anderen elektrischen Fahrzeugen wesentlich. Interessant ist auch ein im Rahmen des 2018 beschlossenen Strategieplans vorgesehene Instrument, dass die Mehrkosten elektrolytisch und auf EE-Basis hergestellten Wasserstoffs gegenüber aus Erdgas reformiertem H₂ ausgleicht [16]. Die auf die Bezuschussung von Beschaffungsinvestitionen ausgerichteten deutschen Maßnahmen der Marktaktivierung kennen ein solches Vorgehen nicht, obwohl die hohen Kosten von EE-H₂ gerade bei Anwendungen mit hohen Verbräuchen ein Kommerzialisierungshindernis darstellen.

Die in Frankreich vorherrschende Gesetzgebung und ihre Auswirkungen auf die Marktperspektiven der H₂-Mobilität wird im Rahmen des EU-Projekts HyLaw untersucht. Der Abschlussbericht rekapituliert die jüngsten politischen Entwicklungen und führt vor Augen, dass H₂ außerhalb etablierter industrieller Anwendungen erst seit kurzem von politischer und wirtschaftlicher Bedeutung ist [16]. So verwundert es nicht, dass noch erheblicher regulativer Entwicklungsbedarf für H₂- und BZ-Technologien besteht: Der Bericht moniert, dass das bestehende nationale Regelwerk keine für die Umsetzung des 2018 beschlossenen Strategieplans ausreichende Orientierung gibt. Vielmehr müssten eine Reihe von Themenfeldern einschließlich der H₂-Mobilität erst noch reguliert und mit Vorschriften aus anderen Wirtschaftsbereichen harmonisiert werden. Dementsprechend werden spezielle nationale Entwicklungsbedarfe z.B. hinsichtlich von Regularien für Tankstellen benannt, die neben H₂ auch andere Kraftstoffe anbieten. Die Diskussion solcher Sachverhalte bietet jedoch wenige für Deutschland lehrreiche Erkenntnisse und wird nicht fortgesetzt. Immerhin lieferte Frankreich einen wohl ausformulierten Nationalen Strategierahmen zur Umsetzung der AFID und hält insofern gut bei der nationalen Implementierung europäischer Regularien mit [62].

4.4 Gut entwickelter regulativer Rahmen im Vereinigten Königreich

Auch im Vereinigten Königreich ist als nationale Besonderheit die Bedeutung von Einfahrtsverboten in urbane Räume zu nennen: Wie der Abschlussbericht des Busprojekts CHIC betont, war die angekündigte Einführung einer *Ultra-Low Emission Zone* und die damit verbundene Pflicht zum Einsatz von Null-Emissionsbussen im Stadtzentrum von London ein wesentlicher Treiber für die Beschaffung der BZ-Busse. Obgleich sich die Null-Emissionsvorgabe nur auf einstöckige Busse bezog, gab der Bürgermeister die Devise aus, auch bei der Anschaffung von Doppeldeckerbussen zukünftig Null-Emissionsfahrzeuge zu bevorzugen [5].

Den Analysen des HyLaw-Projekts zufolge verfügt das Vereinigte Königreich Ende 2018 über einen gut entwickelten und in etwa dem Stand von Deutschland vergleichbaren regulativen Rahmen [23]. Offenkundig hat das vorausgegangene jahrzehntelange Technologieengagement wesentlich zu diesem Status beigetragen. Auch der Nationale Strategierahmen zu AFID spiegelt den starken Gestaltungswillen des Landes im Bereich der H₂-Mobilität wider [62].

Wie bei Deutschland beziehen sich die meisten von HyLaw ermittelten Defizite auf EU-Regularien und werden diesbezüglich diverse Optimierungsvorschläge gemacht. In einigen Fällen werden zu Deutschland und Frankreich deckungsgleiche Handlungsempfehlungen, z.B. hinsichtlich der Notwendigkeit der Einführung eines EU-weiten Herkunftsnachweissystems für erneuerbaren und kohlenstoffarmen Wasserstoff ausgesprochen. Die landesspezifischen regulativen Besonderheiten sind für diese Studie ohne Belang; die Schnittmenge der EU-bezogenen Aussagen aller analysierten Länder wird in Kapitel 9 analysiert.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass aufgrund des laufenden Brexit-Verfahrens derzeit keine Aussagen zur zukünftigen Bindewirkung zwischen der EU und dem Vereinigten Königreich geschlossener Vereinbarungen getroffen werden können.

4.5 Förderliche Rahmenbedingungen in den Niederlanden

Die wiedererwachte Dynamik der H₂-Mobilität in den Niederlanden wird von seitens der EU als besonders wirkungsvoll erachteten Rahmenbedingungen begünstigt. Neben gut entwickelten Kooperationen zwischen öffentlichen und privaten Akteuren tragen dazu auch Steuervergünstigungen und andere Anreize für Käufer von BZ-Fahrzeugen bei [62]: Einerseits sind Letztere seit mehreren Jahren von der Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer beim Erwerb und von der Kraftfahrzeugsteuer beim Betrieb, sowie verschiedenen anderen Steuern befreit bzw. profitieren von erheblichen Vergünstigungen; andererseits steigern Kaufzuschüsse, Mautbefreiungen und ähnliche Begünstigungen die Attraktivität [29].

Laut der oben vorgestellten Roadmap sind aber auch innerstädtische Fahrverbote und andere restriktive politische Beschlüsse zur Verwirklichung einer emissionsfreien Mobilität als wichtige Treiber der H₂-Mobilität zu verstehen [28]. Sicherlich tragen sowohl Förderungen wie auch Restriktionen zum ambitionierten Umsetzungsplan für die AFID bei [62].

Entsprechend der o.g. positiven Einschätzung der EU sieht auch HyLaw nur wenige Defizite beim regulativen Rahmen der Niederlande. Optimierungsbedarfe werden hauptsächlich bezüglich einiger EU-Regularien gesehen und in Kapitel 9 diskutiert [29].

4.6 Wirkungsvolle Anreize und Vorgaben in Norwegen

Brennstoffzellenfahrzeuge profitieren in Norwegen von einem attraktiven Bündel an Kaufanreizen, welches umfassende Steuernachlässe für Kauf und Betrieb der Fahrzeuge, sowie weitere Vergünstigungen z.B. bei Straßenmaut und Parkgebühren beinhaltet [34]. Die Anreize reduzieren die Kosten von BZ-Fahrzeugen auf das Niveau konventioneller Autos gehobener Klasse und gehören laut HyLaw zu den attraktivsten Europas [35]. Die Anreize sind identisch zu denen für Batteriefahrzeuge und haben sich bereits bei Letzteren hinsichtlich der Erreichung einer internationalen Führungsposition bewährt.

Überdies sieht der National Transport Plan (2018-2029) anspruchsvolle emissionsbezogene Zielvorgaben für den Verkehrssektor vor: So sollen ab 2025 neue PKW im Privatbesitz sowie Lieferwagen Null-Emissionsfahrzeuge sein und neue Stadtbusse entweder mit Null-Emissions- oder Biogasantrieben ausgestattet sein. Ab 2030 sollen dann große Teile der landesweit eingesetzten Nutzfahrzeugflotten emissionsfrei sein und der innerstädtische Lieferverkehr nahezu ausschließlich von Null-Emissionsfahrzeugen bestritten werden [36].

Die von HyLaw vollzogene Gesamtbewertung des regulativen Rahmens in Norwegen zeitigt keine wesentlichen über die Diskussion von EU-Regularien hinausgehenden Ergebnisse [29]. Eine eigenständige Bewertung wird durch Kapitel 9 ersetzt.

4.7 Die Umsetzungsebene gesetzlicher Bestimmungen

Der Begriff der *Regulations, Codes and Standards* (RCS) umfasst die Gesamtheit der Regelwerke, Durchführungsbestimmungen und Normen, die den regulatorischen Rahmen einer Technologie ausmachen. Er verdeutlicht, dass neben den eigentlichen und politisch prominenten Gesetzen auch technische Detailregelungen zur Umsetzung gesetzlicher Bestimmungen von Bedeutung sind [64]. Damit schließen RCS einerseits die unter 4.1 vorgestellten EU-Regularien zur Förderung der H₂-Mobilität samt Durchführungsbestimmungen ein. Andererseits umfassen sie auch eine Vielzahl technischer Detailregelungen bzw. Normen, deren Erstellung überwiegend von der Industrie entsandten Experten vorbehalten ist.

Im Zuge des EU-Projekts HyLaw wurden die RCS im Bereich der H₂-Mobilität in Hinblick auf die Identifikation und Beseitigung der rechtlichen Barrieren für den Markthochlauf umfassend analysiert. Das betraf neben den oben referierten Regularien auch bislang unerwähnte technische Detailregelungen. Wie bei der Analyse der RED und des Vereinigten Königreichs angesprochen, fehlt bis heute ein EU-weites Herkunftsnachweissystem für erneuerbaren und CO₂-armen Wasserstoff. Gemäß allen oben referenzierten HyLaw-Berichten stellt dies auf Ebene der Detailregelungen die größte verbleibende Hürde für die Kommerzialisierung der H₂-Mobilität dar [65]. Auch Schwierigkeiten bei der Genehmigung von Tankstellen, sowie der Qualitäts- und Mengenmessung des abzugebenden H₂ sind von Belang.

Die Diskussion auch der wichtigsten regulativen Hindernisse auf der Umsetzungsebene gesetzlicher Bestimmungen erfolgt in Kapitel 9.

5 Vertiefende Untersuchung der H₂-Mobilität

Dieses Kapitel widmet sich einer vertiefenden Untersuchung der H₂-Mobilität und behandelt die Brennstoffzellentechnologie und deren Einsatz in Personenkraftwagen, Bussen, Lastkraftwagen einschließlich von Lieferfahrzeugen. Zudem werden Fragen gesellschaftlicher Akzeptanz und der Nachhaltigkeit der H₂-Mobilität adressiert. Mit Schienenfahrzeugen wird ein weiteres Einsatzfeld von Brennstoffzellen im Mobilitätsbereich dargestellt.

5.1 Technologiekonzepte verschiedener BZ-Fahrzeugtypen

Brennstoffzellenantriebe können in den meisten Kraftfahrzeugarten eingesetzt werden und dort z.B. Verbrennungsmotoren oder reine Batterieantriebe ersetzen. Neben den oben angesprochenen Anwendungsbereichen werden BZ u.a. auch in Gabelstaplern, sowie Schiffen und Flugzeugen genutzt. Für den Antrieb von BZ-Fahrzeugen kommen nahezu ausschließlich *Proton Exchange Membrane* bzw. PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz und erzeugen durch die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrischen Strom, wobei lediglich Wasser als Nebenprodukt entsteht. Der Wasserstoff wird zumeist gasförmig und bei Drücken von bis zu 700 bar in Druckbehältern mitgeführt, während der Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen wird. Bei BZ-PKW und leichten Nutzfahrzeugen hat sich die 700-bar-Speicherung etabliert und ermöglicht konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Betankungszeiten von etwa 3 Minuten [8]. Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge verfügen bislang über 350-bar-Tanks und Betankungsdauern von unter 10 Minuten [66]. Allerdings ist ein neuer Trend zur 700-bar-Speicherung auch bei den letztgenannten Fahrzeugen zu beobachten.

Bei den bei PKW vorherrschenden brennstoffzellendominanten Antriebssystemen treibt der hergestellte Strom einen Elektromotor an oder wird - je nach Fahrsituationen - in einer Pufferbatterie gespeist, die auch Strom an den Motor abgeben kann. Leistungselektronik und Komponenten zur Rückgewinnung von Bremsenergie gehören ebenfalls zu den Standardkomponenten eines BZ-Antriebsstrangs. Prinzipiell ist diese Konfiguration auch bei Bussen und anderen Nutzfahrzeugen anzutreffen, obgleich der Antriebsstrang oftmals nicht BZ-dominant ausgelegt ist und deutliche Unterschiede bei verbauten Systemen und Komponenten bestehen. Hervorzuheben ist die Technologievariante eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-Extender, bei der die BZ zum kontinuierlichen Laden einer dominanten Traktionsbatterie dient [67]. Dabei werden die Fahrzeuge stationär an Ladestationen geladen und beziehen nur während der Fahrt Strom von der BZ. Wie unten ausgeführt, sind Range-Extender im Bereich der Nutzfahrzeuge eine wichtige Antriebsoption. Die umseitige Abbildung stellt den Aufbau eines BZ-PKW am Beispiel eines *Mercedes-Benz GLC F-CELL* dar, der allerdings im Gegensatz zu den meisten anderen BZ-Autos als *Plug-In-Hybrid* konzipiert ist und daher über eine Lithium-Ionen-Batterie außergewöhnlich großer Kapazität verfügt.

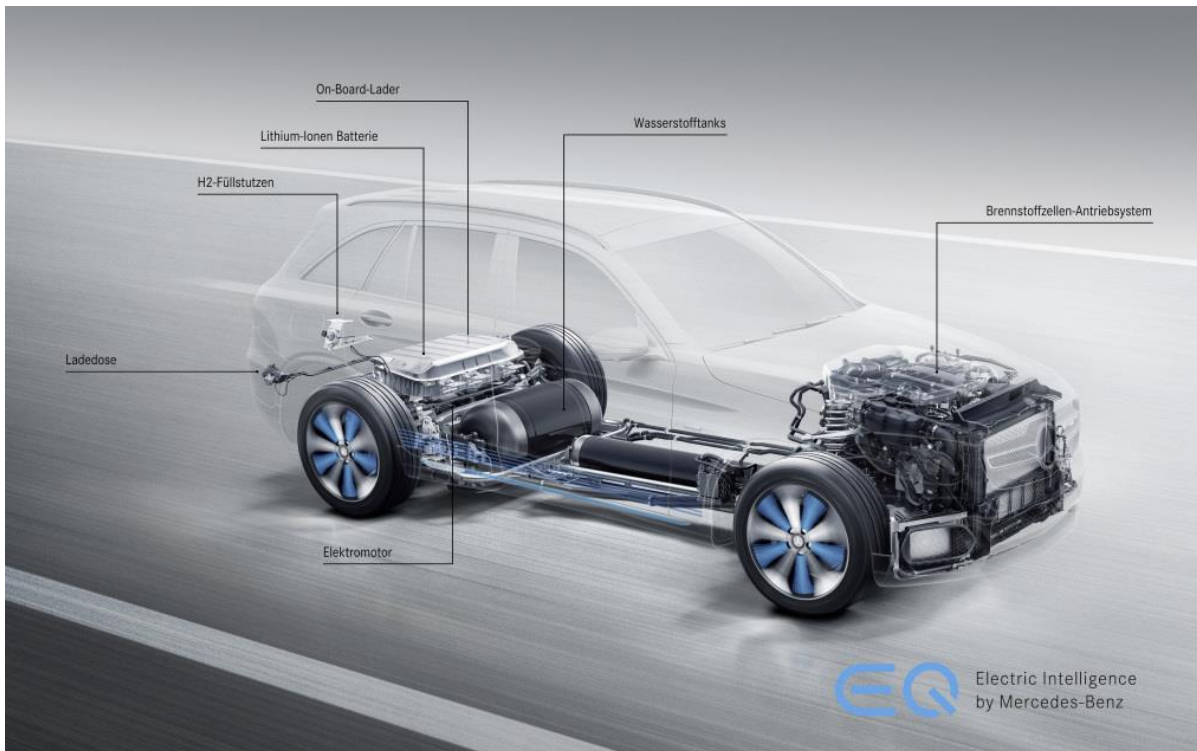


Abbildung 5.1: Aufbau des Mercedes-Benz GLC F-CELL [68].

Der Aufbau und die Funktionsprinzipien einer PEM-Brennstoffzelle auf Ebene einer einzelnen Zelle wird in der nachfolgenden Abbildung illustriert. Eine Vielzahl einzelner Zellen - z.B. 370 im Falle des BZ-PKW Toyota Mirai [69] - werden in sogenannten Stapeln bzw. Stacks als Kernelemente von BZ-Systemen zusammengeführt (Stapel nicht abgebildet), um so die für den Betrieb von Fahrzeugen erforderliche Leistung zu realisieren.

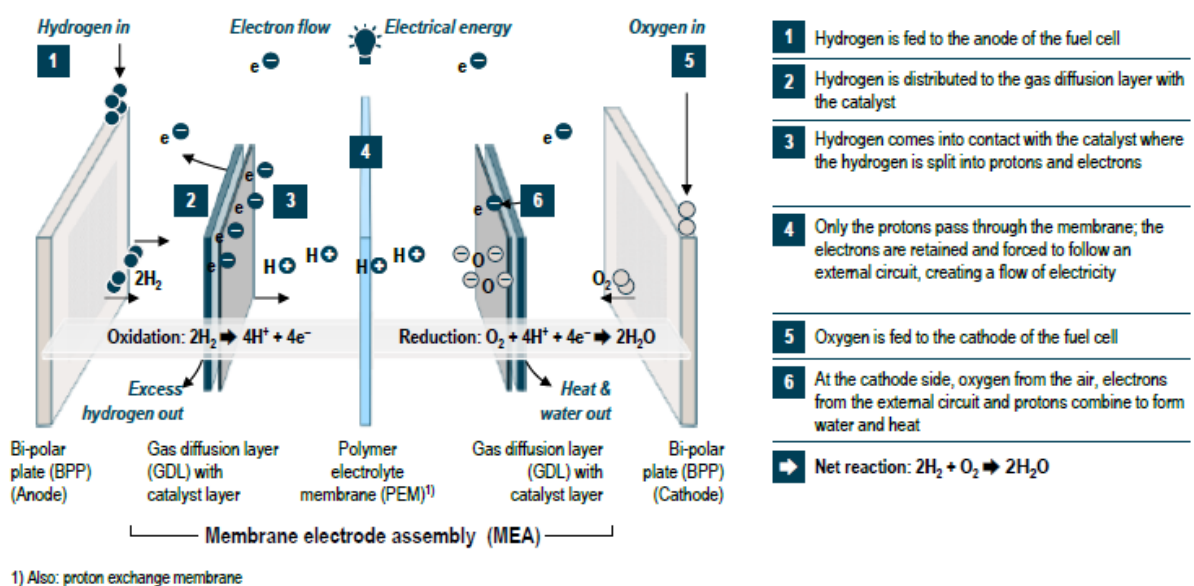


Abbildung 5.2: Komponenten und Funktionsprinzipien einer PEM-Brennstoffzelle [66].

Aufgrund der jahrzehntelangen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit von Wissenschaft und Industrie haben BZ-Systeme für den Fahrzeugeinsatz heute eine hohe technische Reife erlangt. Dies wird einerseits in Berichten der mit der Umsetzung staatlicher Förderprogramme betrauten Organisationen [70], [1], [71] und andererseits an der unten diskutierten bereits erfolgten oder bevorstehenden Kommerzialisierung von Fahrzeugen deutlich.

Eine Studie ordnet verschiedenen BZ-Fahrzeugtypen die folgenden Technologiereifegrade (TRL) zu: BZ-PKW entsprechen TRL 8, was als *Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich – Produkt* definiert wird. BZ-Busse erreichen einen TRL von 7 bis 8, wobei 7 einem *Prototyp im Einsatz – Demonstration beinahe maßstabsgetreu im betrieblichen Umfeld* gleichkommt. Hinsichtlich von BZ-Lastkraftwagen wird lediglich für leichte LKW ein TRL definiert, der mit 6 bis 7 angegeben wird. TRL 6 wird als *Prototyp in Einsatzumgebung – technische Machbarkeit im Anwendungsbereich nachgewiesen* definiert [67]. Zu den heute in der Entwicklung befindlichen schweren LKW werden keine Aussagen getroffen.

Speziell zu PEM-Brennstoffzellen für PKW legte eine amerikanische Programmorganisationen dar, dass bereits 2015 die Erreichung der technischen Zielwerte für 2020 hinsichtlich Leistung, Leistungsdichte und Kaltstartvermögen vollauf zufriedenstellte, während leichte Abstriche bei den Energieeffizienz-Zielwerten gemacht werden mussten. Was Kosten und Lebensdauer anbelangt, waren Stand 2015 bis 2020 noch erhebliche Verbesserungen erforderlich [71].

Kostenreduzierungen sollen v.a. durch Skaleneffekte erzielt werden und Verfahren der Massenproduktion werden z.B. in dem deutschen Projekt *AutoStack Industrie* zwischen Unternehmen und Instituten entwickelt. Im Ergebnis ist es nun möglich, bei einer jährlichen Fertigung von 30.000 BZ-Stacks die Kostenziele von unter 35 €/kW zu erreichen. Mit einer Stack-Lebensdauer von 6.000 Stunden werden die oben angesprochenen amerikanischen Zielvorgaben übertroffen [72]. Darüber hinaus sind sich verschiedenste Expertisen darüber einig, dass noch erhebliche Kostensenkungspotenziale für die noch vergleichsweise junge BZ-Technologie bestehen [71], [1], [70], [73], [74]. Hervorzuheben sind die Technologieziele der japanischen Regierung, welche eine annähernde Kostenparität zwischen verbrennungsmotorischen Hybrid-PKW und BZ-PKW derselben Fahrzeugklasse bereits 2025 als realisierbar erachten [75]. Stellt man dies aktuellen Verkaufspreisen für Hybrid-Fahrzeuge wie z.B. den Toyota-Modellen *Prius Hybrid* oder *RAV4 Hybrid* gegenüber [76], so wären Preise im Bereich von 30.000 bis 40.000 Euro für BZ-PKW zu erwarten. Hinsichtlich der Anforderungen an die Lebenserwartungen von BZ gilt, dass diese bei den heute kommerziell verfügbaren PKW problemlos erreicht werden.

5.2 Der Markthochlauf von BZ-PKW: Akteure, Produkte, Perspektiven

Brennstoffzellen-PKW werden seit einigen Jahren primär von asiatischen Automobilunternehmen zum Kauf oder Leasing angeboten. Den Anfang machte der südkoreanische Hersteller *Hyundai* und brachte Ende 2013 sein Brennstoffzellen-SUV *ix35 Fuel Cell* auf den Markt. Die Fahrzeuge wurden zunächst am heimischen Markt und später in Kalifornien sowie Europa vertrieben. Bis Mitte 2017 verkaufte Hyundai weltweit an die 1.000 der SUVs und setzte 500 davon in Europa zum Listenpreis von 65.450 Euro ab [77]. Etwa 200 Fahrzeuge gingen nach Deutschland, von denen 50 bei dem Carsharing-Unternehmen *BeeZero* zwei Jahre lang im Einsatz waren [78]. Mitte 2017 kündigte Hyundai den Verkaufsbeginn und die Produktion von zunächst 3.600 Exemplaren eines technisch deutlich verbesserten Nachfolgemodells an [79]. Der Anfang 2018 vorgestellte *Nexo* wird seit Sommer desselben Jahrs in Deutschland verkauft [80]. Im Jahr 2018 wurden insgesamt 800 Exemplare produziert und für 2019 sind 3.000 geplant. Besonders hervorzuheben sind die ambitionierten Zukunftspläne des Konzerns: Bis

2022 werden die jährlichen Produktionskapazitäten für Stacks auf 40.000 ausgebaut und sollen bis 2030 auf 700.000 gesteigert werden [81].

Nähere Angaben zum technischen Daten und Verkaufspreis des Nexo finden sich in der nachfolgenden Abbildung und basieren überwiegend auf Aussagen des ADAC; wobei Verbrauch und Reichweite nach praxisnahen Verfahren ermittelt wurden.



Abbildung 5.3: Hyundai Nexo [82], [80], [83].

Seit Ende 2014 vertreibt der japanische Automobilkonzern *Toyota* die Brennstoffzellenlimousine *Mirai* mit den umseitig dargestellten, auch in diesem Fall größtenteils auf Angaben des ADAC beruhenden, Eigenschaften. Die meisten der Fahrzeuge wurden bislang in Japan und Kalifornien, sowie - in deutlich geringeren Stückzahlen - in Europa, verkauft bzw. verleast. Seit 2016 sind die Fahrzeuge in Deutschland verfügbar [84]. Viele der Autos sind, gefördert durch die Bundesregierung, beim Ridesharing-Dienstleister *CleverShuttle* im Einsatz [85]. Im Jahr 2017 fuhr Toyota die Produktion von 2.000 auf 3.000 Mirai pro Jahr hinauf und setzte bis Oktober 2019 weltweit 10.000 BZ-Fahrzeuge ab [80], [86]. Die Markteinführung einer zweiten Modellgeneration des Mirai ist für 2020 mit einem in den Folgejahren auf 30.000 Exemplare auszubauenden jährlichen Produktionsvolumen geplant [84]. Das optisch gefälligere Nachfolgemodell wurde im Oktober 2019 vorgestellt und weist eine um 30 Prozent höhere Reichweite als der ursprüngliche Mirai auf [86]. Für 2025 hat Toyota den Beginn eines weiter deutlich verstärkten Engagements angekündigt und betont die großen, mit der Massenfertigung verbundenen Kostensenkungspotenziale [74].

	<ul style="list-style-type: none"> • 700 bar H₂-Tanks • Verbrauch 1,0 kg/H₂ auf 100 km • Leistung BZ 114 kW • Leistung E-Motor 114 kW • Höchstgeschwindigkeit 178 km/h • Reichweite 480 km • Kaufpreis 78.600 €
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 5.4: Toyota Mirai [87], [69], [83].

Auch der japanische Automobilhersteller *Honda* treibt die Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen voran und nahm im Frühjahr 2016 die Serienproduktion des *Clarity Fuel Cell* auf. Die Limousine verfügt über 700 bar H₂-Tanktechnologie, eine BZ mit 103 kW Leistung und einen E-Motor mit 130 kW Leistung, sowie einer nominalen Reichweite vom 600 km [88] (welche jedoch nicht mit den oben angegebenen und nach einem anderen Verfahren ermittelten Reichweiten verglichen werden kann). Das Fahrzeug ist nur in Japan und Kalifornien kommerziell verfügbar. Allerdings wurden einige Exemplare nach Europa ausgeliefert und in verschiedenen Demonstrationsprojekten zum Einsatz gebracht [89]. Ein Nachfolgemodell wurde für die frühen 2020er Jahre angekündigt und soll deutlich preisgünstiger und in größeren Stückzahlen vertrieben werden [90].

Daimler entwickelt und erprobt seit Jahrzehnten Brennstoffzellen-PKW und galt lange als technologischer Vorreiter. Im Jahr 2017 kündigte das Unternehmen einen neuen BZ-Kompaktwagen auf Basis des *GLC* an. Frühzeitig wurde bekannt, dass das Fahrzeug im Gegensatz zu anderen BZ-Autos über eine relativ große Lithium-Ionen-Batterie samt *Plug-In-Modul* verfügen und so rein batterieelektrische Fahrten von bis zu 50 km ermöglichen soll [91]. Der als *Vorseerienmodell* bezeichnete und oben abgebildete *Mercedes-Benz GLC F-CELL* wurde im September 2017 offiziell vorgestellt [92]. Das Fahrzeug verfügt über 700 bar H₂-Tanks, eine BZ unbekannter Leistung und einen 160-kW-E-Motor. Die nominale Reichweite wird mit über 400 km im Brennstoffzellenbetrieb plus 50 km im Batteriebetrieb und der H₂-Verbrauch mit etwa 1,0 kg auf 100 km angegeben [93] (wobei diese Angaben wiederum nicht mit den obigen und vom ADAC ermittelten Werten vergleichbar sind). Eigenen Angaben vom April 2018 zufolge bereitet sich Daimler „konsequent auf die Produktion des Mercedes-Benz GLC F-CELL vor“ [94], erwartet aber frühestens ab 2025 eine signifikante Rolle von BZ-Fahrzeugen. Einzelheiten zum Produktionsumfang und Absatzplanungen wurden zunächst nicht bekanntgegeben. Seit Ende 2018 werden ausgewählten Kunden GLC F-CELL-Fahrzeuge zur monatlichen Leasingrate von 799 Euro zur Verfügung gestellt. Einer Pressesprecherin zufolge werden die gesamten Produktionszahlen aber auf jeden Fall im dreistelligen Bereich bleiben [95].

Neben den Kommerzialisierungsaktivitäten einzelner Hersteller ist auch ein aggregiertes Bild insbesondere zur Anzahl der weltweit zugelassenen BZ-Fahrzeuge von Interesse. Aufgrund der nur punktuellen Verfügbarkeit und teilweisen Widersprüchlichkeit entsprechender Angaben ist allerdings nur eine grobe und mit Unsicherheiten behaftete Abschätzung möglich. Betrachtet man die offiziellen Verkaufszahlen der Hyundai-Modelle *ix35 Fuel Cell* und *Nexo*, sowie die des Toyota Mirai, so müssten bis Ende 2019 etwa 4.800 bzw. mindestens 10.000 Autos vertrieben werden.

Dazu kommen weitere Fahrzeuge von Honda und in dieser Studie nicht näher behandelten chinesischen Herstellern, sowie von Daimler und anderen Unternehmen, deren kumulierte Anzahl hier grob mit 3.000 Exemplaren abgeschätzt wird. Damit sollte der weltweite Fahrzeugbestand aktuell bei 15.000 bis 18.000 BZ-PKW liegen.

5.3 Die zunehmende Bedeutung von Brennstoffzellenbussen

Neben PKW sind auch Busse – und insbesondere Nahverkehrsbusse – ein wichtiges Anwendungsfeld von BZ-Technologien. Zwar liegen BZ-PKW hinsichtlich der weltweiten Zulassungszahlen weit vorne, aber BZ-Busse gelten aus verschiedenen Gründen als besonders attraktiver Eintrittsmarkt: Zunächst ist von Vorteil, dass der Aufbau einer Betankungsinfrastruktur wesentlich einfacher als bei PKW ist, da prinzipiell nur eine Tankstelle für die Wasserstoffversorgung einer kleineren Busflotte genügt. Vor allem aber müssen insbesondere Großstädte strengen immissionsrechtlichen Auflagen genügen und die Verkehrsunternehmen daher verstärkt Niedrig- und Nullemissionsfahrzeuge nutzen. In Deutschland und weltweit setzen Städte auf alternative Antriebe und haben sich als Treiber der Kommerzialisierung von BZ-Bussen etabliert. Die Busse haben einen den Anforderungen früher Kommerzialisierung genügenden technischen Reifegrad erlangt und profitieren von politischer Unterstützung und sinkenden Kosten.

Bei den Bussen kommen sowohl brennstoffzellendominante Antriebe wie auch Range-Extender-Systeme zum Einsatz. Ein typischer BZ-dominanter 12-Meter-Solobus verfügt über eine BZ von 100 kW Leistung, einen 350-bar Drucktank mit 40 kg H₂, sowie eine Batterie von 30 kWh Speichervermögen. Ein Range-Extender-Bus weist eine BZ von lediglich 30 kW und einen Tank mit nur 15 kg H₂, aber eine potente Batterie von 250 kWh Speicherkapazität auf. Während der H₂-Verbrauch BZ-dominanter Busse relativ konstant zwischen 8,5 und 10,5 kg H₂ pro 100 km liegt, ergeben sich bei Range-Extender-Fahrzeugen je nach Umlauflänge und Fahrzeugkonfiguration deutlich variierende Verbräuche an H₂ und über Ladestationen bezogenem Strom [96]. Für BZ-dominante Busse werden Reichweiten von 300 bis 450 Kilometer und Betankungszeiten von unter 10 Minuten angegeben [66]. Aufgrund der stark variierenden H₂- und Stromverbräuche lassen sich für Range-Extender-Busse keine allgemeingültigen Reichweitemaussagen treffen. Im Vergleich zu reinen Batteriebussen ist jedoch für beide BZ-Konzepte ein Zugewinn an Reichweite und eine größere Unempfindlichkeit gegenüber witterungsbedingten Reichweitenverlusten festzustellen, da einerseits durch den mitgeführten H₂ mehr Energie zur Verfügung steht und andererseits die Abwärme der BZ zur Fahrzeugklimatisierung genutzt werden kann. Die umseitige Darstellung illustriert den Aufbau eines BZ-Busses am Beispiel des Modells A330FC des belgischen Busherstellers *Van Hool*.

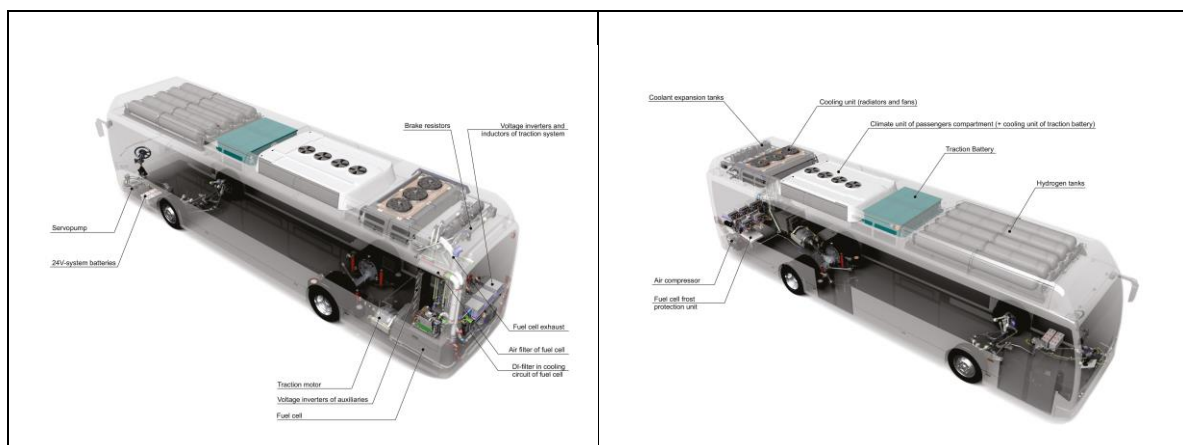


Abbildung 5.5: Aufbau des Van Hool Brennstoffzellenbusses A330FC [97].

Während sich Van Hool in den letzten Jahren als in Europa besonders aktiver Hersteller hervortat [98] und große Aufträge für die Lieferung von BZ-Bussen für die Städte Köln und Wuppertal gewann (s.u.), boten bzw. bieten auch zahlreiche weitere Unternehmen in der EU, Nordamerika und Asien BZ-Busse an. Beispielsweise entwickelten *APTS*, *Broad Ocean*, *EvoBus*, *Hyundai*, *New Flyer*, *Solaris*, *Toyota*, *VDL* und *Wrightbus* entsprechende Fahrzeuge und erprobten diese in großskaligen Demonstrationsprojekten wie dem EU-Vorhaben CHIC [5], [99] und diversen anderen internationalen Projekten.

Die für Köln und Wuppertal vorgesehenen 12-Meter-Busse vom Typ *Van Hool A330* bieten eine Reichweite von 350 km und sind das derzeit wichtigste am deutschen Markt verfügbare BZ-Busmodell. Allerdings bieten neben Van Hool in Europa derzeit nur wenige Hersteller BZ-Busse an. Beispielsweise kündigte das polnisch-spanische Unternehmen Solaris ein neues 12-Meter-Modell mit einer Reichweite von mehr als 350 Kilometern an [100]. Daimler gab die Fortführung der Aktivitäten bei BZ-Bussen bekannt: Der aktuelle Batteriebus *eCitaro* soll weiterentwickelt und um einen BZ-Range-Extender erweitert werden, der die Reichweite des Basisfahrzeugs deutlich auf 400 Kilometer erhöht. Der Bus soll zwischen 2020 und 2022 in Stuttgart erprobt werden [101]. Obwohl neben den beispielhaft genannten Firmen auch weitere Hersteller BZ-Busse veräußern, ist unter dem Strich in Europa doch ein unzulängliches Angebot an BZ-Bussen zu beklagen, was den in einer EU-Studie ermittelten Nachfragepotenzialen von mehr als 1.500 Bussen entgegensteht [102] und teilweise offenlässt, welche Fahrzeuge in den unten skizzierten Beschaffungsprojekten zum Einsatz kommen können.

Im Gegensatz zu Europa engagieren sich asiatische Hersteller stark im Bereich von BZ-Bussen. So vertreibt Toyota seit 2018 ein neues BZ-Busmodell kommerziell in Japan und beabsichtigt, 2020 über 100 Exemplare in Tokyo zum Einsatz zu bringen. Über den portugiesischen Bushersteller *CaetanoBus* soll die BZ-Technologie künftig auch in Europa verfügbar sein. China steigt in großem Ausmaß in die Fertigung von BZ-Bussen ein und auch koreanische Hersteller wie Hyundai kommerzialisieren BZ-Busse [100].

Wurden die Aktivitäten der Bushersteller international bislang überwiegend in Demonstrationsprojekten gebündelt, so stehen die Zeichen heute klar auf Kommerzialisierung [66], [102], [103]. Die umseitige Abbildung gibt einen Überblick zu wichtigen seitens der EU geförderten Projekten. Während die älteren Projekte der Technologieentwicklung dienen, unterstützen die neuen Vorhaben die Markteinführung von BZ-Bussen durch Bezuschussung der Anschaffung technisch relativ reifer, aber wirtschaftlich noch nicht wettbewerbsfähiger Produkte.

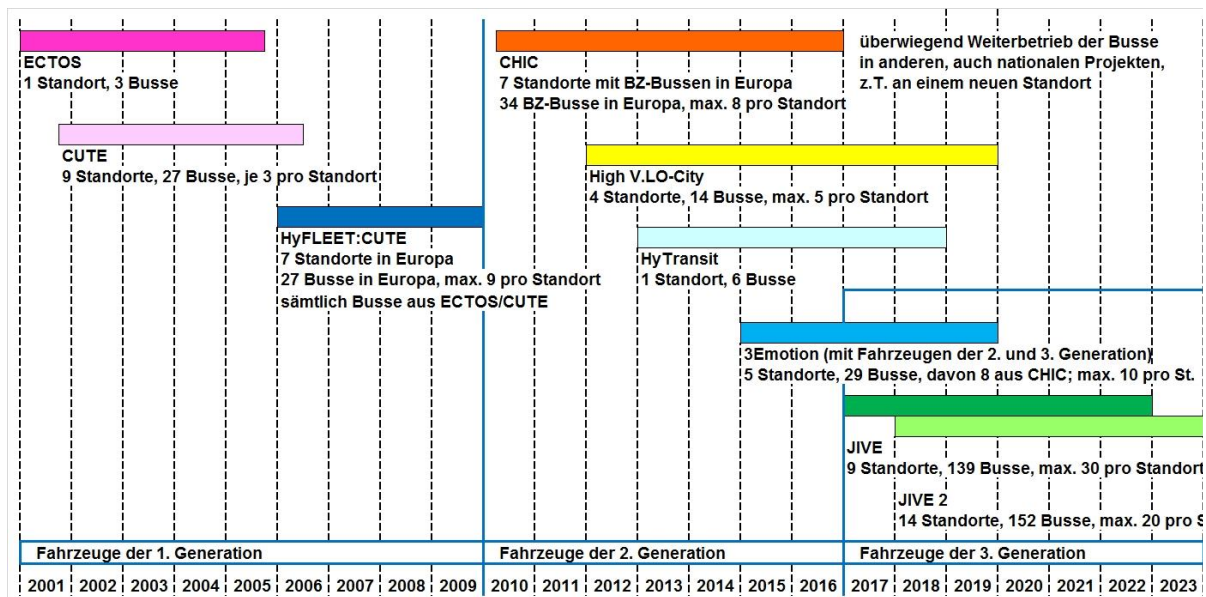


Abbildung 5.6: Übersicht Busprojekte mit EU-Förderung [104].

Die aktuell wichtigsten Projekte zur Förderung der breiteren Markteinführung von BZ-Bussen auf EU-Ebene sind Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe und das parallellaufende Vorhaben JIVE 2. Bis zum Jahr 2023 sollen beide Projekte zusammen knapp 300 Busse in 22 deutschen, französischen, britischen, niederländischen und norwegischen Städten zum Einsatz bringen. Der Aufbau von Betankungsinfrastruktur wird primär in dem flankierenden Vorhaben Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure (MEHRLIN) realisiert [27]. Im Rahmen eines weiteren EU-Vorhabens, dem im Förderprogramm Connecting Europe Facility angesiedelten H2BusEurope, sollen ab dem Jahr 2020 etwa 600 BZ-Busse nebst der erforderlichen Infrastruktur in Betrieb genommen werden [100]. Bis 2023 sollen jeweils 200 Busse in Dänemark, Lettland und Großbritannien eingesetzt werden [105]. Die genannten Projekte bauen auf den Anfang 2018 etwa 60 in der EU betriebenen Bussen und dazugehörigen Betankungsanlagen auf [102] und erhöhen die Gesamtzahl der Fahrzeuge auf etwa 1.000. Wie hier nochmals angemerkt, ist die zukünftige Beteiligung des Vereinigten Königreichs bei der Umsetzung der obigen Planungen derzeit nicht absehbar.

In den JIVE-Projekten wird die Anschaffung von BZ-Bussen bei vorgegebenen technologischen Zielsetzungen und maximal zulässigen Kosten subventioniert. Die Verfügbarkeit der Busse soll über 90 Prozent und die Stack-Lebensdauer mindestens 20.000 Stunden erreichen. Ein 12-Meter-Bus darf höchstens 650.000 Euro kosten und wird von der EU mit etwa 200.000 Euro bezuschusst. Zudem können nationale Fördermittel in Anspruch genommen werden. Im Falle des deutschen NIP wurden im Rahmen eines Förderaufrufs 160.000 Euro zur Reduzierung des Kostendeltas von 250.000 Euro gegenüber Dieselbussen angeboten und führten zu Anschaffungskosten von 290.000 Euro (ungefähre Werte) [106]. Die im EU-Programm H2BusEurope zu beschaffenden Busse sollen nach Abzug der Förderung weniger als 375.000 Euro kosten [105].

In Deutschland werden ambitionierte Projekte zum früh-kommerziellen Einsatz von BZ-Bussen derzeit v.a. in drei Regionen verfolgt: In Köln und Umgebung werden schon seit 2011 mehrere BZ-Busse samt Infrastruktur betrieben. In einem aktuellen Vorhaben werden weitere 30 Busse beschafft und die Infrastruktur wird ausgebaut [107]. In Wuppertal sollen zunächst 10 BZ-Busse in Betrieb gehen und zum Aufbau eine Flotte von 45 BZ-Fahrzeugen, flankiert von der nötigen H₂-Bereitstellungsinfrastruktur, bis 2021 beitragen [100]. In Frankfurt und Umgebung werden 8 gebrauchte BZ-Busse im Werksbusverkehr und ÖPNV betrieben [108]. Alle Projekte profitieren in unterschiedlicher Konstellation durch Förderung der EU und des NIP.

Jenseits von Fördermaßnahmen der öffentlichen Hand tragen v.a. die durch technologische Fortschritte und Skaleneffekte erzielten Kostensenkungen zur fortschreitenden Annäherung an die Wettbewerbsfähigkeit bei. So stellt eine Studie fest, dass die Kosten für BZ-Stacks seit Aufbau der ersten BZ-Busse sehr stark gefallen sind und geht von Kostensenkungspotenzialen ähnlich der Entwicklungen im oben beschriebenen PKW-Bereich aus [66]. Auch die Preise für BZ-Busse insgesamt sind stark gesunken und werden laut verschiedenen Quellen voraussichtlich deutlich vor 2030 auf 400.000 Euro fallen [66], [109]. Unternehmen wie Ballard und Solaris stellen schon seit einiger Zeit Beschaffungskosten von 450.000 Euro für 12-Meter-Busse bei Chargen von mindestens 100 Fahrzeugen in Aussicht [110].

Ohnehin werden bei Kostenbetrachtungen auf Basis von *Total Costs of Ownership* (TCO) wesentlich günstigere Wettbewerbsbedingungen als bei reiner Betrachtung von Fahrzeug-Anschaffungskosten ermittelt: Bis 2030 geht eine Studie für BZ-Busse nur noch von einem TCO-Kostennachteil von 11 Prozent im Vergleich zu Dieselnissen aus und legt dabei ein konservatives Szenario unter Nutzung von Technologieoptimierungen und Skaleneffekten zugrunde [66]. Eine andere Studie ermittelt demgegenüber TCO-Kostennachteile von BZ- vs. Dieselfahrzeugen von 30 Prozent [73]. Ein wesentlicher Grund für diese Diskrepanz liegt in der unterschiedlichen Methodik und den zugrunde gelegten Betrachtungszeiträumen: Während die erstgenannte Studie TCO zum Zeitpunkt 2030 ausweist und bis dahin erwartete Kostenreduzierungen berücksichtigt, fokussiert die letztgenannte Analyse auf den Zeitraum 2018 bis 2030 und legt zumindest teilweise die heutigen und weit höheren Kosten zugrunde.

5.4 Brennstoffzellen-Lastkraftwagen als Zukunftstechnologie

Neben BZ-Bussen sind BZ-basierte LKW verschiedener Gewichtsklassen seit wenigen Jahren als wichtige Zukunftsoptionen eines nachhaltigen Straßengüterverkehrs in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Wesentliche Treiber hierfür sind die neuen, oben skizzierten CO₂-Flottengrenzwerte für LKW und die zunehmenden Einfahrrestriktionen für Dieselfahrzeuge in urbanen Räumen. Zudem bestehen gegenüber rein batterieelektrischen Fahrzeugen insbesondere bei BZ-dominanten Antriebssystemen deutliche Vorteile hinsichtlich höherer Reichweiten und kürzerer Betankungszeiten. Da letztere Faktoren zentrale Voraussetzungen einer operativ und wirtschaftlich tragbaren Güterbeförderung zumindest jenseits des Nahverkehrs sind, gelten leichte und schwere BZ-LKW als vielversprechende Technologieoptionen [61].

Während leichte Fahrzeuge bereits heute bei TRL 7 liegen [67], stellen verschiedene Technologiebewertungen eine geringere Reife schwerer LKW fest [1], [70], [71]. Eine aktuelle EU-Projektausschreibung zum Thema schwerer BZ-LKW geht jedoch davon aus, dass bis etwa 2024 eine Technologiereife von TRL 8, vergleichbar dem heutigen Stand von BZ-Bussen, erreicht werden kann. Der Einsatz verschiedener Tanksysteme (z.B. 350/700 bar Druck-H₂ und Flüssig-H₂) sowie Reichweiten von 400 bis 1.000 Kilometern werden angestrebt [111]. Die Nutzung der 700-bar-Technologie auch für LKW ist ein wichtiges Thema. Während 2015 die

Anschaffungskosten eines mittelschweren BZ-LKW-Prototypen von über 12 t Gesamtgewicht etwa 5 mal so hoch waren wie die eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs, soll ein BZ-LKW 2030 nur noch das eineinhalbfache eines Dieselfahrzeugs kosten [112].

Die EU unterstützt die Entwicklung und Kommerzialisierung von BZ-LKW in verschiedenen großskaligen Projekten: So werden z.B. derzeit in *Hydrogen fuel cell trucks for heavy-duty, zero emission logistics* 16 Fahrzeuge mit Gesamtgewichten von 26 bis 44 Tonnen aufgebaut und in Belgien, Frankreich, Deutschland, sowie der Schweiz erprobt [113].

Der Entwicklungs- bzw. Kommerzialisierungsstand BZ-basierter Lieferfahrzeuge und schwerer LKW lässt sich am besten anhand konkreter Beispiele aufzeigen. Daher werden nachfolgend einige auf europäische Märkte zielende Entwicklungen bzw. Produkte europäischer und asiatischer Hersteller vorgestellt, sowie zwei insbesondere für die USA relevante Fahrzeugentwicklungen skizziert. Dabei vermitteln die Beispiele keineswegs ein vollständiges Bild: international sind zahlreiche weitere einschlägige Aktivitäten zu verzeichnen.

Der deutsche Elektrofahrzeugbauer *StreetScooter* gab Ende 2017 bekannt, auf Basis seines batteriebetriebenen *Work L* ein Lieferfahrzeug mit BZ-Range-Extender mit der konkreten Perspektive einer zeitnahen Kommerzialisierung zu entwickeln. Wie der Geschäftsführer auf einer Konferenz erläuterte, sollte ab Mitte 2018 bei der *Deutschen Post* ein zweijähriger Testbetrieb mit zahlreichen Fahrzeugen beginnen. Die Höchstgeschwindigkeit wurde mit 120 Stundenkilometern und die Reichweite mit 500 bis 700 km angegeben. Laut Geschäftsführer sind für StreetScooter rein batterieelektrische Lieferfahrzeuge nur für Reichweiten bis zu 200 km sinnvoll. Für größere Fahrzeuge mit höheren Reichweitenanforderungen seien BZ-Range-Extender die beste Option. Bei erfolgreicher Erprobung sollten in den Folgejahren 5.000 bis 10.000 Lieferwagen hergestellt und weitere Entwicklungen von LKW bis zu 7,5 Tonnen vorangetrieben werden [114]. Gemäß einer auf der der Konferenz bekanntgegeben Absichtserklärung sollte die Betankung der mit 700-bar-Drucktanks ausgestatteten Fahrzeuge durch 15 Tankstellen der Infrastrukturinitiative *H₂ Mobility* ermöglicht werden [115].

Den ambitionierten Ankündigungen ließ StreetScooter Taten folgen: Im Juli 2018 wurde eine Entwicklungspartnerschaft zwischen StreetScooter und dem Energieverteilnetzbetreiber *Westnetz* bekanntgegeben, die den Erwerb von 300 Fahrzeugen durch Westnetz bis 2022 beinhaltet: „Die 300 StreetScooter werden nach den speziellen Anforderungen des Netzbetreibers hergestellt und modifiziert: 70 Kilowatt Leistung, eine Höchstgeschwindigkeit von 120 Stundenkilometern und der zusätzliche Einsatz von Brennstoffzellen und Wasserstoff sind vorgesehen. Damit möchte man die Reichweite erhöhen und die Fahrzeuge so auf die Anforderungen des Netzbetriebs in ländlichen Regionen anpassen“ [116]. Im Mai 2019 wurde eine Kooperation ähnlicher Art zwischen StreetScooter und der Firma *DHL Express* verkündet: Die Unternehmen arbeiten bei der Entwicklung des neuen Elektrotransporters *H₂ Panel Van* zusammen. Laut StreetScooter handelt es sich um den ersten serienmäßigen 4,25 Tonnen-Elektrotransporter, „dessen Antrieb während der Fahrt von einer Brennstoffzelle mit zusätzlicher Energie versorgt wird und dadurch Reichweiten von bis zu 500 Kilometern erzielen kann.“ Der *H₂ Panel Van* basiert auf Pakettransporter StreetScooter *WORK XL* und wird in Zusammenarbeit mit dem Autobauer *Ford* realisiert. DHL Express bestellte in einem ersten Schritt 100 der BZ-Fahrzeuge, deren Auslieferung in 2020 starten und 2021 abgeschlossen sein soll. Die Kooperation wird im Rahmen des NIP II finanziell gefördert [117].

Mit der als *HYKangoo* vermarkteten Umrüstung eines kleinen batterieelektrischen Lieferwagens verfolgt der französische BZ-Hersteller *Symbio FCell* einen ähnlichen Ansatz. Symbio FCell hat sich auf die Herstellung und Integration von BZ-Umrüstsätzen für kleinere Batterieautos spezialisiert und davon bislang mehrere Hundert Exemplare vertrieben [118]. Die meisten Umrüstungen wurden bislang am Basismodell *Kangoo Z.E.* von Renault vorgenommen, dass eine reale Reichweite von maximal 160 km erzielt. Durch den, aus einem 350-bar-Wasserstoffdruckbehälter gespeisten, 5-kW-Range-Extender erhöht sich die Reichweite auf rund 300 km [119]. Der Range Extender schaltet sich ein, sobald der Ladestatus der Traktionsbatterie ein vorgegebenes Mindestmaß unterschreitet und lädt diese wieder auf. Die Technologie wird stetig weiterentwickelt und ist mittlerweile auch mit einer leistungsstärkeren BZ verfügbar. In Deutschland werden die Symbio-FCell-Produkte durch die Firma *Anleg* vertrieben.


Neben den beschriebenen bereits heute am Markt verfügbaren oder in Produktionsplanung befindlichen Fahrzeuge sind zwei Entwicklungsaktivitäten großer Automobilhersteller hervorzuheben: Im Juli 2018 präsentierte Daimler einen *Concept Sprinter F-CELL Sprinter* als Konzeptfahrzeug mit Elektroantrieb und Brennstoffzelle. Wie der oben vorgestellte GLC F-CELL ist auch der neue Technologieträger als Plug-in-Hybrid konzipiert. Die Antriebsleistung wird mit 147 kW und die Reichweite mit rund 300 Kilometern angegeben. Während der Hersteller die „hohe Reichweite, geringes Systemgewicht bei maximaler Gestaltungsfreiheit und schnelle Betankung“ als Vorzüge betont, ist scheinbar keine Serienfertigung des Fahrzeugs geplant [101]. Im September 2018 stellte Volkswagen prominent die Konzeptstudie des *e-Crafters Hy-Motion* vor, der als Batteriefahrzeug mit BZ-Range-Extender die Modellpalette rein batterieelektrischer Fahrzeuge ergänzen könnte. Der 4,25 Tonnen-Transporter soll über eine Reichweite von bis zu 500 km verfügen. Gegenüber der Presse erklärte VW, der Transporter sei insbesondere für die Kunden vorgesehen, die längere Reichweiten, mehr Zuladung sowie kürzere Tankstopps bevorzugen und auch im Winter die volle Leistungsfähigkeit benötigen. Noch handele es sich um eine Studie, aber das technische Konzept sei bereits seriennah [120].

Im Zuge der Markteinführung schwerer BZ-LKW in Europa stellt die Entwicklung und Erprobung eines - unten abgebildeten - 18-Tonnners der schweizer Firma *H₂ Energy* eine wichtige Wegmarke dar. Als Basis dient ein Kühl-LKW der Firma *MAN*, der als Sonderzulassung ein Gewicht von 19 Tonnen erreicht und trotz der zusätzlichen Masse des BZ-Antriebsstrangs eine hohe Nutzlast bietet. Zugleich ist das Fahrzeug als Zugmaschine eines 16-Tonnen Anhängers ausgelegt und kann mithin als Gespann ein Gewicht von 35 Tonnen bewegen. Der LKW integriert einen BZ-Stack des schwedischen Herstellers *PowerCell* in ein 100-kW-System, dass neben der Antriebsleistung auch Energie für das Kühlsystem und andere Verbraucher liefert. Der Antriebsstrang umfasst Lithium-Ionen-Batterien, Aggregate zur Bremsenergieerückgewinnung und ein Automatikgetriebe. Während der Erprobung wurden Steigungen von 30 Prozent und Reichweiten von 400 Kilometern realisiert [121].


Der LKW wurde im Rahmen eines weiter gefassten Projekts aufgebaut, das auch die Produktion und Abgabe von EE-Wasserstoff an einer Wasserstofftankstelle und den Einsatz einiger BZ-PKW beinhaltet. Nutzungsanforderungen wurden bei den technischen Grundentscheidungen maßgeblich berücksichtigt und mit potenziellen Kunden abgestimmt. Nach Einschätzung des Herstellers sind reine Batterieantriebe für schwere LKW mit hohen Reichweitenanforderungen schon deshalb ungeeignet, weil aufgrund des hohen Batteriegewichts nur eine sehr geringe Nutzlast verbleibt. Demgegenüber seien die Nutzlasteinschränkungen bei BZ-LKW nur unwesentlich und werde so ein höherer Kundennutzen erreicht.

Die Erprobung des Fahrzeugs erfolgt in der regulären Logistik des großen Handelsunternehmens COOP, das auch die H₂-Tankstelle betreibt. COOP ist bestrebt, innerhalb weniger Jahre CO₂-Neutralität zu erreichen und sieht BZ-LKW als wichtigen Teil der Nachhaltigkeitsstrategie. Schon die frühe Erprobung ergab laut H₂ Energy, dass BZ-LKW Dieselfahrzeuge ohne Einschränkung, z.B. bezüglich Nutzlast, Reichweite und Betankungszeit, ersetzen könnten [122].

Weltneuheit: Coop 34t LKW mit Anhänger
Vollständiger Dieselerersatz für die Coop LKW Flotte



Brennstoffzellen-System
100kW, unterflur links



H2-Tankstutzen
350 bar HighFlow
Links hinter Fahrerhaus

Chassis
MAN TGS

H2-Tanksystem
7 x 4.93 = 34.5 kgH₂ brutto →
Nutzkapazität von 31 kgH₂

Elektromotor
Synchron Motor 250KW Dauer,
Allison 4 Gangautomat

Batterie
Total 120kWh (2x60 kWh), links
und rechts vor Hinterachse

Aufbau
Ladepkapazität von 30
Ladungsträger (normal 33)

Ladedose
Links unten, 2 x 22kW
Ladeleistung, Anschluss: 63A,
400VAC, Nur am Wochenende

Kühlaggregat
Unterflur, rechts
Elektrische Versorgung der
Anhängerkühlung vorgesehen

Page 181

Abbildung 5.7: Aufbau Prototyp Brennstoffzellen-LKW der Firma H₂ Energy AG [122].

Das Projekt läuft bis heute und stellt die Keimzelle weiterer Aktivitäten dar: So betreibt H₂ Energy zusammen mit diversen Partnern den Aufbau eines flächendeckenden H₂-Tankstellennetzes samt großskaliger H₂-Produktionsanlagen auf Basis der Wasserelektrolyse. Insbesondere arbeitet H₂ Energy mit Hyundai zusammen und unterstützt die Entwicklung von serienproduzierten H₂-Nutzfahrzeugen [123].

Im September 2018 unterzeichneten beide Unternehmen eine Absichtserklärung, der zufolge in einem Zeitraum von fünf Jahren, zwischen 2019 und 2023, eintausend schwere BZ-Nutzfahrzeuge von Hyundai in die Schweiz eingeführt und dort ausschließlich auf Basis von EE-H₂ betrieben werden sollen [124]. Zu diesem Anlass wurden die in Abbildung 5.8 wiedergegebenen technischen Eckdaten eines in Entwicklung befindlichen LKW vorgestellt, welcher zwei der auch im PKW Nexa genutzten Brennstoffzellen integriert. Im April 2019 wurde dann die Gründung des Joint Venture *Hyundai Hydrogen Mobility* bekanntgegeben. Hyundai kündigte an, das Gemeinschaftsunternehmen zwischen Ende 2019 und 2025 mit der deutlich erhöhten Anzahl von 1.600 schweren BZ-Nutzfahrzeugen zu beliefern [125].

Die Fahrzeuge sollen primär einem mit dem Joint Venture verbundenen Unternehmenskreis zur Verfügung gestellt werden, der sich für Aufbau der H₂-Mobilität und der erforderlichen Tankstelleninfrastruktur engagiert. Bis Ende 2020 sollen 50 LKW in der Schweiz eintreffen und die Lieferungen ab 2021 deutlich ausgeweitet werden. Neben dem unten skizzierten Fahrzeug werden auch noch schwerere LKW mit Gespanngewichten um die 40 Tonnen entwickelt [126]. Der Flottenaufbau wird durch den bereits laufenden Ausbau eines Tankstellennetzes zur Abgabe von EE-H₂ flankiert [127]. Während die Schweiz als Pilotmarkt fungiert, ist die baldige Ausweitung der Geschäftsaktivitäten auf andere europäische Länder und die USA geplant.



Abbildung 5.8: Hyundai Truck [128], [124].

Das amerikanische Start-Up-Unternehmen *Nikola Motor Company* erregt seit mehreren Jahren mit der Bekanntgabe ambitionierter Pläne und konkreter Umsetzungsschritte zur Kommerzialisierung von BZ-LKW Aufsehen. Ende 2016 wurde ein Sattelschlepper der 40-Tonnen-Gewichtsklasse als Konzeptstudie *Nikola One* vorgestellt, die über Lithium-Ionen-Batterien und eine Brennstoffzelle als zentrale Elemente des elektrischen Antriebsstrangs verfügt [129]. Parallel zur weiteren Entwicklung und Erprobung des Nikola One wurde das technisch sehr ähnliche, aber nicht mit einer Schlafkabine ausgestattete, Modell *Nikola Two* aufgebaut. Nikola One wird in Abbildung 5.9 zusammen mit den technischen Daten beider Modelle vorgestellt. Im September 2017 wurde eine wichtige Entwicklungspartnerschaft zwischen Nikola und dem deutschen Automobilzulieferer *Bosch* bekannt. Neben einer E-Achse steuert Bosch auch Knowhow zur Auslegung des BZ-Systems und der gesamten Fahrzeugelektrik bei [130]. Wenig später wurde die schwedische Firma *PowerCell* als Lieferant der BZ und der amerikanische Fahrzeugbauer *Fitzgerald Gliders* als Partner für die Herstellung der ersten 5.000 BZ-LKW benannt [131]. Im Mai 2018 bestellte die Brauereikette *Anheuser-Busch* 800 LKW bei Nikola, welche ab 2020 zum Einsatz kommen sollen [132]. Im November 2018 kündigte Nikola dann das eigens für Europa entwickelte LKW-Modell *Nikola Tre* an, dessen Erprobung 2020 in Norwegen beginnen soll [133]. Technisch interessant ist die Tatsache, dass Nikola zusammen mit anderen Firmen Optionen zur 700-bar-Betankung der schweren BZ-LKW erprobt [134]. Parallel zu den fahrzeugseitigen Aktivitäten engagiert sich Nikola auch intensiv im Bereich der H₂-Infrastruktur und strebt den Aufbau von 700 großskaligen LKW-Tankstellen bis 2028 an [135].



- Gesamtgewicht 40 t
- Betankungszeit H₂ 10 - 15 Minuten
- Antriebsleistung 750 kW
- Reichweite 1.200 km

Abbildung 5.9: Nikola One. Technische Daten für Nikola One und Nikola Two [135].

Auch Toyota erprobt in den USA verschiedene Prototypen eines schweren Brennstoffzellen-LKW, für die Toyota den BZ-Antriebsstrang in Basisfahrzeuge des LKW-Herstellers *Kenworth* integriert. Bereits seit 2017 werden im Bereich der kalifornischen Seehäfen von Long Beach und Los Angeles mehrere, mit zwei auch im Mirai eingesetzten Brennstoffzellen ausgestattete, Fahrzeuge getestet. Seit Ende 2019 werden 10 Exemplare eines weiterentwickelten BZ-LKW mit einer Reichweite von 480 Kilometern erprobt. Die gegenwärtig aus drei LKW-Tankstellen bestehende Infrastruktur wird um zwei H₂-Stationen erweitert [136].



- Gesamtgewicht etwa 40 t
- Reichweite 480 km

Abbildung 5.10: Toyota Truck [136].

5.5 Akzeptanz gegenüber BZ-Fahrzeugen und Wasserstoffinfrastruktur

Die Akzeptanz gegenüber BZ-Fahrzeugen und H₂-Infrastruktur ist ein wesentlicher den Markthochlauf der H₂-Mobilität beeinflussender Faktor: finden Fahrzeuge und Infrastruktur keine Akzeptanz, ist mit Kaufzurückhaltung bzw. Ablehnung von H₂-Tankstellen und ähnlichen Infrastrukturelementen zu rechnen. Daher wurden von den in Deutschland und der EU für die Förderung von H₂- und BZ-Technologien zuständigen Programmorganisationen eine kleine Anzahl von Akzeptanzuntersuchungen beauftragt.

Die in Deutschland zentralen Projekte sind *HyTrust* [137] und *HyTrustPlus* [138] und wurden 2013 bzw. 2016 abgeschlossen. Die übergreifenden Aussagen verschiedener Berichte werden nachfolgend skizziert. Zunächst unterscheiden die Projekte zwischen *Einstellungsakzeptanz*, die im vorliegenden Falle einer Grundeinstellung gegenüber H₂-basierter Mobilität gleichkommt, und *Handlungsakzeptanz*, die eine Grundeinstellung in eine handlungsleitende Haltung überführt. Handlungsakzeptanz begünstigt konkrete Schritte aktiver Technologieaneignung, wie den Kauf von BZ-Fahrzeugen, sowie passive Akzeptanz z.B. gegenüber potential problematischen H₂-Tankstellen und ähnlichen Infrastrukturelementen.

Wie HyTrust und HyTrustPlus feststellen, ist die Einstellungsakzeptanz der Allgemeinheit gegenüber H₂- und BZ-Technologien insgesamt hoch: Insbesondere werden die Umweltvorteile hinsichtlich Emissionsreduzierungen und der Einbringung erneuerbarer Energien geschätzt; negative Einschätzungen z.B. hinsichtlich der Sicherheit bestehen kaum. Damit liegt eine grundsätzliche positive Einstellung bzw. Offenheit gegenüber den Technologien vor, die allerdings noch nicht mit einer handlungsleitenden Akzeptanz gleichzusetzen ist.

Wie die Projekte weiter ermittelten, ist die Handlungsakzeptanz, welche eine prinzipielle Befürwortung der Technologien in konkrete Schritte der Anschaffung und Nutzung übersetzt gering: Nur wenige Privatkunden sind bereit, die Umweltvorteile ‚grüner‘ H₂-Mobilität mit nennenswerten Mehrkosten beim Fahrzeugkauf zu honorieren oder Nachteile wie z.B. mangelnde Verfügbarkeit von H₂-Tankstellen zu akzeptieren. Bei gewerblichen Betreibern von Fahrzeugflotten, die alle Entscheidungen anhand ‚harter‘ und insbesondere wirtschaftlicher Argumente rechtfertigen müssen, tendiert die Aufpreisbereitschaft sogar gegen Null. Andererseits ist bei beiden Gruppen eine Handlungsakzeptanz gegenüber H₂-Tankstellen insofern gegeben, dass auch seitens von Anwohnern kaum Vorbehalte bestehen.

Wie HyTrust und HyTrustPlus resümieren, sind die Kenntnisse der Öffentlichkeit und Entscheidungsträger zu Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien im Allgemeinen eher gering. Zur Stärkung der Akzeptanz werden verstärkte Aktivitäten im Bereich Wissensvermittlung und Öffentlichkeitsarbeit empfohlen.

In dem 2017 abgeschlossenen EU-Projekt HYACINTH wurde die Akzeptanz gegenüber BZ-Fahrzeugen und H₂-Infrastruktur in sieben europäischen Ländern, einschließlich von Deutschland untersucht. Die Ergebnisse bestätigten, dass Wasserstofftechnologien von europäischen Bürgern und Experten positiv wahrgenommen werden, in der Bevölkerung aber noch wenig bekannt sind. Für Deutschland sind eine überdurchschnittlich ausgeprägte Akzeptanz und ein vergleichsweise hoher Kenntnisstand festzustellen. Sofern Kosten und Leistungsmerkmale der H₂-Mobilität mit konventioneller Mobilität vergleichbar wären, würden über 60 Prozent der befragten EU-Bürger ein BZ-Fahrzeug kaufen. Angesichts höherer Anschaffungskosten und eines noch ungenügenden Tankstellenangebots würden aktuell aber nur wenige Befragte eine zeitnahe Anschaffung ernsthaft in Erwägung ziehen. Angesichts des geringen Wissensstands zur H₂-Mobilität werden Maßnahmen der Wissensstärkung empfohlen [139].

Eine im Rahmen des von der deutschen Bundesregierung geförderten *Kopernikus-Projektes P2X* durchgeführte Untersuchung erforscht speziell die Akzeptanz von Anwohnern gegenüber Wasserstofftankstellen. Zwei Fokusgruppendifkussionen mit Anwohnern in Berlin ergaben Ende 2018, dass H₂-Tankstellen kaum auf Akzeptanzvorbehalte stoßen. Eher wird eine größere Sichtbarkeit der überwiegend positiv wahrgenommenen H₂-Technologien gewünscht [140]. Eine Anfrage bei H₂ Mobility zu den bisherigen Erfahrungen beim Aufbau des Tankstellennetzes bestätigte diesen Befund: Laut Auskunft der Pressesprecherin traten nur in einem Fall geringfügige und leicht zu behebbende Akzeptanzprobleme auf [141].

5.6 Treibhausgasemissionen und Lebenszyklusbewertungen

Wie bereits verschiedentlich angesprochen, weisen Brennstoffzellenfahrzeuge einige prinzipielle ökologische Vorteile auf [48]. Entsprechend den Anforderungen des unter 4.2 diskutierten Energiekonzepts ermöglichen sie die Nutzung erneuerbarer Energien als Kraftstoff, wandeln diesen mit hoher Effizienz in Bewegungsenergie um und reduzieren so maßgeblich den Ausstoß von Treibhausgasen [8]. Vergleichbar einem Batteriefahrzeug entstehen beim Fahren keinerlei THG- oder Schadstoffemissionen und nahezu keine Antriebsgeräusche. Damit können BZ-Fahrzeuge gerade in Städten einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen und zur Erfüllung gesetzlicher Vorgaben zur Luftqualität leisten.

Für die Ermittlung während des Fahrbetriebs anfallender Emissionen sind laut herrschender europäischer Gesetzgebung lediglich *Tank-to-Wheel*-Emissionen (TtW-Emissionen) relevant, die nur die direkt im Fahrzeug entstehenden Abgase berücksichtigen. Somit gelten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge als Null-Emissionsfahrzeuge, da bei der Herstellung von Strom bzw. H₂ anfallende Emissionen nicht angerechnet werden. Wesentlich aussagekräftiger hinsichtlich des tatsächlichen Umweltverhaltens sind *Well-to-Wheel*-Emissions- und Energiebilanzen (WtW-Bilanzen), die zusätzlich die während der Produktion, Verteilung und Abgabe von Kraftstoffen entstehenden Emissionen und Energieverbräuche berücksichtigen. Die nachfolgende, von Daimler [142] auf Basis von international anerkannten Quellen [143] erstellte Graphik vergleicht WtW-Treibhausgasemissionen und -Energieverbräuche elektrisch, fossil und mit Biokraftstoffen betriebener PKW.

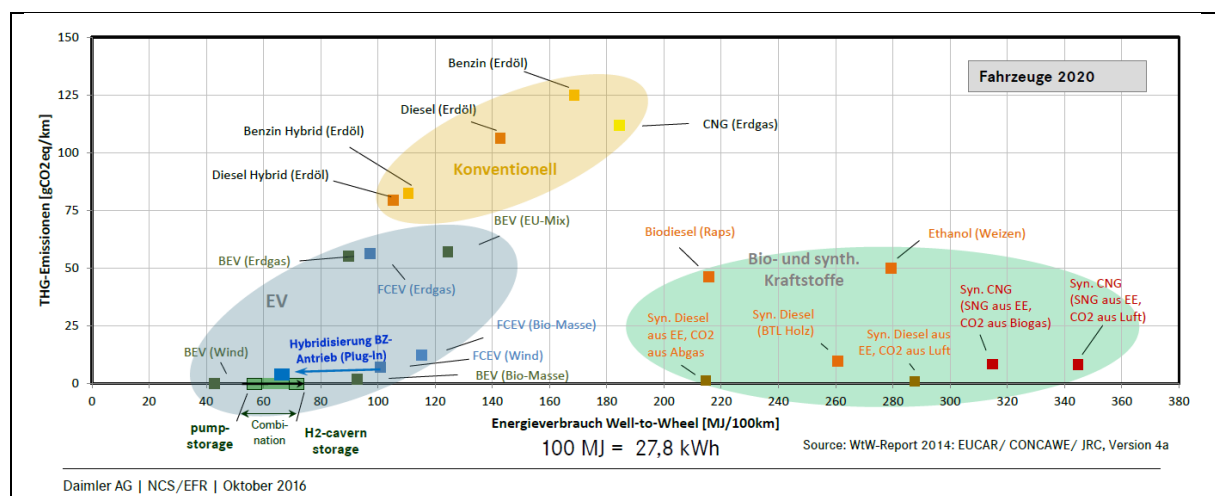


Abbildung 5.11: Well-to-Wheel Vergleich der Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche verschiedener PKW [142].

Es zeigt sich, dass die links unten dargestellten WtW-Treibhausgasemissionen von brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Elektroautos wesentlich geringer als die oben aufgezeigten Emissionen mit fossilen Treibstoffen betriebener Verbrennerfahrzeuge sind. Die rechts unten angesiedelten Biokraftstoffpfade zeichnen sich durch ähnlich niedrige WtW-Emissionen wie Elektroautos aus, gehen aber mit einem durch die aufwändigeren Kraftstoffgestehungspfade und die geringeren Wirkungsgrade der eingesetzten Verbrennungsmotoren bedingten höheren Energiebedarf einher. BZ- und batteriebetriebene Elektroautos punkten mit einer deutlich höheren Energieeffizienz. Aufgrund der Kombination niedriger Emissionen und hoher Effizienz

können Elektroautos als besonders umweltfreundlich gelten. Nichtsdestotrotz könnten Biokraftstoffe in großen Mengen für den Verkehr zur Verfügung gestellt werden und einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten [144].

Die Detailbetrachtung der Elektrofahrzeuge ergibt, dass Brennstoffzellen- wie auch Batteriefahrzeuge insbesondere beim Einsatz erneuerbarer Energien extrem niedrige THG-Emissionen aufweisen, wobei Batterieautos noch geringere Emissionen als BZ-PKW verursachen. Bei Nutzung fossiler Energien verschlechtern sich die Emissionsbilanzen. Dies bedingt, dass der Einsatz von kohlenstoffarm oder -frei hergestelltem Strom bzw. H₂ eine unabdingbare Voraussetzung für weitreichende Verminderungen von THG-Emissionen ist. Aktuell wird H₂ für den Verkehr nur teilweise auf EE-Basis hergestellt und oftmals aus Erdgas reformierter oder Nebenprodukt-H₂ genutzt. Demgegenüber unterstützt die Bundesregierung nachdrücklich die Verwendung von EE-Kraftstoffen im Bereich der Elektro- bzw. H₂-Mobilität und verlangte z.B. in der Clean Energy Partnership den Einsatz von mindestens 50 Prozent regenerativen H₂ [8]. Überdies verpflichten die unter 4.1 referierten EU-Regularien die Industrie zum Einsatz von EE-Kraftstoffen und erkennen sowohl EE-Strom wie auch EE-H₂ als anrechnungsfähige Kraftstoffe an. Daher ist davon ausgehen, dass zukünftig die Anteile erneuerbarer oder CO₂-armer Kraftstoffe wesentlich steigen und somit klimafreundliche WtW-Pfade realisiert werden.

Allerdings bilden selbst WtW-Analysen lediglich einen Teil der mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Fahrzeugen verbundenen Umweltbelastungen ab [73], da nur der Kraftstoffpfad von der Quelle bis zum Rad zusammen mit der Energiewandlung im Fahrzeug betrachtet wird und die Produktion sowie die Wiederverwertung der Fahrzeuge unberücksichtigt bleibt. Da beispielsweise die bei WtW-Bewertungen bestens abschneidenden Batterieautos erhebliche mit der Herstellung und dem Recycling der Batterien verbundene Umweltbelastungen verursachen, sind für eine annähernd vollständige Erfassung aller relevanten Umweltwirkungen weiterreichende Ansätze erforderlich.

Daher werden zunehmend Lebenszyklusanalysen durchgeführt, die alle oben angesprochenen Parameter berücksichtigen [96] und hier zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der H₂-Mobilität herangezogen werden. Allerdings gibt es nur wenige Lebenszyklusanalysen zu BZ-Fahrzeugen, die überdies hinsichtlich der betrachteten Fahrzeuge, zugrundeliegenden Annahmen und Datensätze zumeist deutlich voneinander abweichen und deren Ergebnisse nicht in ein konsistentes Gesamtbild überführt werden können [145]. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend exemplarisch eine Lebenszyklusanalyse und eine erweiterte WtW-Analyse zur ganzheitlichen Bewertung des Umweltverhaltens von BZ-PKW und Bussen referiert.

Eine unlängst erschienene Studie des *Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE* analysiert den Treibhausgasausstoß von Brennstoffzellen- und Batterie-PKW über den gesamten Lebenszyklus und vergleicht die Ergebnisse mit den Werten für Dieselfahrzeuge [146]. Betrachtet werden insbesondere die bei Herstellung, Betrieb sowie Entsorgung von Batterie- und BZ-Fahrzeugen mit 95-kW-Brennstoffzelle, bzw. 60-kWh- oder 90-kWh-Batterie, anfallenden THG-Emissionen. Die Herstellungs- und Entsorgungsprozesse werden anhand von Komponenten einschließlich der Brennstoffzelle, H₂-Drucktanks und einer Pufferbatterie bei BZ-PKW, bzw. Batterien des genannten Speichervermögens bei Batterieautos untersucht; die Betriebsphasen werden anhand von drei H₂-Bereitstellungspfaden und zwei Strom-Bereitstellungspfaden mit unterschiedlichen Anteilen erneuerbarer und fossiler Energien analysiert. Auf dieser Basis werden die THG-Emissionen für Fahrzeug-Laufleistungen von 0 bis 200.000 km für die Zeiträume 2020 bis 2030 sowie 2030 bis 2040 ermittelt [147].

Die Lebenszyklusanalyse ergibt, dass bei geringen Reichweitenanforderungen von bis zu 250 km Batteriefahrzeuge, welche mit kleineren Batterien von bis zu 50 kWh Speicherkapazität ausgestattet sind, eine günstigere THG-Bilanz aufweisen als die untersuchten und leistungsstärkeren BZ-Fahrzeuge. Der THG-Fußabdruck von Produktion und Recycling eines BZ-Autos entspricht etwa dem eines Batteriefahrzeugs mit höchstens 50 kWh Speicherkapazität. Bei Batterie-PKW mit höheren Reichweitenanforderungen und dementsprechend größeren Batterien hingegen entstehen höhere THG-Emissionen als bei vergleichbaren BZ-Fahrzeugen. Neben der Herstellung und Entsorgung ist die Betriebsphase der Fahrzeuge entscheidend: insbesondere die THG-Intensität der Kraftstoff-Bereitstellungspfade bestimmt die THG-Bilanz wesentlich. Auch die Laufleistungen und die zwischen den beiden betrachteten Zeiträumen unterschiedlichen technischen Rahmenbedingungen sind relevant [146], [147].

Die nachfolgende Abbildung stellt die THG-Emissionen des untersuchten PKW mit einer 95-kW-Brennstoffzelle denen eines Fahrzeugs mit 90 kWh Batteriekapazität, sowie eines vergleichbaren Diesel-PKW entgegen. Alle Autos erzielen Reichweiten von über 300 Kilometer und absolvieren eine Laufleistung von 150.000 km im Zeitraum 2020 bis 2030. Abhängig vom zugrunde gelegten Kraftstoff-Bereitstellungspfad kann ein BZ-Fahrzeug niedrigere THG-Emissionen als ein Batterieauto erzielen und ist in jedem Fall nachhaltiger als ein mit konventionellem Diesel betriebener PKW. Die hohen mit der Batterieherstellung verbundenen THG-Emissionen können nur teilweise durch die höhere Antriebseffizienz des Batterieautos kompensiert werden. Die hier beispielhaft aufgezeigten Ergebnisse lassen sich mit weitgehend auch auf Batteriefahrzeuge mit 60 kWh Speicherkapazität übertragen [147]. Somit erweisen sich BZ-Fahrzeuge auch in einer Lebenszyklusanalyse als besonders nachhaltige Antriebsoption.

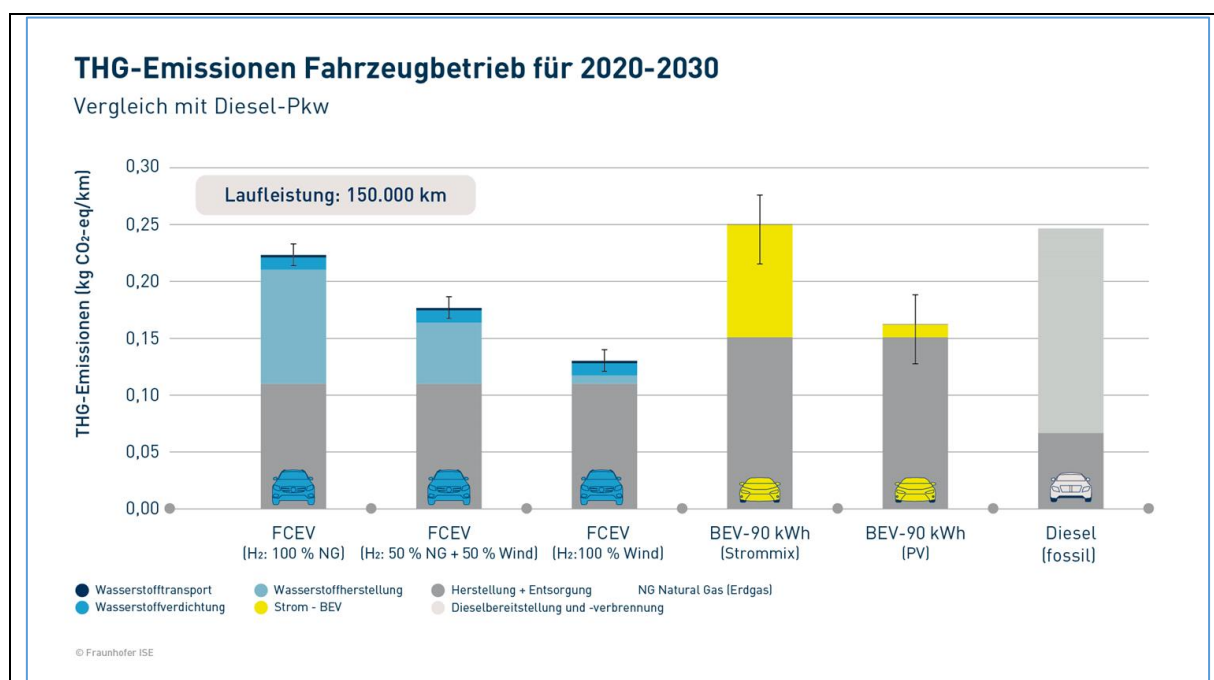


Abbildung 5.12: Lebenszyklusvergleich von Brennstoffzellen-, Batterie- und Diesel-PKW 2020 bis 2030 bei einer Laufleistung von 150.000 km [148].

Ein um den DVGW aufgestelltes Forschungskonsortium untersucht den Beitrag, welche Gasbusse für den öffentlichen Personennahverkehr zur Erfüllung klimapolitischer Zielsetzungen leisten können [73]. Die aktuelle Studie bewertet mit Erd- und Biogas, sowie synthetischem auf EE-Basis hergestellten Methan betriebene Busse im Vergleich zu Alternativkonzepten einschließlich von Brennstoffzellen- und Batteriebusen.

Dazu wird eine Well-to-Wheel-Analyse der verschiedenen Fahrzeuge für ein festgelegtes Linienbetriebsmuster mit einem Busbetrieb von 2019 bis 2030 und einer jährlichen Fahrleistung von 62.100 km pro Bus durchgeführt und punktuell erweitert: Nur bei Brennstoffzellen- und Batteriebussen werden auch die THG-Emissionen der Herstellung der zentralen Antriebs- bzw. Speicherkomponenten Batterie- und BZ berücksichtigt. Die nachfolgende Abbildung gibt die zentralen Ergebnisse wieder.

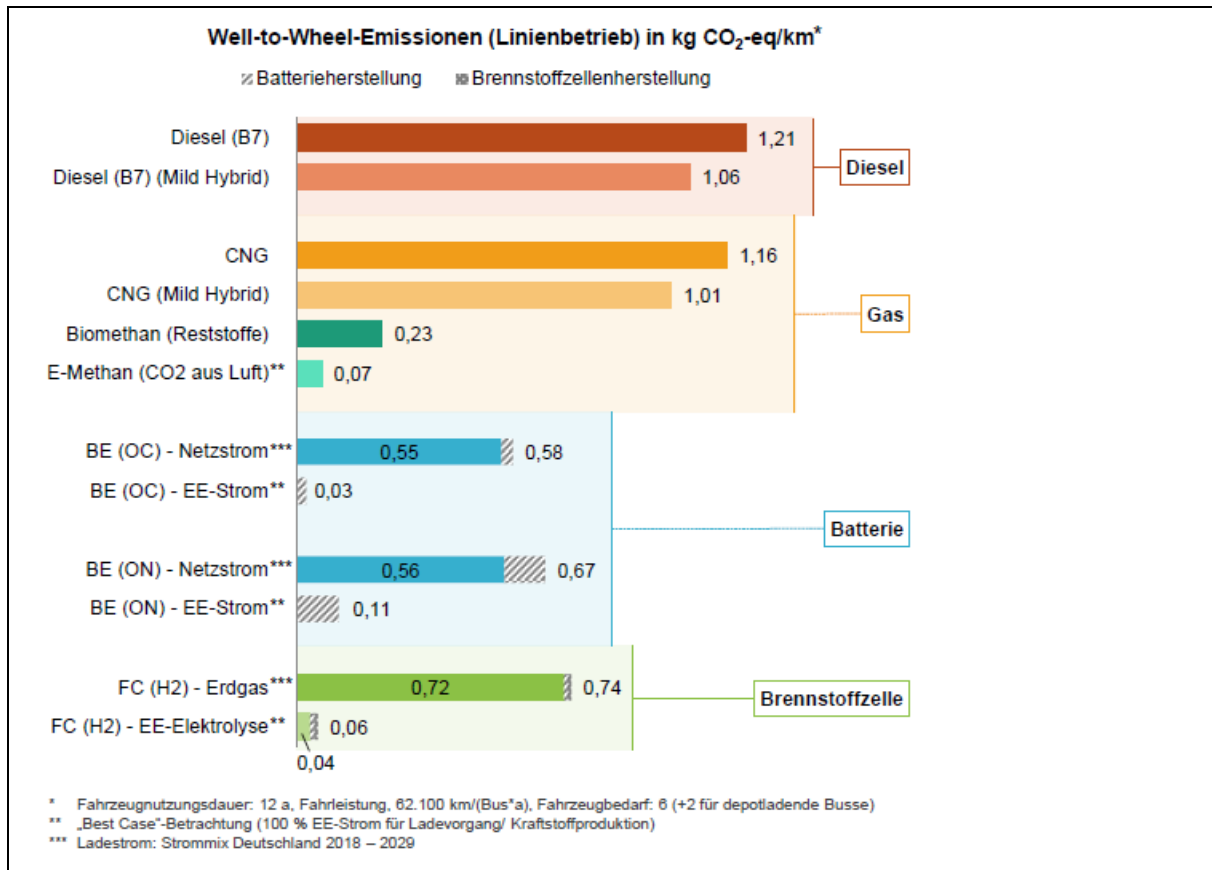


Abbildung 5.13: Ergebnisse erweiterter WtW-Analyse verschiedener Antriebskonzepte für Busse für den Personennahverkehr [73].

Wie die Darstellung zeigt, lassen sich durch den Einsatz von Biogas (Biomethan) und auf EE-Basis hergestellten synthetischem Methan (E-Methan) in Gasbussen erhebliche THG-Minderungen gegenüber Dieselfahrzeugen erzielen, nicht aber bei Umsetzung von fossilem Erdgas. Bei Nutzung von Netzstrom wie im zugrunde gelegten Einsatzzeitraum in Deutschland verfügbar, erzielen Batteriebusse sowohl mit Gelegenheits- (OC) wie auch Übernachtladung (ON) eine deutlich schlechtere WtW-Bilanz als EE-gasbetriebene Fahrzeuge, bei Einsatz von EE-Strom jedoch eine tendenziell bessere. Auch BZ-Busse können mit aus Erdgas hergestelltem Kraft- bzw. Wasserstoff in Klimahinsicht wenig punkten, erreichen aber mit EE-H₂ sehr weitreichende THG-Reduzierungen. Bei allen untersuchten Antriebsoptionen spielt der Einsatz erneuerbarer Energien die letztendlich über THG- Bilanzen entscheidende Rolle.

5.7 Wasserstoff und Brennstoffzellen im Schienenbereich

Neben schweren Nutzfahrzeugen gilt insbesondere der Schienenbereich als ein technisch und wirtschaftlich attraktives Anwendungsfeld für BZ-Antriebe. Weltweit ist ein erheblicher Anteil des Schienennetzes nicht elektrifiziert; in Deutschland sind es aktuell mehr als 40 Prozent. Ein Oberleitungsbau wäre kostenintensiv und auf Strecken geringer Auslastung nicht wirtschaftlich. Demgegenüber stellt eine Studie zum Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland bereits 2016 fest, dass BZ-betriebene Regionalzüge Dieselzüge ohne operationelle Einschränkungen ersetzen können, da diese die Anforderungen hinsichtlich Antriebsleistung und Reichweite erfüllen. Vor allem fallen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen positiv aus: Obwohl die Anschaffung von BZ-Zügen deutlich teurer ist als die von Dieselfahrzeugen, entsteht aufgrund niedrigerer laufender Kosten und bei Anrechnung von Subventionen für BZ-Züge ein Kostenvorteil von bis zu 23 Prozent [149]. Eine im Mai 2019 vorgestellte EU-Studie untersucht über Triebwagen hinaus auch BZ-basierte Rangier- und Universallokomotiven. Trotz methodischer Unterschiede bekräftigt sie die Erkenntnisse der vorausgegangenen Studie und ermittelt in einem optimistischen Szenario bereits für 2022 TCO-Kostenvorteile von bis zu 10 Prozent für BZ-Triebwagen und Rangierlokomotiven. Selbst in einem pessimistischen Szenario werden für 2030 Marktanteile von gemittelt 11 Prozent für alle untersuchten Arten von Schienenfahrzeugen erwartet, während im Standardszenario mit Anteilen von 20 und im optimistischen Szenario von sogar 41 Prozent gerechnet wird [150].

Dementsprechend laufen weltweit Demonstrationsprojekte zu BZ-Schienenfahrzeugen und läuft die Kommerzialisierung bereits an. So entwickelte der französische Schienenfahrzeugbauer *Alstom* eine neue Generation von Triebzügen mit BZ-Antrieb für den kommerziellen Einsatz zunächst in Deutschland. Der *Coradia iLint* wurde im Rahmen eines durch das NIP geförderten Projekts aufgebaut und ist mit zwei BZ-Systemen ausgestattet. Er kann bis zu 1.000 Kilometer mit einer Tankfüllung H₂ zurücklegen und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 Stundenkilometern. Im September 2017 bestellte das Bundesland Niedersachsen 14 Coradia-iLint-Züge für ein Verkehrsunternehmen und übernahm auch einen Großteil der Kosten von 85 Millionen Euro. Die Kaufverträge schließen eine 30-jährige Instandhaltung und Energieversorgung der für den regulären Bahnbetrieb vorgesehenen Züge ein. Zwei Prototypen nahmen im September 2018 den Pilotbetrieb zwischen Cuxhaven und Buxtehude auf und werden seither mit positiven Ergebnissen erprobt. Eine vom Gaseunternehmen Linde errichtete Tankstelle gibt täglich, insgesamt zuverlässig, bis zu 1.600 kg H₂ mit 350 bar an die beiden Züge ab. Die Kosten von etwa 10 Millionen Euro werden teils durch das NIP übernommen. Der reguläre Bahnbetrieb soll 2021 beginnen und auch die verbleibenden 12 Triebzüge einbeziehen; der zunächst ‚graue‘ Industriewasserstoff soll später durch elektrolytisch hergestellten EE-H₂ ersetzt werden [151]. Überdies wurde im Mai 2019 ein weiterer Markterfolg des Coradia iLint bekannt: Ab 2022 werden 27 der BZ-Züge alte Dieseltriebwagen auf vier Regionalzuglinien im Taunus ersetzen. Das Vorhaben beinhaltet auch die Versorgung mit Wasserstoff, die Instandhaltung und das Vorhalten von Reservekapazitäten für die nächsten 25 Jahre. Die Beschaffung der Züge wird vom NIP 2 mit knapp 15 Millionen Euro und der Bau einer H₂-Tankstelle mit gut 9,5 Millionen Euro gefördert [152].

Auch *Siemens Mobility* entwickelt in Zusammenarbeit mit Ballard einen Zug mit einem modularen Brennstoffzellen-Batterie-Traktionssystem, welcher über eine 200-kW-BZ verfügen und eine Höchstgeschwindigkeit von 160 Stundenkilometern erreichen soll [153]. Der Triebzug *Mireo Plus H* ist entweder als 2-Teiler mit 120 Sitzplätzen und einer Reichweite von bis zu 600 Kilometern, oder als 3-Teiler mit 160 Sitzplätzen und einer Reichweite von bis zu 1.000 Kilometern ausgelegt. Interessant ist der Vergleich zum mit Stromabnehmer und Batterie ausgestatteten Pendant *Mireo Plus B*, dass auf nicht elektrifizierten Strecken im Batteriebetrieb Reichweiten von höchstens 80 Kilometern bei einem 2-teiligem Zug bzw. maximal 120 Kilometern bei einem 3-teiligem Zug erzielt. Genaue Angaben zu technischen Details und Verkaufsbeginn der BZ-Triebzüge wurden noch nicht kommuniziert [154].

6 Vertiefende Betrachtung der H₂-Infrastruktur

Dieses Kapitel leistet eine vertiefende Betrachtung von Wasserstoffinfrastrukturen zur Versorgung der H₂-Mobilität. Aus Sicht der Infrastrukturbetreiber sind neben den Tankstellen die Herstellung und ggf. der Transport von H₂ zu den Betankungsanlagen relevant. Für private und gewerbliche Nutzer von BZ-Fahrzeugen ist nur eine ausreichende Tankstellenverfügbarkeit von unmittelbarem Belang. Dabei sind die Anforderungen verschiedener Kundengruppen sehr unterschiedlich: Während für PKW-Fahrer ein dichtes und flächendeckendes Tankstellennetz von Bedeutung ist, sind für oftmals an Routen gebundene Nutzfahrzeugeinsätze nur eine geringere Anzahl strategisch positionierter Betankungsanlagen erforderlich.

6.1 Klimafreundliche Verfahren der Wasserstoffproduktion

Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren auf Grundlage fossiler wie auch erneuerbarer Energien produziert werden. Bislang wird der bei Weitem größte Teil des weltweit genutzten H₂ auf Basis fossiler Energien hergestellt und in industriellen Prozessen eingesetzt [67]. Im noch jungen Technologiebereich der H₂-Mobilität zeigt sich jedoch ein anderes Bild: Hier wird der Einsatz von Wasserstoff als nachhaltige Antwort auf drängende Umweltprobleme gesehen und zunehmend auf kohlenstoffarme bzw. erneuerbare Ausgangsenergien bei der H₂-Produktion gesetzt. Wie unter 4.1 dargelegt, forcieren EU-Regularien wie die Renewable Energy Directive und die Fuel Quality Directive den Einsatz CO₂-armer bzw. -freier Kraftstoffe. Während die Vorschriften insgesamt neben EE-H₂ auch anderweitig hergestellten CO₂-armen H₂ als besonders klimafreundlich und politisch förderwürdig akzeptieren, befürwortet die deutsche Politik klar EE-Wasserstoff und macht oftmals den Einsatz von EE zur Bedingung für die Bewilligung national geförderter Projektvorhaben.

Für eine kohlenstofffreie bzw. -arme Wasserstoffherstellung sind insbesondere zwei Verfahren relevant: Die Wasserelektrolyse auf Basis von EE-Strom und die Dampfreformierung von Erd- oder Biogas. Die Elektrolyse ist bislang von geringer kommerzieller Bedeutung und ihr Anteil an der weltweiten H₂-Produktion ist marginal. Allerdings gilt sie als *die* Zukunftstechnologie nachhaltiger H₂-Herstellung und das strategische Interesse einschlägiger Akteure ist groß. Demgegenüber dominiert die Dampfreformierung die etablierten Produktionsverfahren und ist die in Deutschland und Europa mit Abstand bedeutsamste Technologie [155]. Auch die H₂-Produktion mittels Biomassevergasung sowie die Nutzung industriellen Nebenproduktwasserstoffs gelten als umweltschonende Bereitstellungsoptionen.

Die Wasserelektrolyse umfasst drei Unterarten: Die *Alkalische Elektrolyse* (AEL) ist die älteste und in langdauernden Einsätzen bewährte Technologie. Sie ist kostengünstig verfügbar und spielt ihre Vorteile v.a. bei großen Elektrolyseanlagen ab 10 MW Leistung aus. Die *Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse* (PEMEL) etabliert sich seit einigen Jahren als kommerziell einsatzbereite Technologie und erweckt angesichts weiter bestehender erheblicher Entwicklungspotenziale großes Interesse. Vorteilhaft sind ihre ausgeprägte Lastflexibilität und geringe Baugröße, die sie für die Nutzung fluktuierender EE und dezentrale Einsätze z.B. bei H₂-Tankstellen qualifiziert. Die *Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse* (HTEL) befindet sich noch im F&E-Stadium und muss sich erst noch im Praxiseinsatz beweisen. Während dieser Elektrolysetechnologie hinsichtlich Effizienz und Kostenreduzierung besonders große Potenziale zugesprochen werden, ist sie heute kommerziell noch wenig relevant [156].

Allen Elektrolysearten gemein ist die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe elektrischer Energie. Wird EE-Strom für den Betrieb verwendet, verursacht der H₂-Produktionsprozess nahezu keine THG-Emissionen und ist der umweltfreundlichste aller Herstellungspfade. Beim Einsatz in BZ-Fahrzeugen werden daher die niedrigsten WtW-Emissionen erreicht. Bei Nutzung fossilen Stroms verschlechtert sich die Emissionsbilanz jedoch deutlich.

Wie eine aktuelle Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland feststellt, wird angesichts einer erwarteten starken Zunahme des H₂-Bedarfs bis zum Jahr 2050 ein Ausbau an installierter Elektrolysekapazität im zweistelligen Gigawattbereich erwartet [156]. Gemäß der Studie sind AEL- und in vielerlei Hinsicht auch PEMEL-Systeme bereits technisch weit ausgereift. Die AEL-, PEMEL- und HTEL-Technologien weisen jeweils spezifische Vor- und Nachteile auf und werden insgesamt als ähnlich zukunftsfähig erachtet. Die Technologie- und Kostenentwicklung, sowie die Optimierung von Herstellprozessen werden gerade bei AEL und PEMEL vorwiegend durch die Industrie selbst vorangetrieben und erhebliche Kostenreduktionen werden allein aufgrund von Skaleneffekten erwartet. Nur bei der HTEL besteht noch größerer F&E-Bedarf auch zur Verminderung der Kosten. Verschiedene im Rahmen der Studie entwickelte Szenarien bilden für Deutschland einem Ausbaukorridor im Bereich von 137 bis 275 Gigawatt installierter Elektrolysekapazität bis zum Jahr 2050 ab. Die heute vorhandene Herstellerindustrie wäre prinzipiell in der Lage, die antizipierte und stark wachsende Nachfrage nach Elektrolyseuren zu decken. Allerdings müssten zunächst regulative Hindernisse beseitigt und dadurch insbesondere die Strombezugskosten reduziert werden. Ein *Marktaktivierungsprogramm Wasserelektrolyse* wird gefordert und in Kapitel 9 aufgegriffen.

Die Dampfreformierung ist ein ebenso bewährtes wie kostengünstiges Verfahren der Wasserstoffproduktion. Weit überwiegend wird dabei Erdgas in großen, zentralen Anlagen umgesetzt, obgleich auch Biogas genutzt werden kann. Bei sehr hohen Temperaturen und in mehreren Schritten wird das Gas in seine Bestandteile zerlegt und schließlich reiner H₂ extrahiert. Da schon das eingesetzte Erdgas wenig Kohlenstoff enthält, ist die Erdgasreformierung von allen fossilen Pfaden der H₂-Gewinnung derjenige mit der besten Umweltbilanz. Bei Nutzung erdgasbasierten Wasserstoffs in BZ-Fahrzeugen ergeben sich deutliche Emissionsminderungen im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen. Durch den Einsatz von Biogas lässt sich die Umweltbilanz der Dampfreformierung weiter verbessern [157]. Wie bereits angemerkt, spielt heute die Erdgasreformierung eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von H₂ für den Verkehr. Während dieser Kraftstoffpfad lokale Emissionsfreiheit und eine Verminderung von CO₂-Emissionen ermöglicht, kann Klimaneutralität nicht erreicht werden. Aus Sicht des Klimaschutzes ist daher die EE-basierte Wasserelektrolyse das zu bevorzugende Verfahren.

Tendenziell handelt es sich bei Wasserelektrolyseuren um kleinere Anlagen eher geringer Leistung, die besonders für den dezentralen Einsatz gerade an Tankstellen geeignet sind. Allerdings werden zunehmend auch größere Systeme im 2- bis 3-stelligen Megawattbereich realisiert, die der zentralen Versorgung mehrerer Tankstellen oder industrieller Verbraucher dienen [156]. Ein bekanntes Beispiel ist eine im Rahmen des EU-Projekts *REFHYNE* aufgebaute 10-MW-PEM-Elektrolyseanlage, welche die *Shell Rheinland Raffinerie* in Wesseling mit 1.300 Tonnen Wasserstoff pro Jahr versorgen soll und auch H₂ an den Verkehr abgeben kann [158]. Im Gegensatz zu den zentralen und für die H₂-Versorgung auch der Mobilität wichtigen Dampfreformern spielen kleinere Anlagen für den dezentralen Einsatz an Tankstellen zumindest in Europa nahezu keine Rolle [157].

Mit den bewährten Verfahren Wasserelektrolyse auf Basis von EE-Strom und zentraler Dampfreformierung von Erd- oder Biogas können bereits heute große Mengen kohlenstofffreien bzw. -armen Wasserstoffs hergestellt werden. Angesichts der noch geringen Zahl von BZ-Fahrzeugen kann damit die Kraftstoffnachfrage auf absehbare Zeit problemlos gedeckt werden [67].

Die Kosten der H₂-Produktion variieren je nach Herstellungsverfahren, Anlagenauslegung und insbesondere Bezugskosten der umgesetzten Eingangsenergien, sowie weiteren Einflussparametern erheblich und lassen sich keineswegs pauschal quantifizieren. Auf Basis einer Reihe verfügbarer Studien und eigener Analysen ermittelt eine Wasserstoffstudie von Shell die H₂-Erzeugungskosten ausgewählter Verfahren ohne Berücksichtigung nachgelagerter Transport- und Infrastrukturkosten mit Stand 2018 [67]. Die nachfolgende Abbildung fasst die Kostendaten zusammen. Dazu wird ein gewichteter Mittelwert gebildet und die Abweichung zum Minimal- bzw. Maximalwert in den schraffierten Balken dargestellt. Zudem werden die zukünftig bzw. bis zum Jahr 2030 zu erwartenden Kosten angegeben. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Resultaten von Forschungsarbeiten des DVGW [159].

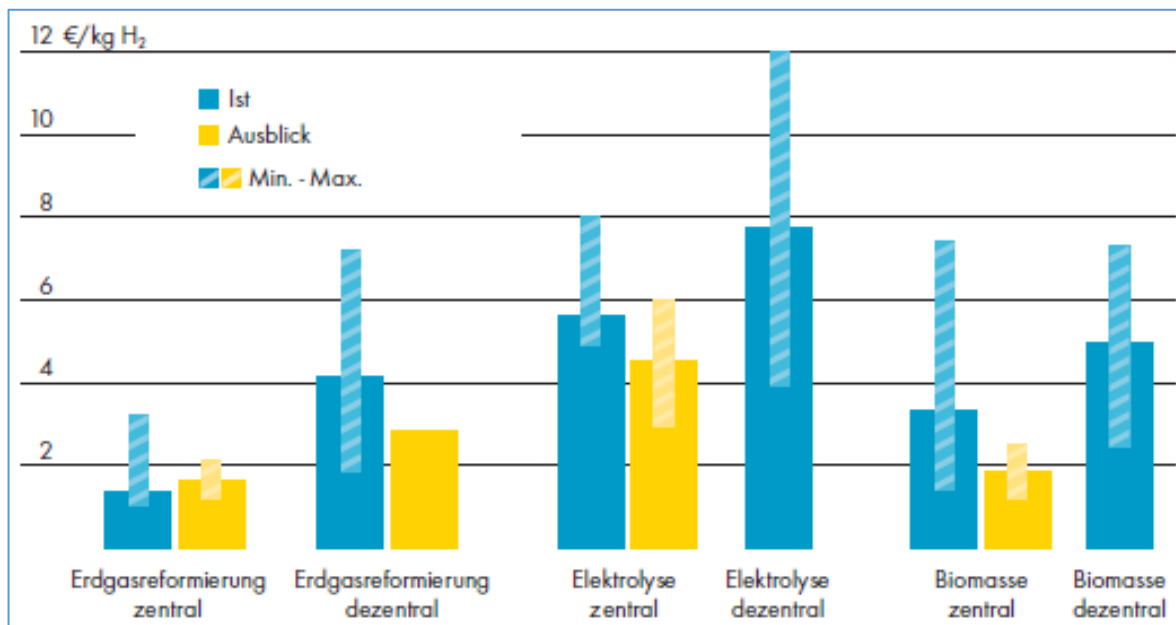


Abbildung 6.1: Wasserstoff-Gestehungskosten (nur Herstellung) [67].

Per Wasserelektrolyse hergestellter Wasserstoff kann heute zu Erzeugungskosten zwischen knapp 6 €/kg in zentralen Anlagen und etwas unter 8 €/kg in dezentralen Systemen bereitgestellt werden. Der Strombezugspreis und die geleisteten Volllaststunden haben den größten Einfluss auf die Gestehungskosten. Zukünftig werden für zentrale Elektrolyseanlagen Kosten von deutlich unter 5 €/kg H₂ erwartet. Bei der zentralen Erdgasreformierung fallen aktuell Erzeugungskosten zwischen ein und zwei Euro pro Kilogramm H₂ an (Mittelwert 1,4 €/kg). Die Gestehungskosten für die zentralen auf Biomasse basierten Pfade liegen mit im Mittel etwa 3,3 €/kg H₂ zwischen denen der Elektrolyse und der Erdgasreformierung.

6.2 H₂-Transport mit Trailern und Pipelines

Wird Wasserstoff für die Mobilität und andere Anwendungen dezentral hergestellt, erfolgt die Nutzung vor Ort und ein weiterer Transport entfällt. Bei zentraler Produktion hingegen ist ein Transport erforderlich, bei dem H₂ entweder in speziellen LKW oder in Pipelines zum Verbrauchsort befördert wird. Kleinere Mengen werden gewöhnlich als komprimiertes Gas in den *Trailer* genannten LKW transportiert, sofern die zu bewältigende Entfernung nicht allzu groß ist. Bei mittleren Mengen und längeren Wegstrecken wird der Wasserstoff verflüssigt und mit größerer Energiedichte in einem entsprechend ausgelegten Trailer befördert. H₂-Pipelines unterschiedlicher Länge sind besonders für den Transport großer Mengen geeignet und werden vorwiegend für industrielle Anwendungen genutzt [157]. Perspektivisch könnten H₂-Pipeline-netze auch ausgebaut werden und dem Transport von H₂ für den Verkehrssektor dienen. Seit mehreren Jahren werden überdies flüssige H₂-Träger, bekannt als *Liquid Organic Hydrogen Carriers*, als mobile oder stationäre H₂-Speicher erprobt. Die Praxistauglichkeit dieser Stoffe im Kontext der H₂-Mobilität muss sich aber erst noch erweisen [67].

Für die Erdgasindustrie sind auch die Einspeisung von EE-Wasserstoff ins Erdgasnetz, die Herstellung von synthetischem Erdgas mittels Methanisierung von EE-H₂ und EE-Kohlenstoffdioxid, sowie die Umwidmung bestehender Erdgasnetze zu H₂-Pipelines relevant. Da zum Betrieb von BZ-Fahrzeugen hochreiner H₂ erforderlich ist, müsste zuvor eingespeister H₂ zur Nutzbarmachung wieder abgetrennt und aufbereitet werden. Synthetisches Erdgas kann mittels konventioneller Dampfreformierung in hochreinen H₂ überführt werden. Bei beiden Verfahren muss aber mit hohem technologischem Aufwand und energetischen Umwandlungsverlusten gerechnet werden [160] [161]. Die Umwidmung bestehender Erdgaspipelines bzw. Teilen des Erdgasnetzes bietet sich für den Transport von H₂ an und erfordert keine den vorherigen Optionen vergleichbaren gasseitigen Anlagenaufwände. Die hier skizzierten Sachverhalte wurden bereits in diversen Forschungsarbeiten des DVGW untersucht [162] sowie in Demonstrationsprojekten erprobt [10] und werden daher nicht vertiefend diskutiert. Beispielhaft seien aber F&E-Projekte zu Abtrennungsverfahren für H₂ erwähnt, die zukünftig an kombinierten H₂- und Erdgastankstellen zum Einsatz kommen könnten.

Bislang erfolgt die Versorgung von Wasserstofftankstellen nahezu ausschließlich per Trailer oder per Wasserelektrolyse vor Ort. Die nachfolgende Abbildung stellt die wichtigsten Trailer-Konzepte zum Transport gasförmigen und flüssigen Wasserstoffs dar.

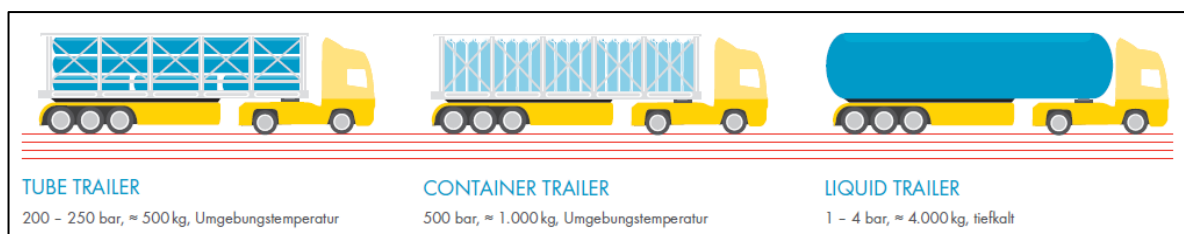


Abbildung 6.2: Gegenüberstellung verschiedener Trailer-Konzepte zum Straßentransport von gasförmigen und flüssigen Wasserstoff [67].

6.3 Wasserstofftankstellen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge

Wie eingangs angesprochen, ist für die Nutzer von PKW ein möglichst dichtes und zugleich flächendeckendes Tankstellennetz von großer Bedeutung. Wie bereits in Kapitel 3 notiert, werden daher in Deutschland und zahlreichen anderen Ländern H₂-Tankstellennetze zur Versorgung von BZ-PKW und leichten Nutzfahrzeuge aufgebaut. Entsprechend den Anforderungen der unter 5.2 und 5.4 vorgestellten Fahrzeuge sind die Tankstellen auf die Abgabe von 700-bar-Druckwasserstoff ausgelegt. Der H₂ wird im Regelfall per Trailer in gasförmigem oder flüssigem Zustand angeliefert; bei einigen Tankstellen aber vor Ort per Elektrolyse erzeugt [157]. Grundsätzlich stehen den niedrigeren Gestehungskosten zentraler H₂-Herstellung zusätzliche Anwendungen für den H₂-Transport entgegen und verschlechtern die ursprünglich günstige Kostenbilanz. Demgegenüber ist die H₂-Produktion vor Ort *per se* teurer, profitiert aber vom Wegfall der hohen Transportkosten. So muss die Entscheidung für geeignete Versorgungskonzepte situationsspezifisch gefällt werden und hängt u.a. vom Angebot externer H₂-Quellen, sowie der Verfügbarkeit von Strom und Platz für eine vor-Ort-Herstellung ab.

Eine H₂-Tankstelle für PKW und leichte Nutzfahrzeuge integriert eine Reihe von Standardkomponenten: Dazu gehören Speicher für gasförmigen oder flüssigen Wasserstoff, Kompressoren zur Verdichtung des gespeicherten H₂ auf erforderliche Gasdruckniveaus, sowie eine Vorkühlung und Dispenser (Zapfanlagen) für die Abgabe des gasförmigen H₂ an die Fahrzeuge. Wird eine vor-Ort-Elektrolyse vorgesehen, ist auch diese zum Inventar der Tankstelle zu zählen. H₂-Tankstellen bzw. Zapfanlagen können entweder in konventionelle Tankstellen mit einem breiter gefächerten Kraftstoffangebot integriert werden oder als eigenständige Anlage ausschließlich für die Abgabe von H₂ konzipiert werden. Die Größe der Tankstellen ist ein weiteres wichtiges Unterscheidungskriterium: So teilt die Infrastrukturinitiative H₂ Mobility Tankstellen in die Kategorien *sehr klein* (XS), *klein* (S), *mittelgroß* (M) und *groß* (L) abhängig vom täglichen H₂-Umsatz und der Anzahl an Betankungen ein. Kommerziell relevant sind erst Tankstellen der Kategorie S mit einem H₂-Durchsatz von 212 kg und 38 Betankungen pro Tag aufwärts. Anlagen der Kategorie M liegen bei einem Umsatz von 420 kg und 75 Befüllungen; Tankstellen der Kategorie L bei 1.000 kg und 180 Betankungen [67]. Insgesamt ergibt sich damit eine sehr heterogene Tankstellenlandschaft, die pauschale Aussagen zur technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit erschwert.

Wie schon unter 3.2 angesprochen, wurde in Deutschland der Grundstock der Betankungsinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge im Rahmen der Clean Energy Partnership gelegt und wird heute durch H₂ Mobility weiter ausgebaut. Infrastrukturseitig waren in der CEP v.a. Mineralöl-, Gase- und Energieunternehmen beteiligt; vertreten durch NOW wirkte auch die Bundesregierung als Partner und Fördermittelgeber mit [8]. Während in der CEP anfangs Tankstellen mit 350-bar-Druckbetankung sowie einige Flüssigwasserstoff-Tankanlagen entwickelt und erprobt wurden, setzte sich für PKW ab 2008 die 700-bar-Druckbetankung durch und ermöglichte eine vollständige Befüllung in drei Minuten. Bis Ende 2016 wurden 30 öffentlich zugängliche Tankstellen errichtet und etwa 25 weitere Anlagen befanden sich im Bau oder fortgeschrittener Planung [163]. An 5 Tankstellen wurde per Wasserelektrolyse unter Nutzung erneuerbarer Energien hergestellter Wasserstoff abgegeben [9]. Allerdings waren nicht alle Anlagen betriebsbereit und weisen auf bis heute nicht vollständig gelöste Zuverlässigkeitsprobleme hin [164]. H₂ wurde für 9,50 Euro pro Kilogramm abgegeben und musste auf Verlangen der Politik zu mindestens 50 Prozent regenerativen Ursprungs sein. Da der Verbrauch eines BZ-Fahrzeugs bei etwa 1 kg auf 100 km liegt, entstehen Kraftstoffkosten von unter 10,00 Euro pro 100 km.

Allerdings ist dieser Verkaufspreis nicht als Marktpreis, sondern als zwischen den Beteiligten festgelegter politischer Preis zu verstehen. Erst bei Erreichung von volkswirtschaftlich relevanten Marktvolumina kann sich ein echter Marktpreis einpendeln. Neben PKW-Tankstellen wurden auch einige größere 350-bar-Tankanlagen für Busse erprobt.

Spätestens mit Beginn des Jahres 2017 übernahm die *H₂ Mobility Deutschland GmbH & Co. KG* die zentrale Rolle beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur für PKW in Deutschland. Hatten bislang Unternehmen im Rahmen der CEP Tankstellen als F&E-Projekte entwickelt, errichtet und erprobt, so zielt H₂ Mobility auf den flächendeckenden Aufbau einer früh-kommerziellen H₂-Infrastruktur. Das Unternehmen wurde 2015 von den Firmen *Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell* und *TOTAL* gegründet. Die Automobilbauer BMW, Honda, Hyundai, Toyota und VW stimmen als assoziierte Partner ihre marktbezogenen Planungen für BZ-Fahrzeuge mit den sechs Gesellschaftern ab. Die NOW berät H₂ Mobility in politischen Fragen [165].

H₂ Mobility verfolgt den Auftrag, den Markteintritt von BZ-PKW in Deutschland durch den Aufbau eines Netzes von 700-bar-Wasserstofftankstellen zu flankieren. Mitte Januar 2020 sind 81 öffentliche Tankstellen in Betrieb und werden weitere 24 Stationen aufgebaut, so das zeitnah mindestens 105 Einheiten zur Verfügung stehen [166]. Bis 2021 soll das Tankstellennetz auf 140 und bis 2023 auf 400 Einheiten erweitert werden und so eine flächendeckende H₂-Grundversorgung sicherstellen, die später weiter ausgebaut werden kann [167]. Während der Aufbau der bis 2020 geplanten Tankstellen gesichert ist, wird der weitere Netzausbau bis 2023 auch von den Zulassungszahlen von BZ-Fahrzeugen abhängig gemacht: je nach Flottenzuwachs wird der Netzausbau dynamisch oder weniger dynamisch verlaufen. Tankstellen entstehen zunächst in Ballungszentren und entlang von Autobahnen, was deutschlandweite Fahrten ermöglicht. Daneben wird auch eine begrenzte Anzahl von Stationen in weniger zentralen Regionen errichtet. Neben dem Bau ist H₂ Mobility auch für den Betrieb der Tankstellen verantwortlich [168]. Der Netzausbau wird in der nachfolgenden Abbildung Stand 2018 illustriert.

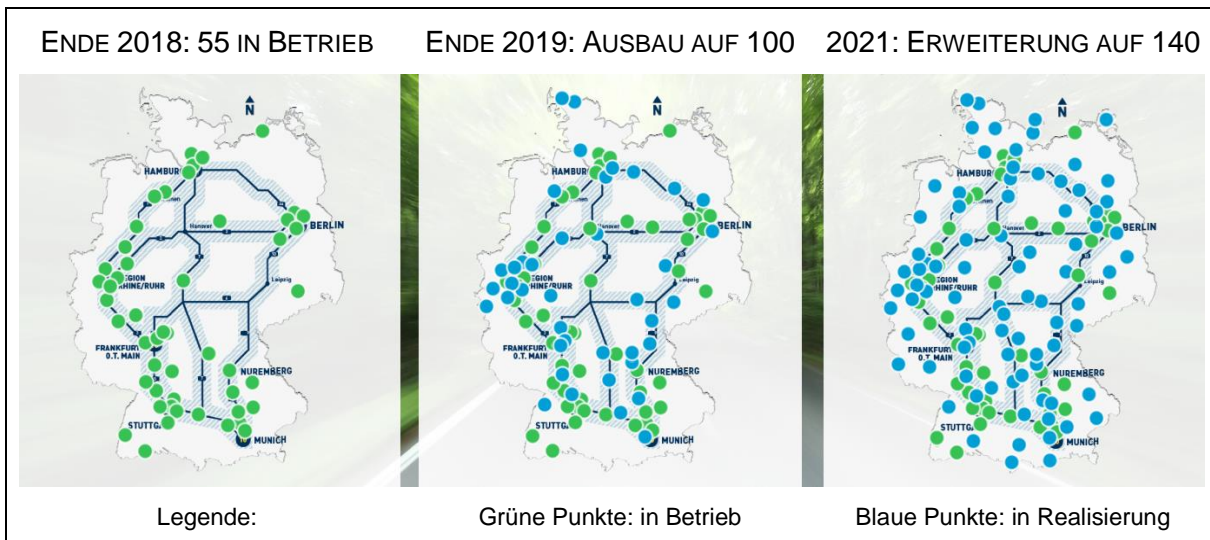


Abbildung 6.3: Ausbau H₂ Mobility-Tankstellennetz für BZ-PKW in Deutschland: Stand 2018 und Planung für 2019 und 2021. Eigene Darstellung basierend auf [167].

H₂ Mobility hat 30 der im Rahmen der CEP aufgebauten Tankstellen übernommen [169]. Weitere CEP-Tankstellen werden unabhängig von H₂ Mobility von anderen Firmen und teils im Rahmen der nach wie vor bestehenden CEP weiterbetrieben. Während sich H₂ Mobility ursprünglich nur mit PKW-Betankungsinfrastruktur befasste, gaben H₂ Mobility und die unter 5.4 vorgestellte Firma StreetScooter Ende 2017 eine wichtige Kooperation bekannt: Zur Betankung der von StreetScooter entwickelten und mit 700-bar-Drucktanks ausgestatteten Lieferfahrzeuge mit BZ-Range-Extender werden H₂ Mobility-Tankstellen genutzt [115]. Während die Lieferfahrzeuge PKW-Betankungstechnologie statt der bei Bussen üblichen 350-bar-Betankung nutzen, werden von H₂ Mobility erstmals Nutzfahrzeuge mit H₂ versorgt.

Die Verfügbarkeit der Wasserstofftankstellen wird stetig weiter verbessert, reicht aber noch nicht an die Standards konventioneller Tankstellen heran: Obgleich keine diesbezüglichen Zahlen veröffentlicht werden, wurde die Störungsanfälligkeit der Anlagen immer wieder thematisiert [83]. Zur Finanzierung des Infrastrukturaufbaus zieht H₂ Mobility neben Eigenmitteln auch Förderprogramme des Bundes und der EU heran [169]. Wurde der Förderbedarf im Rahmen der CEP mit der Lösung technischer Fragen begründet, zielen die von H₂ Mobility genutzten Fördermittel auf den Aufbau früh-kommerzieller Infrastruktur und machen teils die Nutzung regenerativer Energien bei der H₂-Produktion zur Bedingung. H₂ wird weiterhin für 9,50 Euro pro Kilogramm verkauft und soll auf steigenden EE-Anteilen basieren.

Wie verschiedene Studien betonen, sind aufgrund der Heterogenität von Tankstellenkonzepten, Vertraulichkeitsvorbehalten und eines Mangels an relevanten Publikationen die Kosten entsprechender Anlagen nur näherungsweise zu bestimmen [157], [67]. Laut amerikanischen Quellen liegen die Kosten für Tankstellen mit Tageskapazitäten von 200 bis 300 kg H₂ bei 2 bis 3 Millionen US \$. Für Deutschland werden pauschal niedrigere Kosten von etwa 1 Million Euro für CEP-Tankstellen genannt [67]. Einer umfassenden Infrastrukturkostenanalyse von 2018 zufolge liegen die Investitionskosten einer H₂ MOBILITY-Tankstelle der Kategorie S mit einem täglichen H₂-Durchsatz von 212 kg bei 1 Million Euro [170]. Eine andere Studie ermittelt Investitionskosten von 3,3 Millionen Euro für eine Anlage mit einer Mindestkapazität von 700 kg H₂ [171]. Diese Kostenangaben liegen aber weit über den Schätzungen der zuvor genannten Studie für Tankanlagen in ähnlichen Größenordnungen Euro [170]. Vor diesem Hintergrund sind die von Experten oft genannten Kosten von 1 bis 1,5 Millionen Euro für eine Tankstelle der Kategorie S plausibel. Die zitierten Studien gehen aufgrund von Lern- und Skaleneffekten von zukünftig realisierbaren Kostensenkungen aus. Angesichts der unbefriedigenden Datenverfügbarkeit sind belastbare Quantifizierungen derselben aber nicht möglich.

Zur Klärung der globalen Investitionskosten einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland wurde eine bereits zitierte Infrastrukturkostenanalyse durchgeführt. Die Studie untersucht die Kosten für den Aufbau einer Infrastruktur für 20 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge und vergleicht diese mit den Investitionskosten einer Stromversorgungsinfrastruktur für 20 Millionen Batterieautos. Wasserstoffseitig wird die Herstellung des Gases v.a. mittels Wasserelektrolyse, dessen Speicherung in Kavernen, der Gastransport per Pipelines und Trailer, sowie die Abgabe an Tankstellen untersucht. Bei der Ladeinfrastruktur für Batteriefahrzeuge werden der erforderliche Ausbau von Stromnetzen und die Errichtung von Ladestationen berücksichtigt. Beide Infrastrukturen nutzen im Zuge der Energiewende aufkommende große Mengen EE und integrieren nicht anderweitig nutzbaren Überschussstrom [170].

Wie die nachfolgende Graphik zeigt, entwickeln sich die Kostenverläufe der beiden Infrastrukturoptionen über Zeit bzw. mit zunehmender Versorgungskapazität unterschiedlich und phasenweise zum Vorteil der Stromladeinfrastruktur. Bei Erreichen eines Fahrzeugbestands von jeweils 20 Millionen Fahrzeugen jedoch betragen die kumulierten Kosten der H₂-Infrastruktur 40 Milliarden Euro und damit 11 Milliarden Euro weniger als die für Ladeinfrastruktur aufzuwendenden 51 Milliarden Euro. Die Studie betont trotzdem die Notwendigkeit beider Infrastrukturen, da zwar der Einsatz von Batterieautos Vorteile hinsichtlich höherer Energieeffizienz mit sich bringt, die sektorenübergreifende Nutzung von H₂ aber für die Sicherheit der Energieversorgung wichtige Speicherpotenziale bietet. Auch vor dem Hintergrund der Infrastrukturbeurteilung wird beiden Antriebskonzepten eine wichtige und komplementäre Rolle für eine nachhaltige Mobilität zugesprochen, wobei reine Batterielösungen eher für leichte Fahrzeuge und BZ-Antriebe v.a. für Nutzfahrzeuge geeignet erscheinen.

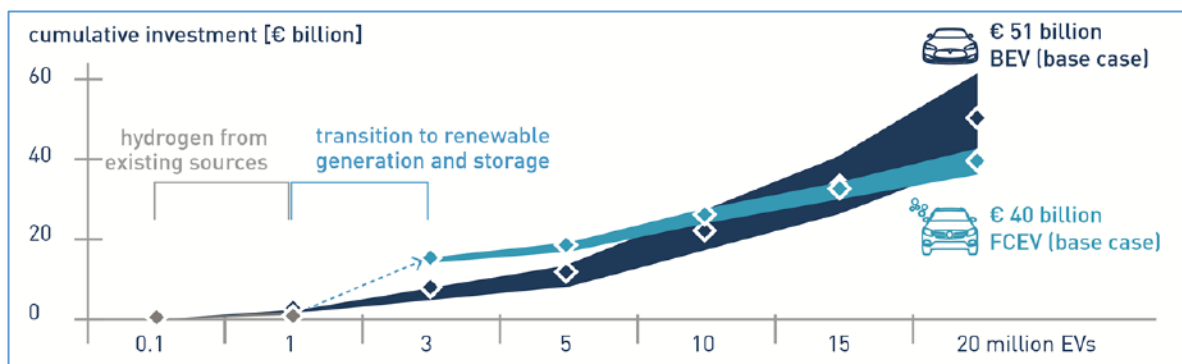


Abbildung 6.4: Vergleich der kumulierten Investitionen des Infrastrukturaufbaus für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge [170].

Eine vom ADAC beauftragte und unlängst veröffentlichte Analyse des Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und BZ-PKW in Deutschland kam zu ähnlichen Ergebnissen: Während mittelfristig leichte Kostenvorteile für die Batteriefahrzeug-Ladeinfrastruktur zu erwarten sind, geht ab etwa 2040 der Ausbau der H₂-Infrastruktur mit geringeren Gesamtkosten einher [172]. Demgegenüber ermittelt eine weitere Studie beim Vergleich der Investitionskosten batterieelektrischer und H₂-basierter Mobilität deutliche Kostenvorteile für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2050 [171]. Allerdings werden einerseits die eigentlichen Infrastrukturkosten zusammen mit den Kraftstoffkosten ermittelt und lassen sich nicht klar von anderen Positionen abgrenzen. Andererseits bewegt sich die volkswirtschaftliche Forschungsarbeit auf einem sehr abstrakten Niveau und lässt insbesondere keine, in den anderen Studien zentral wichtigen, Wechselwirkungen zwischen den beiden Infrastrukturoptionen zu. Daher kann die Studie nicht zur Validierung der anderen Arbeiten herangezogen werden.

6.4 H₂-Tankstellen für Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge

Wie insbesondere in den Kapiteln 3 und 5 deutlich wird, geht der Betrieb von brennstoffzellenbetriebenen Bussen und anderen schweren Nutzfahrzeugen stets mit dem Einsatz bedarfsgerecht aufgebauter H₂-Betankungsinfrastruktur einher. Beispielsweise wurden in der CEP einige BZ-Busse u.a. in Hamburg und Berlin erprobt und an eigens errichteten 350-bar-Druckbetankungsanlagen befüllt. Analog wird in allen oben skizzierten EU-Busprojekten der Fahrzeugbetrieb durch situationsgerecht ausgelegte Betankungsangebote flankiert. So wurden in CHIC nicht nur Busse, sondern auch neun technologisch unterschiedliche H₂-Tankstellen in europäischen Städten erprobt. JIVE wiederum wird von dem unter 5.3 angesprochenen Projekt MEHRLIN begleitet, welches die H₂-Versorgung der Busse mit sieben großen Tankanlagen unterstützt. Dabei werden verschiedene Tankstellenkonzepte umgesetzt und H₂ sowohl von externen Quellen bezogen wie auch vor Ort per Elektrolyse mit täglichen Produktionsmengen bis zu 860 kg auf EE-Basis hergestellt [106]. Die nachfolgende Abbildung stellt verschiedene Tankstellenkonzepte einschließlich derer H₂-Versorgungspfade dar.

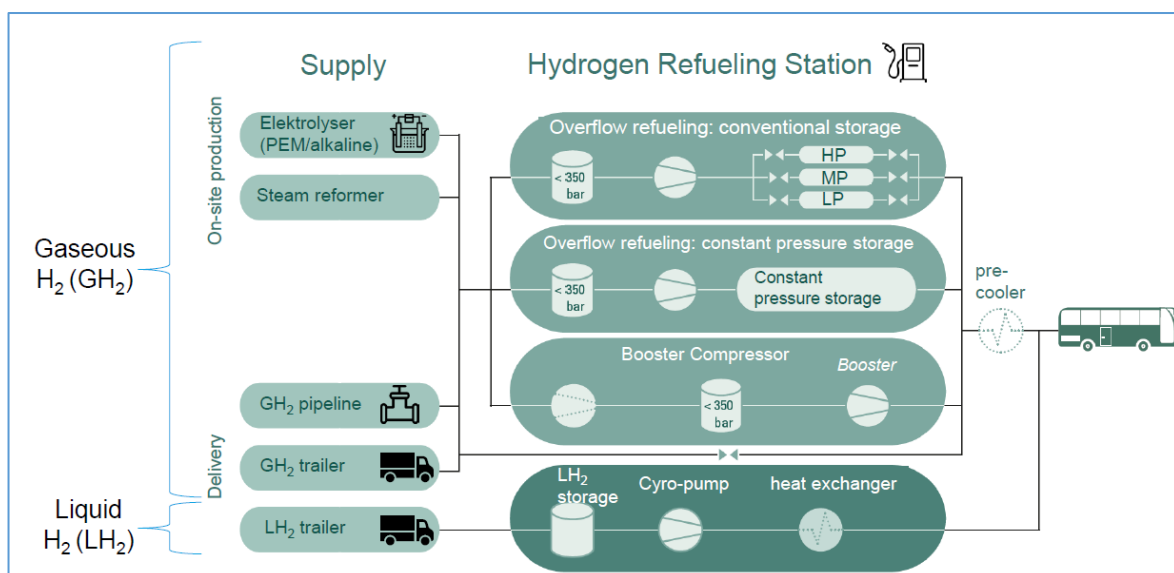


Abbildung 6.5: Tankstellenkonzepte für schwere Nutzfahrzeuge [173].

Tankanlagen für BZ-betriebene Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge unterscheiden sich von Tankstellen für BZ-PKW nicht nur hinsichtlich der Druckniveaus und der, bedingt durch die deutlich höheren Kraftstoffbedarfe schwerer Fahrzeuge, erforderlichen Auslegung auf wesentlich größere H₂-Umsätze und Speicherkapazitäten. Die Betankung schwerer BZ-Nutzfahrzeuge stellt auch besonders hohe Anforderungen bezüglich der Anlagenzuverlässigkeit sowie eines möglichst geringen Flächenbedarfs, der gerade bei innerstädtischen und häufig platzbeschränkten Busdepots eine zentrale Rolle spielt [110]. Demgegenüber ist von vornherein für eine ausreichende Infrastrukturverfügbarkeit gesorgt und Probleme mit der Kraftstoffversorgung, wie sie PKW-Fahrer mangels eines flächendeckend aufgebauten Tankstellennetzes erleben können, entstehen bei den routengebundenen bzw. lokalen Einsätzen nicht.

Eine Tankstelle zur Versorgung von 50 Bussen weist einen ungefähren täglichen H₂-Umsatz von 1.300 kg im Falle der Auslegung auf brennstoffzellendominante Fahrzeuge, bzw. von 600 kg im Falle eines Designs für Busse mit BZ-Range-Extender auf. Während in ersterem Fall die tankstellenseitige Auslegung der H₂-Anlagen anspruchsvoller ist, wird in letzterem Fall neben dem H₂-Pfad auch die Einrichtung einer Stromladeinfrastruktur erforderlich. Die Investitionskosten einer Tankstelle für 50 BZ-dominante Busse liegen bei etwa 5 Millionen Euro, wird der H₂ vor Ort per Wasserelektrolyse produziert, steigen sie auf etwa 12 Millionen Euro [110]. Die Kosten einer Anlage zur Versorgung von 50 Bussen mit Range-Extender unterscheiden sich nicht wesentlich [173]. Aussagen zur zukünftigen Kostenentwicklung liegen nicht vor.

Die bisher in Projekten erprobten Tankanlagen für Busse sind noch verhältnismäßig klein dimensioniert und genügen nicht den Infrastrukturanforderungen, welche sich aus den in 5.3 skizzierten Ambitionen zum zukünftigen Einsatz weit größerer Busflotten ergeben. Daher wurden im EU-Projekt *NewBusFuel* Optionen zur großmaßstäblichen Versorgung von Busflotten in 13 Fallstudien untersucht. Dabei wurde ein breites Spektrum von Tankstellen- und H₂-Versorgungskonstellationen hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte analysiert. Ein wichtiges Ziel bestand darin, den Kraftstoffkosten von Dieseln vergleichbare H₂-Bereitstellungskosten zu erreichen und damit einen H₂-Abgabepreis von 4 bis 6 €/kg zu realisieren. Das ambitionierte Ziel wurde in drei Fallstudien erreicht, während in drei weiteren Fallstudien immerhin H₂-Kosten zwischen 6 und 8 €/kg als möglich identifiziert wurden. Aus Vertraulichkeitsgründen wurden die relevanten Technologiekonzepte nicht öffentlich kommuniziert. Im Projekt wurden abschließend regulatorische Hemmnisse für den großskaligen Buseinsatz und insbesondere die mit den hohen Abgaben für Strom verbundenen Kostensteigerungen der H₂-Produktion identifiziert [110]. Die Handlungsempfehlung zur Beseitigung dieser Hürde geht in Kapitel 9 ein.

Während die Tankstelleninfrastruktur für Busse auch von BZ-LKW mit 350-bar-Technologie genutzt werden kann, ist gegenwärtig ein neuer Trend zur 700-bar-Versorgung auch von LKW zu verzeichnen. Wie unter 5.4 dargelegt, validiert Nikola mittlerweile 700-bar-Konzepte für die Versorgung schwerer LKW und beschäftigt sich auch die EU ernsthaft mit dieser Option. Sollte sich die 700-bar-Betankung auch bei leichten und schweren LKW etablieren, könnte infolge von Synergien mit dem PKW-Tankstellennetz der Infrastrukturaufbau insgesamt wesentlich befördert und Skaleneffekte realisiert werden.

7 Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage

Das Kapitel widmet sich der Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage und zieht zunächst Lehren aus den bisherigen Studienbefunden. Anschließend werden drei wissenschaftliche Untersuchungen und ein Strategiepapier zum erwarteten H₂-Aufkommen in Deutschland und Europa referiert.

7.1 Befunde der vorliegenden Untersuchung

Die bisherige Diskussion dieser Studie zeigt einerseits, dass der Markthochlauf der H₂-basierten Mobilität erst beginnt und weltweit nur in wenigen Regionen, insbesondere Asien, schon deutlich Fahrt aufgenommen hat. Andererseits ist ein klarer Trend zur Kommerzialisierung zu beobachten: Regierungen und Gesetzgebung unterstützen die Mobilitätsoption, BZ-betriebene PKW und Nutzfahrzeuge werden im wachsenden Umfang und mit zunehmender Wettbewerbsfähigkeit auf die Straße gebracht, und Infrastrukturen zur Produktion, Verteilung und Abgabe von H₂ ausgebaut. Während also erhebliche Marktpotenziale für H₂ im Verkehr zu vermuten sind, lassen sich anhand der vorausgegangenen Betrachtungen keine genauen Aussagen zur zukünftigen H₂-Nachfrage ableiten: Außerhalb konkreter Projekte liegen keine belastbaren Erkenntnisse selbst zu zentralen Faktoren wie dem zukünftigen BZ-Fahrzeug- und Tankstellenbestand in Deutschland und Europa vor. Beispielsweise ist es ungewiss, inwieweit die Ausbauplanungen von H₂ Mobility über 2020 hinaus umgesetzt werden, wobei die relevanten Entscheidungen explizit an die noch unbekannt entwickelte Entwicklung der BZ-Fahrzeugzulassungszahlen gekoppelt werden.

Allerdings lassen sich aus der vorangegangenen Analyse einige Anhaltspunkte für die mit dem Aufkommen der H₂-Mobilität verbundenen Wasserstoffmärkte ableiten. Der PKW-Markt gilt bislang als unattraktiv, da einerseits in Deutschland und Europa erst ungefähr 500 bzw. 1.500 Fahrzeuge unterwegs sind und andererseits nur etwa 1,0 kg H₂ auf 100 km verbrauchen. Daher setzte H₂ Mobility z.B. im September 2019 lediglich um die 10 Tonnen H₂ im gesamten Tankstellennetzwerk ab [166]. Hingegen liegt der H₂-Verbrauch BZ-dominanter Busse zwischen 8,5 und 10,5 kg H₂ pro 100 km und geht im Regelfall mit höheren Fahrleistungen als der PKW-Einsatz einher [96]. Im Gegensatz zu den auf einen täglichen H₂-Durchsatz von 212 kg ausgelegten typischen H₂-Mobility-Tankstellen [67] weist eine Anlage zur Versorgung von 50 Bussen pro Tag einen ungefähren H₂-Umsatz von 1.300 kg auf [96]. Obgleich die absoluten H₂-Absatzmengen aufgrund der aktuell weniger als 100 in der EU zugelassenen Busse noch gering sind, gilt der H₂-Markt im Bereich Nutzfahrzeuge doch als deutlich vielversprechender als sein PKW-Pendant. Offenkundig gehen auch über alle Fahrzeugklassen hinweg wachsende Fahrzeugzahlen mit einer größeren Attraktivität der H₂-Kraftstoffmärkte einher. Die umseitige Darstellung der Firma Air Liquide illustriert grob die mit verschiedenen mobilen Anwendungen verbundenen H₂-Verbräuche.

Jenseits der hier vollzogenen punktuellen Betrachtungen müssen für ein vollständigeres Bild der zukünftig zu erwartenden H₂-Nachfragen speziell darauf ausgerichtete Untersuchungen herangezogen werden. Alle vier unten diskutierten Arbeiten gehen davon aus, dass zur Erreichung internationaler und nationaler Klimaschutzziele Treibhausgasemissionen bis 2050 drastisch reduziert werden müssen und analysieren den Beitrag, den CO₂-armer bzw. -freier H₂ diesbezüglich leisten kann.

Dabei werden Gesamtenergiesysteme betrachtet und neben der H₂-Mobilität Industrie und stationäre Energieversorgung berücksichtigt, wobei nicht durchweg Aussagen speziell zum Verkehr getroffen werden. Die Studien arbeiten mit unterschiedlichen Annahmen und Szenarien und zeitigen eine ganze Bandbreite an Ergebnissen.



Abbildung 7.1: Wasserstoffverbräuche verschiedener mobiler Anwendungen [174].

7.2 Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse

Eine bereits unter 6.1 angesprochene und im Herbst 2018 vorgestellte Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland erforscht die Chancen und Herausforderungen, die sich mit einem erwarteten, stark zunehmenden Einsatz der Technologie ergeben [156]. Im Einklang mit anderen Untersuchungen wird die Elektrolyse als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaschutzziele betrachtet. Die Zukunftspotenziale der Wasserelektrolyse werden mit dem Ergebnis erforscht, dass eine erfolgreiche Industrialisierung möglich ist, aber weiterer politischer Unterstützung bedarf. Als wichtiger Teil der Gesamtuntersuchung wird der zukünftige H₂-Bedarf der Sektoren Verkehr, Strom und Wärme analysiert.

Mit einem Energiesystemmodell wird eine Simulation des von 2020 bis 2050 in Deutschland zu erwartenden Wasserstoff- und Elektrolysebedarfs durchgeführt. Dabei werden sechs Szenarien unter der Vorgabe modelliert, dass die Klimaschutzziele der Bundesregierung eingehalten werden. In den beiden Basisszenarien S0-85 und S0-95 wird der Einfluss zweier dem Energiekonzept entlehnter CO₂-Minderungsziele für 2050 (–85 bzw. –95 Prozent) auf den zukünftigen H₂-Bedarf untersucht. Zusätzlich darf in S0-95 H₂ aus dem Ausland importiert werden. In den Szenarien S1, S2, S3 und S4 werden genauere Betrachtungen der drei unter 6.1 vorgestellten Elektrolysetechnologien durchgeführt. Szenario S1 analysiert eine nur durch die Hochtemperatur-Elektrolyse getragene H₂-Bereitstellung und das konservative Szenario S2 nimmt eine schleppende Entwicklung aller Elektrolysearten an. Das zentrale Szenario S3 geht von einer Dominanz der alkalischen und der PEM-Elektrolyse aus und schreibt der HTEL eine geringere Rolle zu; S4 ist eine Variante von S3 [156]. Die nachfolgende Abbildung stellt die zentralen Ergebnisse zur Entwicklung der H₂-Nachfrage bis 2030 dar.

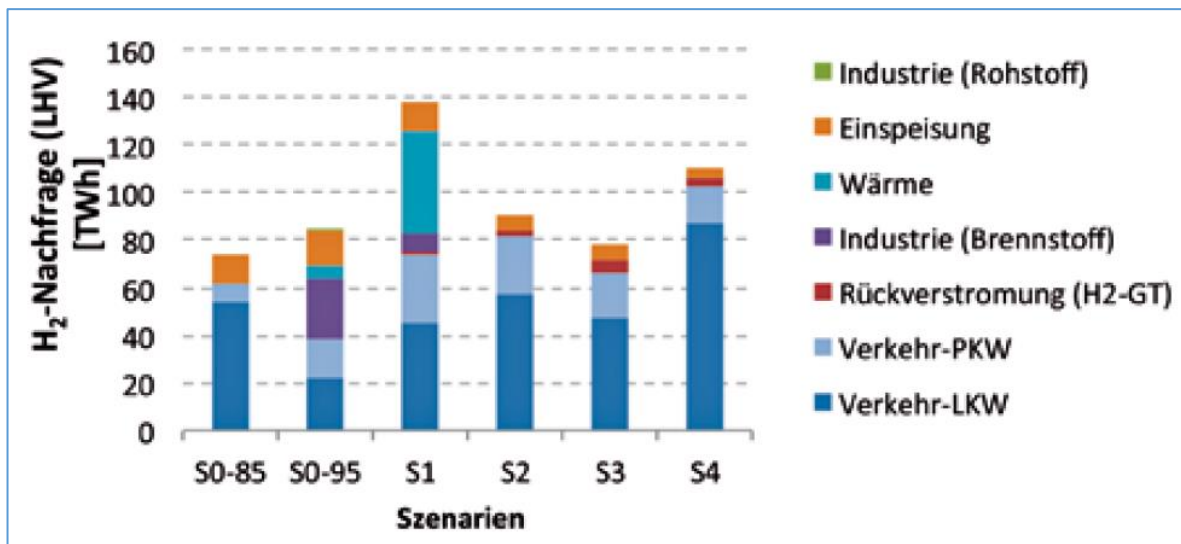


Abbildung 7.2: Entwicklung der Wasserstoffnachfrage nach Szenarien bis 2030 gemäß [175].

Im zentralen Szenario S3 ergibt sich im Jahr 2030 eine H₂-Nachfrage von 78 Terawattstunden über alle Verbrauchssektoren hinweg; die Bandbreite über alle sechs Szenarien reicht von 74 bis 138 TWh. Bis 2050 steigt der H₂-Bedarf auf 294 TWh im zentralen Szenario, die Bandbreite reicht von 261 bis 705 TWh (nicht abgebildet). H₂ wird bis 2050 hauptsächlich vom Verkehrsbereich nachgefragt, wobei der Bedarf überwiegend dem LKW-Bereich zuzuordnen ist. Aber auch als PKW-Kraftstoff gewinnt H₂ bis 2050 an Bedeutung [156].

Der überwiegende Anteil der in der Studie ermittelten H₂-Nachfrage ist der direkten Nutzung durch die dargestellten Anwendungen zuzuordnen und Bedarfe für eine Weiterverarbeitung, z.B. durch Methanisierung, werden in der obigen Abbildung nicht berücksichtigt. Ein Vergleich mit anderen, zur Validierung herangezogenen Energiesystemanalysen ergibt, dass die ermittelten H₂-Bedarfe im oberen Bereich anderer Befunde liegen. In den anderen Analysen wird jedoch erheblich auf importierten H₂ oder synthetische Kraftstoffe gesetzt, welche in der hier diskutierten Studie nur eine geringe Rolle spielen [175].

7.3 Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen

Eine weitere, im Mai 2019 vorgestellte Wasserstoffstudie untersucht die Rolle, welche H₂ im zukünftigen Energiesystem Deutschlands und Nordrhein-Westfalens im Kontext der Energiewende einnehmen kann. Auch hier geht die Betrachtung deutlich über den Verkehr hinaus und schließt die Industrie und den Gebäudesektor ein. Anhand von sechs Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen insbesondere zu THG-Minderungszielen sowie zur Schwerpunktleistung entweder auf H₂ oder Strom werden die Potenziale ermittelt, welche H₂ zum ökologisch und wirtschaftlich erfolgreichen Umbau des Energiesystems beitragen kann [176]. Als Teil dieser Betrachtung wird ermittelt, welche Nachfragen H₂ deutschlandweit aus allen Sektoren auf sich ziehen kann. Die Bandbreite der aus den Szenarien resultierenden H₂-Nachfragen ist beträchtlich: Bis zum Jahr 2030 beläuft sich der Bedarf auf 100 bis zu 300 Terawattstunden pro Jahr und steigt bis 2050 auf jährlich 200 bis 650 TWh an [177]. Die Werte für 2030 liegen deutlich über denen der zuvor diskutierten Studie zur Industrialisierung der Elektrolyse, nähern sich aber bis 2050 den Ergebnissen derselben an.

7.4 Studie Transformationsstrategien für das Energiesystem

Im Oktober 2019 nahm die bislang aktuellste relevante Studie *kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050* in den Blick und spricht H₂ eine wesentliche Rolle für die erforderliche Dekarbonisierung zu [178]. Ausgangspunkt ist die Frage, wie die Zielsetzung des Energiekonzepts einer 80- bis 95-prozentigen Verminderung der THG-Emissionen aller Sektoren gegenüber 1990 bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann. Dazu werden die CO₂-Reduktionsszenarien *Szenario 80* und *Szenario 95* analysiert, die sich an den Minderungszielen von -80 Prozent bzw. -95 Prozent orientieren. Mit Modellen werden sektorenübergreifend die kosteneffizientesten Maßnahmenbündel bzw. THG-Minderungsstrategien ermittelt. Die Bereiche Gebäude, Industrie und Verkehr werden ebenso wie ein Portfolio energiesystemrelevanter Aspekte wie der Ausbau von EE und Infrastrukturen für deren Integration berücksichtigt.

Die Modellierungen ergeben, dass in beiden Szenarien insbesondere erneuerbarer H₂ wesentlich ist: Aufgrund des Zuwachses von Wind- und Solarstrom und der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs- und Energiesystems steigt der Bedarf nach Power-to-X-Systemen, die H₂ v.a. für die unmittelbare Nutzung und die Methanisierung bereitstellen. Die Systeme ermöglichen Sektorenkopplung wie auch Energiespeicherung und stellen H₂ für die Versorgung aller Sektoren einschließlich des Verkehrs bereit. Je nach Szenario ist die H₂-Bereitstellung per Elektrolyse, Erdgasreformierung sowie Importen relevant. Im Szenario 80 wird bis 2050 ein H₂-Volumen von 145 TWh und im Szenario 95 von 399 TWh erreicht [179]. Die im zentralen Szenario der ersten der zuvor referierten Studien [156] ermittelten 294 TWh liegen zwischen diesen Werten und zumindest Teile der aus der zweiten Untersuchung [177] resultierenden Bandbreite sind mit den Befunden der dritten Untersuchung [178] vereinbar.

Angesichts der insbesondere im Szenario 95 zu erwartenden großen H₂-Volumina empfiehlt die Studie zu Transformationsstrategien den forcierten Aufbau einer großskaligen Infrastruktur. Während zu Beginn des Markthochlaufs ein Transport mit Trailern zu bewerkstelligen sei, wäre später der Bau neuer H₂-Pipelinenetze bzw. die Umwidmung bestehender Erdgaspipelines vonnöten. Gleichfalls wird die Schaffung neuer H₂-Kavernenspeicher bzw. die Umwidmung bestehender Erdgaskavernen als erforderlich erachtet [178].

Der Verkehrssektor des Jahres 2050 wird in beiden Szenarien von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen dominiert und dementsprechend primär mit Strom und H₂ versorgt; wobei auch Biogas, LNG, sowie synthetische und andere Treibstoffe eine Rolle spielen. Die umseitige Abbildung stellt den Kraftstoffmix und die Antriebsarten im PKW- und Güterbereich dar.

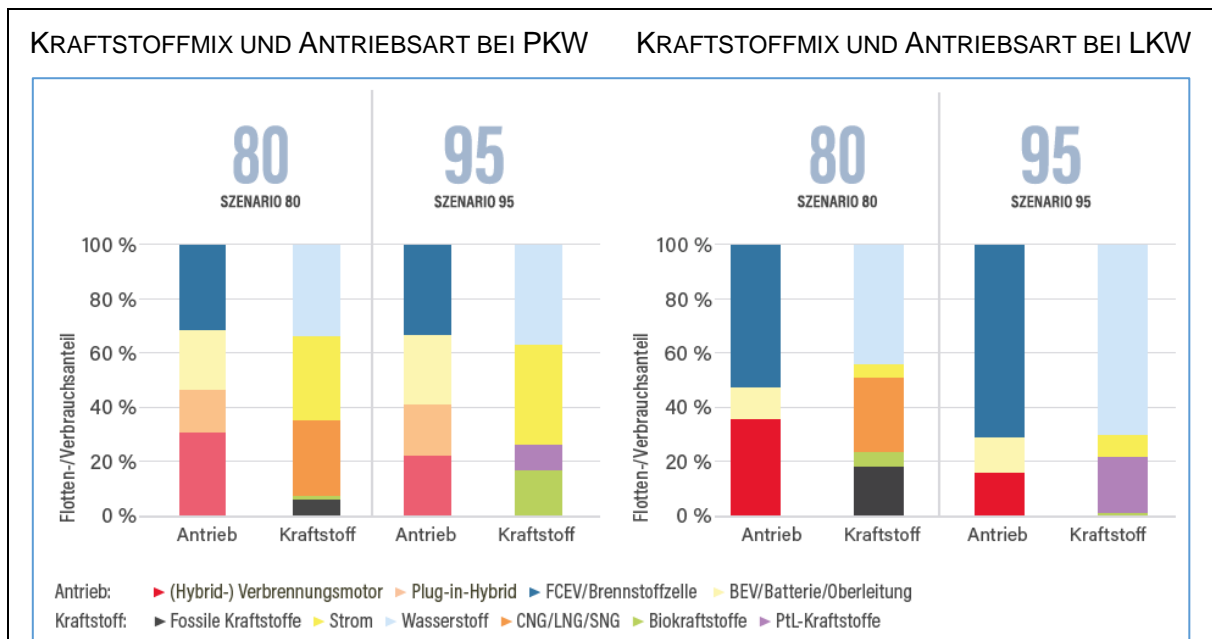


Abbildung 7.3: Kraftstoffmix und Antriebsart im PKW- und Güterverkehr 2050 [178].

Im Szenario 80 entfallen 33 Prozent des Kraftstoffbedarfs von PKW und 46 Prozent der Nachfrage des Güterverkehrs auf H₂; im Szenario 95 sind es 36 bzw. 72 Prozent [179]. Gut 56 Prozent aller LKW für den Fernverkehr sind im Szenario 80 mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet; im Szenario 95 ist dies bei über drei Viertel aller Fahrzeuge der Fall [178].

7.5 Hydrogen Roadmap Europe

Die im Februar 2019 vorgestellte *Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition* rundet das Bild zukünftig zu erwartender H₂-Nachfragen mit einem Blick auf Europa ab [180]. Im Gegensatz zu den vorab referierten Studien handelt es sich nicht um eine wissenschaftliche Arbeit im strengeren Sinn, sondern um ein wissenschaftlich fundiertes Strategiepapier von Stakeholdern der H₂- und BZ-Industrie. Die Roadmap geht von der Frage aus, wie H₂ zur Dekarbonisierung des Wirtschaftsraums und zur Erfüllung der Klimaschutzverpflichtungen der EU beitragen kann. Zur Beantwortung werden die Klimaschutzzpotenziale von H₂- und BZ-Technologien, Einsatzoptionen in allen Sektoren des Energiesystems, sowie die ökologischen und ökonomischen Effekte eines breiten Technologieeinsatzes analysiert. H₂ wird eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung zugesprochen und erhebliche wirtschaftliche Potenziale werden aufgezeigt. Die Roadmap beinhaltet auch Handlungsempfehlungen für die Realisierung der Potenziale.

Die skizzierten Untersuchungsgegenstände werden anhand von zwei Szenarien mit Zeithorizont 2050 analysiert: Das ehrgeizige Szenario *Ambitious* unterstellt eine starke Unterstützung von H₂- und BZ-Technologien durch Wirtschaft und öffentliche Hand. Das Szenario *Business as usual* geht lediglich von einer Fortsetzung der bisherigen, verhaltenen Technologieunterstützung aus. Die umseitige Abbildung gibt die zentralen Ergebnisse der Modellierung wieder.

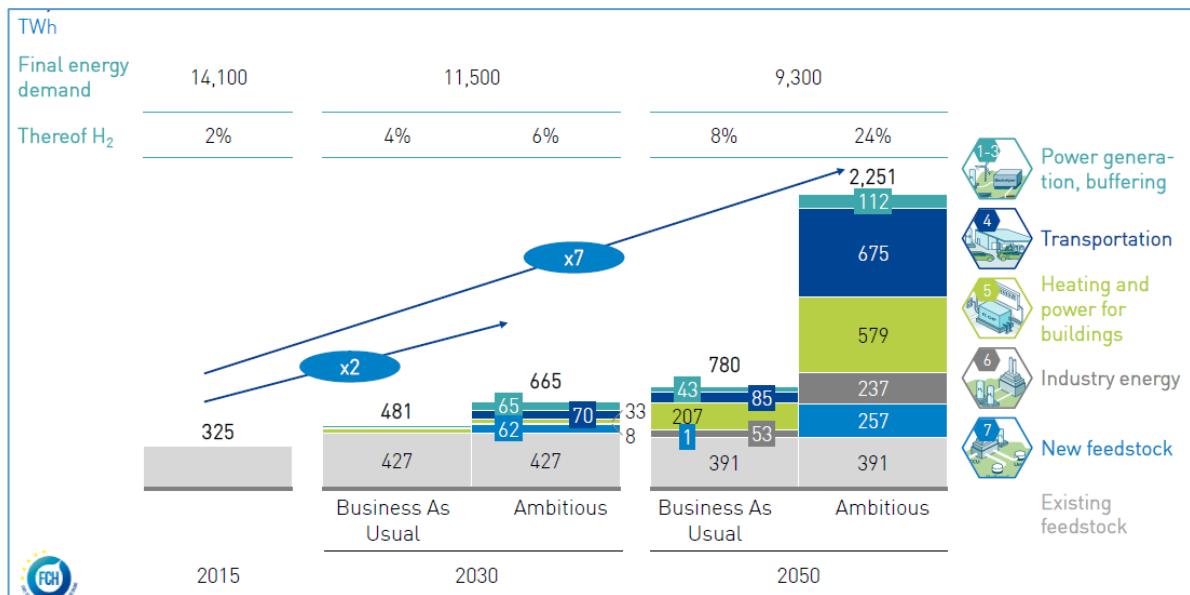


Abbildung 7.4: Anteil Wasserstoff am gesamten Energiebedarf der EU bis 2050 gemäß Szenarien der Hydrogen Roadmap Europe [181].

Im Szenario Ambitious kann H₂ im Jahr 2050 einen Anteil von rund 24 Prozent am gesamten Energiebedarf der EU bzw. ein Volumen von 2.251 TWh erreichen und den bis dahin geforderten THG-Minderungen entsprechen. Im Verkehrsbereich würden etwa 45 Millionen PKW, 1,7 Millionen LKW, 250.000 Busse, sowie 5.500 Züge mit Kraftstoff für ihre BZ-Antriebe versorgt. Große H₂-Mengen gingen auch an andere Wirtschaftssektoren. Im Szenario Business as usual würde der gesamte H₂-Bedarf 2050 lediglich 780 TWh betragen und die Klimaziele würden verfehlt. Statt 675 TWh würden nur 85 TWh im Verkehr nachgefragt. Hinsichtlich der H₂-Bereitstellung ist zu beachten, dass neben der Wasserelektrolyse die Reformierung von Erdgas als ein wichtiges Produktionsverfahren gilt [180].

8 Abgleich Potenziale H₂ mit anderen Gasen

Seit langem werden komprimiertes Erdgas und Flüssigerdgas im Verkehrsbereich als Kraftstoff genutzt. Die Gase werden in modifizierten Verbrennungsmotoren verbrannt und für den Antrieb sowohl von PKW und Bussen, sowie leichten und schweren LKW genutzt. PKW und andere leichte Fahrzeuge werden mit CNG betrieben. Während auch bei Bussen und LKW CNG zum Einsatz kommt, gewinnen bei schweren LKW mit hohen Reichweitenanforderungen LNG-Antriebe an Bedeutung. Die Anwendungen weisen in den meisten Fällen deutlich geringere CO₂-, Schadstoff- und Lärmemissionen als konventionelle Verbrenner auf. Überdies kann Erdgas bis zu 100 Prozent durch Biogas oder synthetisches Erdgas ersetzt werden und dadurch die Nachhaltigkeit des Antriebs noch deutlich steigern [182].

Dieses Kapitel vergleicht Stand und Zukunftspotenziale der H₂-Mobilität mit den Potenzialen der Gasmobilität (CH₄-basiert) und bewertet deren Marktperspektiven mit Blick auf Deutschland. Das Kapitel basiert auf den bereits vorgestellten Befunden dieser Studie, erweitert sie aber um punktuelle Analysen der Gasmobilität.² Der Potenzialvergleich wird nachfolgend anhand von fünf Themengebieten dargestellt. Abschließend werden Schlussfolgerungen hinsichtlich der resultierenden Marktperspektiven gezogen.

8.1 Fahrzeugverfügbarkeit

Eine ausreichende marktliche Verfügbarkeit, technische Reife und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit sind wesentliche Voraussetzungen für den Markterfolg von Antriebstechnologien. Daher werden diese Aspekte zuerst und differenziert nach verschiedenen Fahrzeugtypen und Zeithorizonten diskutiert.

Wie in den Abschnitten 3.1, 3.2 und 5.2 bis 5.4 dargelegt, sind weltweit 15.000 bis 18.000 kommerzielle BZ-PKW in Betrieb, davon etwa 1.500 in der gesamten EU und 500 in Deutschland, wobei in allen genannten Regionen ein deutlicher Flottenzuwachs zu verzeichnen ist. Trotz insgesamt noch geringer Zulassungszahlen haben insbesondere asiatische Hersteller eine umfassende Ausweitung ihrer Aktivitäten angekündigt und zielen kurzfristig auf einen Ausbau der Produktionskapazitäten auf bis zu 40.000 Fahrzeuge pro Jahr. In Deutschland sind technisch reife und leistungsstarke Fahrzeuge ab 69.000 Euro käuflich erwerbbar und profitieren von attraktiven Umweltsubventionen. Eine größere Bedeutung von BZ-PKW wird seitens Daimler ab etwa 2025 erwartet. BZ-Lieferfahrzeuge werden von mehreren Unternehmen entwickelt und vertrieben. In der EU sind aktuell 73 BZ-Busse im Rahmen öffentlich geförderter Projekte in Betrieb und die Flotte soll bis 2023 auf etwa 1.000 wachsen. Auch in Deutschland sind diverse Busse in mehreren Regionen im Einsatz. BZ-Busse sind technisch reif und kosten heute etwa 625.000 Euro, der Preis soll in wenigen Jahren aufgrund von Skaleneffekten auf etwa 400.000 Euro fallen. In der Schweiz sollen in den nächsten Jahren 1.600 schwere BZ-Nutzfahrzeuge in Betrieb gehen, BZ-Spezialfahrzeuge (z.B. Müllfahrzeuge) werden in mehreren EU-Ländern entwickelt und erprobt.

² Das Kapitel wird auch durch die Diskussionen eines Workshops vom 10. September 2019 informiert, in dem Zwischenergebnisse der Studie durch den Autor vorgestellt und mit Experten des DVGW erörtert wurden. Der DVGW wurde von den Herren Dr. Dietrich Gerstein, Dr. Michael Walter und Thomas Aumeier vertreten und von den Herren Wolfgang Köppel, Maximilian Heneka (beide Engler-Bunte-Institut), Ronny Erler (DBI-Gruppe) sowie Mustafa Flayyih (Gas- und Wärme-Institut Essen) unterstützt. In der Diskussion wurden die H₂-seitigen Befunde durch gasseitige Inputs ergänzt.

Demgegenüber haben CNG-Fahrzeuge verschiedener Klassen schon eine erhebliche Marktdurchdringung erreicht und bestehen für LNG-LKW ambitionierte Planungen. Beispielsweise sind in Deutschland rund 90.000 CNG-PKW in Betrieb und greifen auf ein Angebot von etwa 30 Modellen verschiedener Hersteller zurück. Die Fahrzeuge sind technisch ausgereift und in der Anschaffung etwa so teuer wie Dieselautos. Auch einige Gasbusmodelle werden vertrieben und erreichen bei Linienbussen einen Marktanteil von 3 Prozent. Heutige Gasbusse weisen gegenüber Dieselnbussen Mehrkosten von 30.000 Euro bis 50.000 Euro auf. Auch LKW mit Gasantrieben sind verfügbar und erreichen Marktanteile von 0,5 Prozent. Die technische Reife CNG-betriebener Busse und LKW ist hoch. Für schwere LKW mit hohen Reichweitenanforderungen sind LNG-Antriebe von Bedeutung [182]. Während heute in Deutschland nur wenige LNG-LKW fahren, sollen den Zielsetzungen der *LNG-Taskforce* [183] zufolge bis zum Jahr 2025 etwa 25.000 Fahrzeuge in Betrieb sein [184]. Studien zufolge sind die heutigen Kosten schwerer BZ-Nutzfahrzeuge um ein Mehrfaches höher als die vergleichbarer LNG-LKW. Allerdings erachten zumindest einige Untersuchungen die Erreichung einer Kostenparität bis 2030 als möglich [112], [185].

Die wenigen heute angebotenen BZ-PKW-Modelle sind dem gehobenen Preissegment zuzuordnen und für weite Bevölkerungsteile, insbesondere Geringverdiener, nicht erschwinglich. Allerdings sind Studien zufolge zukünftig erhebliche Lern- und Skaleneffekte und damit Kostenreduzierungen bei der relativ jungen BZ-Technologie zu erwarten [71], [1], [70], [73], [74]. Die Technologieziele der japanischen Regierung streben eine annähernde Kostenparität zwischen verbrennungsmotorischen Hybrid-PKW und BZ-PKW derselben Fahrzeugklasse bis 2025 an [75]. Stellt man dies aktuellen Verkaufspreisen für Hybrid-Fahrzeuge gegenüber [76], so wären 2025 Preise im Bereich von 30.000 bis 40.000 Euro für BZ-PKW zu erwarten. In diesem Fall würde die Kostenparität mit Diesel- bzw. CNG-Fahrzeugen erreicht.

Bei schweren Nutzfahrzeugen zeigt sich ein ähnliches Bild: Heutige Kosten für BZ-Fahrzeuge (LKW und Busse) liegen deutlich über denen vergleichbarer Gasfahrzeuge und die Angebotspalette an BZ-Fahrzeugen ist weit weniger umfassend. Aber auch in diesem Marktsegment sind starke Kostenminderungen zu erwarten, welche mit einem erweiterten Angebot einhergehen sollten. Während also die Gasmobilität Stand heute Vorteile hinsichtlich Fahrzeugangeboten und Kosten aufweist, kann aufgrund von Kostendegression zukünftig möglicherweise eine Parität beider Optionen erreicht werden. Dies steht auch im Einklang mit einer aktuellen Untersuchung, welche die TCO u.a. von BZ- und CNG-Bussen vergleicht [73].

Sowohl die H₂- wie auch die Gasmobilität weisen spezifische Vorteile gegenüber Batteriefahrzeugen auf. Insbesondere sind die Eignung für schwere Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen sowie kurze Betankungszeiten positiv zu bewerten.

8.2 Betankungsinfrastruktur

Eine ausreichende Verfügbarkeit von Betankungsinfrastruktur ist eine wesentliche Voraussetzung für den Markterfolg von Fahrzeugen aller Art: nur wenn für den jeweiligen Einsatzzweck angemessene Betankungsmöglichkeiten bestehen, ziehen potentielle Käufer die Anschaffung von Fahrzeugen ernsthaft in Betracht. Dabei sind die Anforderungen verschiedener Kundengruppen sehr unterschiedlich: Während für PKW-Fahrer ein dichtes und zugleich flächendeckendes Tankstellennetz von Bedeutung ist, sind für oftmals an Routen gebundene Nutzfahrzeugeinsätze nur eine geringere Anzahl strategisch, z.B. in Depots oder an Autobahnen, positionierter Betankungsanlagen erforderlich. In allen Fällen unterscheiden sich die Infrastrukturforderungen erheblich.

Neben den marktseitigen Anforderungen sind auch angebotsseitige Faktoren relevant: Die Tankstellen müssen zuverlässig funktionieren und für den Betreiber zumindest längerfristig profitabel sein. Daher werden bei der nachfolgenden Gegenüberstellung der Infrastrukturen für wasserstoff- und gasbetriebene Fahrzeuge neben der nutzergruppenspezifischen Tankstellenverfügbarkeit auch Zuverlässigkeit und Kosten bewertet.

Wie in Kapitel 3 und Abschnitt 6.3 dargestellt, werden in der EU und Deutschland derzeit Tankstellennetze zur Grundversorgung von BZ-betriebenen PKW und Lieferfahrzeugen aufgebaut: In der EU sind Stand April 2019 insgesamt 173 Tankanlagen für Fahrzeuge aller Art in Betrieb und zahlreiche weitere Anlagen im Aufbau. In Deutschland betreibt H₂ Mobility Mitte Januar 2020 81 öffentliche 700-bar-H₂-Tankstellen und realisiert weitere 24 Stationen, so dass zeitnah mindestens 105 Einheiten zur Verfügung stehen werden. Bis 2021 soll das Tankstellennetz auf 140 und bis 2023 auf 400 Einheiten erweitert werden, wobei letzteres Ziel auch von den weiteren Ausbau rechtfertigenden Zulassungszahlen von BZ-Fahrzeugen abhängig gemacht wird. Während Deutschland damit bis heute eine internationale Führungsposition einnimmt, ist die Zahl der Stationen im Vergleich zu den rund 14.000 konventionellen Tankstellen gering [186]. Überdies stellt die Zuverlässigkeit der H₂-Tankstellen noch nicht zufrieden.

Wie unter 6.3 dargelegt, sind aufgrund mangelnder öffentlich zugänglicher Quellen weder die aktuellen Kosten einzelner PKW-Tankstellen noch zukünftig aufgrund von Lernkurven und Skaleneffekten zu erwartende Kostenreduzierungen genau zu bestimmen. Dennoch sind Kosten zwischen 1 und 1,5 Millionen Euro für eine typische H₂-Mobility-Tankstelle plausibel. Die globalen Investitionskosten einer flächendeckenden H₂-Infrastruktur für Deutschland sind Studien zufolge zumindest längerfristig bzw. bei größerer Marktdurchdringung günstiger als die einer vergleichbaren Ladeinfrastruktur für Batteriefahrzeuge [170], [172]. Vom *Forschungszentrum Jülich* werden die kumulierten Kosten einer H₂-Infrastruktur zur Versorgung von 20 Millionen BZ-Fahrzeugen auf 40 Milliarden Euro beziffert [170]. Eine weitere Studie untersucht die Investitionskosten batterieelektrischer, sowie wasserstoff- und EE-Gas-basierter Mobilität. Während die letztere Option bei Betrachtung der gesamten Mobilitäts- einschließlich der Fahrzeugkosten besonders kostengünstig ist, entstehen bei ausschließlicher Betrachtung des Kostenblocks Infrastruktur und Kraftstoff höherer Aufwände als bei den anderen Mobilitätsoptionen [171]. Wie bereits unter 6.4 dargelegt, können aber weder die Infrastrukturkosten klar von anderen Positionen abgegrenzt noch ein methodisch belastbarer Vergleich zu den zuvor referierten Studien hergestellt werden.

Wie in 6.4 aufgezeigt, wird die Betankungsinfrastruktur für schwere BZ-Nutzfahrzeuge und insbesondere Busse bedarfsgerecht v.a. im Rahmen von EU-Projekten aufgebaut und betrieben. Während die oben skizzierte Grundversorgung für PKW aus Nutzersicht noch nicht zufriedenstellt, wird somit eine durchaus angemessene Kraftstoffversorgung für die meist ortsgewundenen oder auf festen Routen verkehrenden Nutzfahrzeugflotten garantiert. Der bislang übliche Druckstandard für schwere BZ-Nutzfahrzeuge ist 350 bar, wobei ein Trend zur 700-bar-Versorgung auch von BZ-LKW entsteht. Infolge von Synergien mit dem PKW-Tankstellennetz könnte dadurch der Infrastrukturaufbau insgesamt wesentlich befördert und Skaleneffekte realisiert werden. Aufgrund der Inanspruchnahme öffentlicher Fördermittel sind Zuverlässigkeit und Kosten der Nutzfahrzeug-Infrastruktur wesentlich besser als bei PKW dokumentiert: Im Falle des 2016 abgeschlossenen CUTE-Projekts der EU lag die Zuverlässigkeit bei 97 Prozent. Die Kosten einer reinen Tankstelle für 50 BZ Busse liegen bei ungefähr 5 Millionen Euro, wird der H₂ vor Ort per Wasserelektrolyse produziert, steigen sie auf etwa 12 Millionen Euro. Angaben zur zukünftigen Kostenentwicklung sind nicht bekannt.

Die derzeitige Betankungsinfrastruktur für brennstoffzellenbetriebene PKW und leichte Nutzfahrzeuge stellt nicht zufrieden und ein weiterer Ausbau ist erforderlich. Allerdings ist unklar, inwieweit angesichts hoher Komponentenkosten und zumindest anfänglich geringer Skaleneffekte in absehbarer Zeit wesentliche Kostenreduzierungen bei 700-bar-Tankstellen zu erwarten sind. Die Befunde der unter 6.3 zum Thema Kostenreduzierung referierten Studien können die Situation nicht vollständig klären: Zwar gehen die Analysen aufgrund von Lern- und Skaleneffekten von zukünftig realisierbaren Kostensenkungen aus, erörtern bzw. quantifizieren Letztere jedoch nicht im Detail. Die Infrastrukturplanungen verschiedener Regionen liefern grobe Anhaltspunkte hinsichtlich in Zukunft entstehender Tankstellennetzwerke und damit verbundener Lern- und Skaleneffekte; belastbare Aussagen zu Kostenentwicklungen lassen sich daraus jedoch nicht ableiten. Allerdings steht fest, dass mit zunehmender Größe einzelner Tankstellen deutliche Kostenreduzierungen je abgegebener Menge H₂ eintreten: wie unter 7.1 rekapituliert, stehen tägliche Durchsätze von 212 kg und Kosten bis zu 1,5 Millionen Euro bei einer PKW-Tankstelle Umsätzen von 1.300 kg und Kosten von 5 Millionen Euro bei Anlagen zur Versorgung von Bussen entgegen.

Derzeit sind in Deutschland etwa 850 CNG-Tankstellen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge in Betrieb. Nach einem Höchststand von 920 Anlagen im Jahr 2014 geht die Anzahl der Tankstellen zurück und ist ein Ausbau des Netzes nicht absehbar. Die technisch reifen und zuverlässigen CNG-Tankstellen bieten Nutzern ein relativ gut ausgebautes Versorgungsnetz. Während nur wenige Anlagen baulich und leistungsbezogen für die Betankung von Bussen und LKW geeignet sind, ermöglicht der bedarfsgerechte Aufbau doch eine zufriedenstellende Versorgung. Die Kosten einer CNG-Tankstelle für PKW liegen bei 320.000 Euro, während für den Bau einer CNG-Tankstelle für Busse 1 bis 1,5 Millionen Euro zu veranschlagen sind [73]. In Deutschland sind bislang 11 LNG-Tankstellen für schwere LKW in Betrieb und sollen, aktuellen Planungen der LNG-Taskforce zufolge, bis 2020 etwa 40 und bis 2025 circa 200 LNG-Tankstellen zur Verfügung stehen [184]. Für eine flächendeckende Versorgung werden 50 Stationen als ausreichend erachtet. Die Kosten einer LNG-Tankstelle liegen bei 530.000 Euro, die Zuverlässigkeit der jungen Technologie stellt bereits zufrieden.

8.3 Akzeptanz gegenüber Fahrzeugen

Auch Akzeptanz ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für Technologien bzw. deren Aneignung durch den Markt. Wie unter 5.5 ausgeführt, kann Akzeptanz in Einstellungs- und Handlungsakzeptanz untergliedert werden. Während Einstellungsakzeptanz im vorliegenden Falle einer Grundeinstellung gegenüber Mobilitätskonzepten gleichkommt, überführt erst Handlungsakzeptanz eine Einstellung in eine handlungsleitende und umsetzungsorientierte Haltung. Handlungsakzeptanz begünstigt konkrete Schritte aktiver Technologieaneignung, wie z.B. den Kauf von Fahrzeugen, sowie passive Akzeptanz z.B. gegenüber H₂- oder Gastankstellen.

Wie in 5.5 dargelegt, ermitteln verschiedene im Bereich H₂ zentrale Studien eine generell hohe Einstellungsakzeptanz von Privatpersonen und kommerziellen Fahrzeugbetreibern gegenüber BZ-Fahrzeugen. Für das positive Technologiebild sind insbesondere die Umweltvorteile einer auf regenerativen Energien beruhenden H₂-Mobilität entscheidend; entgegen einer bei Experten verbreiteten Vermutung sind Sicherheitsbedenken kaum relevant. Demgegenüber ermitteln die Studien eine begrenzte Handlungsakzeptanz, da nur wenige Privatkunden nennenswerte Mehrkosten oder andere Nachteile akzeptieren würden. Gewerbliche Akteure sind einerseits besonders kostensensitiv, andererseits aber auch anderen ‚harten‘ Argumenten wie Regularien gegenüber empfänglich.

Sofern Kosten und Leistungsmerkmale der H₂-Mobilität mit konventioneller Mobilität vergleichbar wären, würden über 60 Prozent der EU-Bürger ein BZ-Fahrzeug kaufen. Der Wissensstand zur H₂-Mobilität ist generell gering und eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit wird seitens der Studien empfohlen. Überdies ist festzustellen, dass deutsche Automobilunternehmen sich bislang wenig für BZ-Fahrzeuge engagieren, was in einem mangelnden Modellangebot und damit verbundenen Akzeptanzproblemen potenzieller Käufer resultieren kann. Allerdings übersteigt bis jetzt die Fahrzeugnachfrage das Angebot und sind entsprechende Akzeptanzdefizite nicht zu erkennen.

Die Situation bei Gasfahrzeugen ist ähnlich gelagert: Während gasbetriebene PKW nur im begrenzten Umfang vom Markt angenommen wurden, scheint dies zu nicht unerheblichen Teilen angebotsseitig bedingt zu sein. Seitens der Fahrzeughersteller wird nur eine begrenzte und wenig beworbene Modellpalette angeboten. Gasbusse erfahren in der Bevölkerung eine hohe Akzeptanz, wie Befragungen von Busbetreibern belegen: positiv werden u.a. Emissionsarmut und geringe Fahrgeräusche gewertet [73]. Insgesamt ergibt sich ein positives Bild der Akzeptanz gegenüber CNG-Antrieben.

8.4 Nachhaltigkeit der Antriebskonzepte

Angesichts des hohen politischen Stellenwerts des Klimaschutzes und lokaler Emissionsreduzierungen ist die Nachhaltigkeit von Antriebskonzepten von großer Bedeutung für die Einschätzung zukünftiger Marktperspektiven. Einschränkend ist jedoch festzustellen, dass letztlich nicht die Umwelteigenschaften an sich, sondern deren Umsetzung in rechtlich bindende Regularien entscheidend sind. Während die nachfolgend dargestellten Parameter eigenständige Aussagekraft besitzen, stehen die festgestellten Umweltwirkungen nicht immer im Einklang mit der herrschenden Gesetzgebung.

Die von der Energiewende verlangte Integration erneuerbarer Energien auch in den Verkehrssektor ist ein wichtiger Nachhaltigkeitsaspekt. Wie unter 4.1, 5.6 und 6.1 dargestellt, wird H₂ für den Verkehr zunehmend auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt und die Einbringung von EE zugleich von der Renewable Energy Directive gefordert. Auch seitens der Gasmobilität können EE mittels Biogas und per Methanisierung aus H₂ und CO₂ hergestelltem synthetischem Erdgas als Kraftstoff genutzt werden [182], [171]. Sowohl die H₂- wie auch die Gasmobilität können bis zu 100 Prozent auf EE basieren.

Die Verminderung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen ist primär aus gesundheitlichen Gründen ein weiteres wichtiges Nachhaltigkeitsziel im Verkehrsbereich. Eine Reihe europäischer Gesetze wurde dazu erlassen und limitiert insbesondere die Schadstoffe Stickoxid und Feinstaub, aber auch Lärm. Wie in 5.6 dargestellt, stoßen BZ-Fahrzeuge keinerlei lokalen Emissionen aus und verursachen, bedingt durch den Elektromotor, kaum Geräusche. Aber auch Gasfahrzeuge weisen gegenüber konventionellen Verbrennern stark reduzierte Stickoxid-, Feinstaub- und Lärmemissionen auf. Beispielsweise liegen die NO_x-Emissionen eines LNG-LKW 40 Prozent unter denen eines Euro VI-Diesel-LKW, während Feinstaub und Lärmemissionen um etwa 90 bzw. 50 Prozent reduziert werden [73].

Während der heutigen Gesetzgebung Tank-to-Wheel-Analysen zugrunde liegen und nur die während der Fahrt anfallenden Abgase erfassen, sind für eine realitätsnähere Emissionserhebung andere Verfahren vonnöten: Wie unter 5.6 erläutert, berücksichtigen Well-to-Wheel-Analysen auch die bei der Bereitstellung der Kraftstoffe entstehenden Emissionen und eignen sich zur Bestimmung der Treibhausgasintensität. Vor diesem Hintergrund weisen die unter 5.6 referierten WtW-Analysen sehr geringe THG-Emissionen sowohl für BZ- wie auch CNG-PKW auf, sofern die Kraftstoffe auf EE-Basis hergestellt werden.³ Bei Nutzung fossiler Energien zur Kraftstoffherstellung verschlechtert sich die WtW-Bilanz insbesondere der Gasfahrzeuge deutlich. Zudem weisen Gasfahrzeuge generell einen wesentlich höheren Energiebedarf auf, was angesichts begrenzter erschlossener EE-Potenziale nicht unbedenklich ist. Eine Studie des DVGW [73] bestätigt die obigen Ergebnisse im Wesentlichen für Busse, obgleich zusätzlich zu den WtW-Analysen auch die energetischen Aufwände der Herstellung der Brennstoffzellen und Batterien von BZ-Bussen, nicht aber die entsprechenden Aufwände für den Bau der Motoren von Gasbussen, berücksichtigt wurden [73]. In jedem Fall weisen BZ- wie auch Gasbusse deutlich geringere WtW-Emissionen als Dieselbusse auf.

8.5 Eignung zur Erfüllung regulativer Vorgaben

Regulative Vorgaben sind ausgesprochen wichtige Einflussfaktoren für die Zukunftschancen jeglicher Antriebskonzepte. Aufgrund ihres im Regelfall rechtlich bindenden Charakters können sich angebots- und nachfrageseitige Akteure der Umsetzung kaum entziehen. Nachfolgend wird die Eignung der H₂- und der gasbasierten Mobilität zur Erfüllung der beiden wichtigsten unter 4.1 behandelten EU-Regularien erörtert.

Wie in 4.1 dargelegt, legen verschiedene EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen strenge Flottengrenzwerte fest: Ab 2021 dürfen die Flottenemissionen neuer PKW einen Wert von 95 g/km nicht überschreiten und bereits 2020 wird für leichte Nutzfahrzeuge ein Grenzwert von 147 g/km verpflichtend. Im Zuge einer weiteren Verschärfung müssen die PKW-CO₂-Emissionen bis 2025 um 15 und bis 2030 um 37,5 Prozent gegenüber 2021 vermindert werden. Leichte Nutzfahrzeuge müssen zeitgleich Emissionsreduzierungen von 15 bzw. 31 Prozent erreichen. Überdies sehen erstmals festgelegte CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge gegenüber 2019 erhebliche Emissionsminderungen von 15 Prozent im Jahr 2025 und um 30 Prozent 2030 vor. Bei Nichterreichung der Zielwerte werden empfindliche und zunehmend strenger gehandhabte Strafzahlungen für die jeweiligen Fahrzeughersteller fällig.

Als gemäß herrschender TtW-Gesetzgebung für emissionsfreie Fahrzeuge können sowohl BZ-PKW wie auch BZ-Nutzfahrzeuge die zukünftigen strengen Anforderungen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen problemlos erfüllen. Demgegenüber können, trotz deutlich geringeren CO₂-Ausstosses als konventionelle Verbrenner, nur einzelne Gasfahrzeuge die o.g. und ab 2021 bzw. 2020 gültigen Grenzwerte für PKW und leichte Nutzfahrzeuge einhalten [187]. Auch die für 2025 und 2030 geforderten CO₂-Reduzierungen für PKW und Nutzfahrzeuge sind mit Gasantrieben nicht zu erreichen. Dies gilt selbst dann, wenn Biogas oder EE-basiertes synthetisches Erdgas verwendet wird, da die auf dem TtW-Ansatz beruhenden Regularien dessen CO₂-Neutralität nicht berücksichtigen.

³ Ein für alle erneuerbare Kraftstoffe einschließlich von EE-H₂ und EE-Gas wesentlicher Aspekt ist, dass sie gemäß der unter 4.1 referierten Renewable Energy Directive bei WtW-Analysen als THG-neutral zu werten sind, da weder bei EE-Kraftstoffen biogenen noch nicht-biogenen Ursprungs anthropogen verursachte THG-Emissionen in die Atmosphäre eingetragen werden [73].

Die Zugrundelegung eines TtW-Ansatzes ergibt ein verzerrtes Bild der Umweltauswirkungen von Antriebskonzepten, da nur die im Fahrbetrieb entstehenden Abgase berücksichtigt werden. Die bei der Bereitstellung der Kraftstoffe entstehenden sowie die mit der Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge verbundenen Umweltbelastungen werden vernachlässigt. Durch die Nutzung von Biogas oder synthetischem Erdgas können bis zu 80-prozentige CO₂-Minderungen gegenüber fossilen Kraftstoffen erreicht werden [182]. Die gegenwärtige Gesetzgebung schließt aber eine Berücksichtigung solcher weitreichenden Potenziale zur Reduzierung von THG-Emissionen aus. Um entsprechende Umweltvorteile auch regulativ zu würdigen, wäre eine Zugrundelegung von WtW-Ansätzen oder Lebenszyklusanalysen erforderlich [171]. Beide Ansätze ermöglichen eine technologie neutrale Bewertung aller Antriebsoptionen und der mit ihnen verbundenen Umwelteffekte. Daher wird die Zugrundelegung entsprechender Methoden bei zukünftigen Gesetzgebungsprozessen in Kapitel 9 empfohlen.

Die unter 4.1 diskutierte Clean Vehicles Directive der EU zielt auf die Beschaffung von Niedrig- und Nullemissionsfahrzeugen wie durch bestehende Gesetzgebung definiert. Hauptadressat sind die in Mitgliedsstaaten ansässigen öffentlichen Behörden und Unternehmen. Der CVD zufolge müssen in Deutschland 38,5 Prozent der öffentlich beschafften leichten Nutzfahrzeuge ab 2021 unter 50 g CO₂/km ausstoßen und ab 2026 komplett emissionsfrei sein. Ab 2021 müssen 10 Prozent der LKW und 45 Prozent der Stadtbusse unter 1 g CO₂/km emittieren und ab 2026 Anteile von 15 bzw. 65 Prozent erreichen. Überdies müssen von Beginn an 50 Prozent der Busse emissionsfrei sein. Dabei sind die Vorgaben als Mindestquoten zu verstehen und müssen teils auch von Privatunternehmen eingehalten werden.

Analog zu den Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen können lediglich BZ-Fahrzeuge die Vorgaben der CVD erfüllen. Gasfahrzeuge werden vom Wettbewerb ausgeschlossen. Dabei gilt die gleiche Kritik am TtW-Ansatz der zugrundeliegenden Regularien: trotz klarer Umweltvorteile können Gasfahrzeuge nicht auf die CVD-Quoten angerechnet werden. Auch hier wären WtW-Ansätze oder Lebenszyklusanalysen angebracht.

Im Hinblick auf die anspruchsvollen und mit deutlichen Mehrkosten gegenüber fossilen Referenztechnologien verbundenen Vorgaben zur CO₂-Reduzierung und Fahrzeugbeschaffung stellt sich die Frage, was im Falle der Nichterfüllung durch die Regulierten geschehen würde. Im Falle der CO₂-Regularien ist auf die für Automobilhersteller vorgesehenen Strafzahlungen zu verweisen. Beispielsweise müsste Volkswagen einer Studie zufolge bei Fortsetzung laufender Trends 1,4 Milliarden Euro für die Überschreitung der PKW-Grenzwerte für 2021 bezahlen. Bei Nichterfüllung der CVD ist mit EU-Vertragsverletzungsverfahren zu rechnen, wie sie in den vergangenen Jahren angesichts der Verfehlung von Immissionsvorgaben eingeleitet wurden und zu Fahrverboten in deutschen Städten führten.

8.6 Fazit zu Marktperspektiven

Die aktuelle marktliche Verfügbarkeit von Gasfahrzeugen übertrifft die der BZ-Fahrzeuge bei weitem: 90.000 CNG-PKW stehen 500 BZ-Autos in Deutschland entgegen. Während CNG-Busse und LKW hierzulande Marktanteile im niedrigen einstelligen Prozentbereich erreichen, sind EU-weit weniger als 100 BZ-Busse und LKW in Betrieb. Die Kosten der Gasfahrzeuge liegen deutlich unter denen ihrer BZ-Pendants und bei LKW ist ein klarer Vorsprung der Gasfahrzeuge in Punkto technischer Reife zu verzeichnen. Beim Vergleich zwischen LNG- und BZ-LKW ist kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der drei Vergleichsparameter Verfügbarkeit, technische Reife und Kosten zu erkennen.

Die zukünftige Entwicklung ist kaum absehbar und von Ungewissheit über die Strategien der Fahrzeughersteller und ihrer Technologiepräferenzen geprägt. Die Kosten der konkurrierenden Antriebsoptionen werden jedoch sicherlich von zentraler Bedeutung sein. Angesichts der großen Kostenreduktionspotenziale von BZ-Fahrzeugen aller Klassen könnte es vor 2030 zu einer Kostenparität zwischen H₂- und Gasmobilität kommen, die mit einer vergleichbaren Marktverfügbarkeit der bis dahin technologisch gleichermaßen ausgereiften Mobilitätsoptionen einhergehen sollte. Bei Eintritt einer Kostenparität wären die nachfolgend diskutierten Vergleichsparameter für die Zukunftsperspektiven der Antriebsalternativen entscheidend. Als aktueller Trend ist eine dynamische Entwicklung bei schweren BZ- und LNG-Nutzfahrzeugen zu verzeichnen, während die Anzahl von CNG-Fahrzeugen stagniert.

Der Vergleich der Betankungsinfrastrukturen zeigt ein unausgewogenes Bild. Derzeit stehen etwa 850 CNG-Tankstellen für PKW 81 bzw. demnächst 105 Tankstellen für BZ-PKW gegenüber. Allerdings folgt die Anzahl ersterer einer sinkenden und die letzterer Tankstellen einer steigenden Tendenz; bei ausreichender Kraftstoffnachfrage könnten 2023 etwas halb so viele H₂-Tankstellen wie CNG-Stationen bestehen. Bis dahin allerdings bietet die deutlich besser ausgebaute Infrastruktur einen Wettbewerbsvorteil der Gas- gegenüber der H₂-Mobilität. Überdies ist die Zuverlässigkeit von CNG-Tankstellen höher und sind die Kosten niedriger als bei H₂-Tankstellen. Dabei bleibt abzuwarten, in welchem Maße die Verlässlichkeit und Kostensituation letzterer Tankstellen verbessert werden kann. Sowohl die Anzahl von CNG/LNG- wie auch H₂-Tankstellen für Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge ist gering und wird zunächst nur moderat steigen. Da aber beide Tankstellenarten bedarfsgerecht aufgebaut werden, wird eine ausreichende Infrastrukturabdeckung gewährleistet und ziehen beide Optionen voraussichtlich gleich. Hinsichtlich Kosten und Zuverlässigkeit sind LNG-Tankstellen gegenüber H₂-Tankanlagen im Vorteil.

Die nutzerseitige Akzeptanz gegenüber beiden Mobilitätskonzepten erscheint ähnlich: sowohl BZ- wie auch Gasfahrzeuge werden von Befragten begrüßt. Die Akzeptanz gründet sich wesentlich auf die Umweltfreundlichkeit beider Technologien, führt aber nicht unbedingt zur aktiver Technologieaneignung bei Inkaufnahme z.B. finanzieller Nachteile.

Wie die Gegenüberstellung der Nachhaltigkeit der Antriebskonzepte ergibt, können die H₂- wie auch die Gasmobilität die gebotene Integration erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor gleichermaßen gewährleisten. Überdies können BZ-Fahrzeuge die Anforderungen zur Verminderung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen vollkommen erfüllen. Während Gasfahrzeuge Dieselfahrzeugen diesbezüglich weit überlegen sind, erreichen sie nicht die Standards der H₂-Mobilität. Beim WtW-Vergleich liegen die THG-Emissionen von BZ- und Gasfahrzeugen nahe beieinander, obgleich der Energieverbrauch der Gasmobilität höher ist. Insgesamt erweisen sich BZ-Fahrzeuge als die nachhaltigere Alternative.

Die Bewertung der Eignung von H₂- und Gasmobilität zur Erfüllung regulatorischer Vorgaben zeigt klar, dass nur BZ-Antriebe von den Regularien profitieren: Sowohl die EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen wie auch die CVD schaffen Märkte für BZ-Fahrzeuge, da gemäß den der Gesetzgebung zugrundeliegenden TtW-Ansätzen nur elektrifizierte Antriebe den Vorgaben entsprechen. Gasfahrzeuge und die von ihnen angebotenen kurzfristig verfügbaren Optionen zur Reduktion von THG-Emissionen werden vom Wettbewerb um die Märkte der Zukunft ausgeschlossen.

Eine Vorteilhaftigkeit von Batterie- gegenüber Gasfahrzeugen im WtW- oder Lebenszyklusvergleich ist keineswegs gesetzt und muss aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten hinterfragt werden. Bei gleichberechtigtem und technologieneutralem Marktzugang könnten Gasfahrzeuge elektrische Antriebsoptionen sinnvoll und v.a. im Bereich schwerer Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen ergänzen.

9 Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H₂-Mobilität

Das Kapitel entwickelt auf Grundlage von Kapitel 4 und anderen Studienbefunden Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H₂-Mobilität. Insbesondere werden bereits angesprochene und der Kommerzialisierung entgegenstehende regulative Defizite adressiert. Die Handlungsvorschläge richten sich an die öffentliche Hand und beziehen sich primär auf Deutschland, schließen aber europäische Aspekte maßgeblich mit ein. Die bisherigen Befunde dieser Studie werden um Ergebnisse des EU-Projekts HyLaw ergänzt, das den für die Markteinführung von H₂- und BZ-Technologien relevanten regulativen Rahmen europaweit analysiert. HyLaw identifiziert auch für Deutschland die einer Kommerzialisierung der H₂-Mobilität entgegenstehenden Barrieren und empfiehlt Maßnahmen zu deren Beseitigung. Ergänzend werden die Handlungsempfehlungen anderer Studien zitiert.

Grundlegend ist die Feststellung, dass die H₂-Mobilität große ökologische und ökonomische Potenziale bietet, die jedoch v.a. aufgrund noch nicht wettbewerbsfähiger Kosten bislang nur ansatzweise realisiert werden können. Als eine insbesondere für schwere Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen vorteilhafte Antriebsalternative ist die H₂-basierte Mobilität eine für das Gelingen der Energiewende und die Erreichung der Klimaschutzziele unerlässliche Technologieoption. Nichtsdestotrotz wird BZ-Fahrzeugen eine Batterieautos vergleichbare politische Unterstützung verwehrt: So dominierten z.B. beim Autogipfel der Bundesregierung vom November 2019 Batteriefahrzeuge einmal mehr die Debatte [188]. Im Sinne einer technologieneutralen Förderung nachhaltiger Antriebe plädiert diese Studie, im Einklang mit anderen Analysen [145], [65], für eine gleichberechtigte Behandlung aller relevanten Mobilitätsoptionen. Die aus Sicht der Studie angezeigten Handlungsempfehlungen werden nachfolgend hergeleitet und vorgestellt.

9.1 Zugrundelegung von Well-to-Wheel- oder Lebenszyklusansätzen

Wie unter 4.1 und 8.5 diskutiert, legen EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen von PKW und Nutzfahrzeugen strenge Flottengrenzwerte fest. Insbesondere die für 2025 und 2030 geplanten Grenzwerte sind mit konventionellen Motoren nicht erreichbar und erfordern den Einsatz alternativer Antriebe. Überdies verpflichtet die Clean Vehicles Directive Behörden und öffentliche Unternehmen zur Beschaffung von Niedrig- und Nullemissionsnutzfahrzeugen. Brennstoffzellenfahrzeuge können die Vorgaben problemlos erfüllen und die genannten Regularien sind daher als starke Treiber der H₂-Mobilität zu begrüßen.

Allerdings ist die Zugrundelegung einer Tank-to-Wheel-Methodik bei der Erfassung der regulierten Emissionen in den Gesetzen bedenklich, da diese nur die im Fahrbetrieb entstehenden Abgase berücksichtigt. Wie unter 5.6 erörtert, werden die bei der Bereitstellung der Kraftstoffe entstehenden sowie die mit der Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge verbundenen Umweltbelastungen vernachlässigt. Dadurch entsteht ein verzerrtes Bild der Umweltauswirkungen. Durch Zugrundelegung von Well-to-Wheel- oder Lebenszyklusansätzen ist eine realitätsnähere Erfassung der Nachhaltigkeit von Antriebssystemen möglich.

Im Einklang mit anderen Studien [171], [160] wird daher empfohlen, bei zukünftigen Abgasgesetzgebungsverfahren Well-to-Wheel- oder Lebenszyklusansätze zugrunde zu legen.

9.2 Schaffung eines Herkunftsnachweissystems für H₂

Die Renewable Energy Directive der EU schreibt vor, dass zukünftig 14 Prozent des Kraftstoffs für den Verkehr erneuerbaren Ursprungs sein müssen und erkennt H₂ aus regenerativem Strom wie auch daraus synthetisierte Treibstoffe als anrechnungsfähige EE-Kraftstoffe an. Zudem erfordert die Fuel Quality Directive eine Reduzierung des CO₂-Gehalts von Kraftstoffen und lässt CO₂-armen H₂ als einen auf die Vorgabenerfüllung anrechenbaren Treibstoff zu. Somit begünstigen beide Richtlinien die Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität.

Allerdings bestehen HyLaw zufolge noch Defizite bei der Umsetzung der Regularien [63]: Insbesondere gibt es bislang weder auf europäischer noch auf deutscher Ebene ein Herkunftsnachweissystem für erneuerbaren und CO₂-armen Wasserstoff, das einen zuverlässigen Nachweis des erneuerbaren Ursprungs und eine entsprechende Anrechnung auf Quoten gewährleisten kann. Zudem wird der Handel mit H₂ erheblich erschwert und sind z.B. perspektivisch relevante Importe von EE-H₂ als anrechenbarer Kraftstoff kaum möglich. Wie in Kapitel 4 angesprochen, wird daher die Schaffung eines Herkunftsnachweissystems für erneuerbaren und CO₂-armen H₂ nicht nur in Deutschland, sondern EU-weit als besonders dringliche Aufgabe betrachtet [23], [29], [40].

Zur Gewährleistung von Anrechnung und Handel von erneuerbarem und CO₂-armen H₂ als Kraftstoff wird empfohlen, ein Herkunftsnachweissystem für derartigen H₂ zu etablieren.

9.3 Ambitionierte Umsetzung der AFID

Wie in 4.1 dargelegt, ruft die Alternative Fuels Infrastructure Directive die EU-Mitgliedsstaaten zur freiwilligen Erarbeitung nationaler Strategien für den Auf- bzw. Ausbau von Wasserstoffinfrastrukturen auf. Die Richtlinie stärkt das politische Gewicht der H₂-Mobilität, bleibt aber ohne bindende Wirkung. 14 von 28 Mitgliedsstaaten sind dem Aufruf gefolgt.

HyLaw empfiehlt, einerseits alle Mitgliedsstaaten zur Entwicklung entsprechender Strategien zu ermutigen und andererseits, die Strategien ambitioniert auszugestalten. Dadurch soll insbesondere die europaweite Nutzung von BZ-Fahrzeugen gewährleistet werden [40], [65].

In Übereinstimmung mit HyLaw wird nahegelegt, gegenüber allen EU-Mitgliedsstaaten auf die Erstellung ehrgeiziger Strategien für den Auf- bzw. Ausbau von H₂-Infrastrukturen zu dringen.

9.4 Optimierung der Genehmigungsverfahren für H₂-Tankstellen

Wie unter 4.7 erläutert, sind neben den eigentlichen EU-Gesetzen auch nachgeordnete, umsetzungsbezogene Detailregelungen von Belang. Dazu gehört das bereits abgehandelte Nachweissystem für erneuerbaren und CO₂-armen Wasserstoff. Daneben sind Genehmigungsprozesse für Tankstellen, sowie die Qualitäts- und Mengenmessung des abzugebenden H₂ als verbleibende Problemfelder für die Kommerzialisierung der H₂-Mobilität bekannt.

Im europäischen Vergleich verfügt Deutschland über den am weitesten entwickelten Genehmigungsrahmen für H₂-Tankstellen [63]. Dennoch sind weitere Optimierungen hinsichtlich der

Vereinheitlichung verschiedener Bestimmungen und einer Beschleunigung der Genehmigungsprozesse erforderlich [145]. Dies bezieht sich auch auf Vorgaben der EU und legt letztendlich eine Harmonisierung der Umsetzungsbestimmungen auf verschiedenen Ebenen nahe.

Die Qualitätsbestimmung wie auch Mengenmessung des an Tankstellen abzugebenden H₂ stellen nicht unerhebliche technische Herausforderungen dar. In beiden Fällen wird an alltags-tauglichen Lösungen gearbeitet, die schlussendlich in Umsetzungsbestimmungen für den kommerziellen Tankstellenbetrieb überführt werden müssen [63], [65].

Die Studie empfiehlt, die Genehmigungsprozesse für H₂-Tankstellen zu optimieren und Regulierungsverfahren zur Qualitäts- wie auch Mengenmessung von H₂ voranzutreiben.

9.5 Förderung von Marktaktivierung und F&E für BZ-Fahrzeuge

Die oben diskutierten und teils sehr ehrgeizigen EU-Regularien schaffen Märkte für BZ-Fahrzeuge. Allerdings sind, wie in Kapitel 5 dargestellt, die Anschaffungskosten der Fahrzeuge bislang hoch und besteht in einzelnen Segmenten noch technologischer Entwicklungsbedarf. Daher ist davon auszugehen, dass die Vorgaben insbesondere zur CO₂-Reduzierung und zur Beschaffung von Niedrig- und Nullemissionsfahrzeugen nur mit Unterstützung der öffentlichen Hand erreicht werden können. Wie an zahlreichen Stellen dieser Studie dargelegt, haben sich von der EU sowie deren Mitgliedsstaaten teilfinanzierte Maßnahmen als wirksame Treiber der Technologieentwicklung und frühen Kommerzialisierung erwiesen.

Im Einklang mit anderen Studien [171], [65] wird daher empfohlen, die auf europäischer wie auch deutscher Ebene staatlicherseits bereitgestellten Förderangebote für Marktaktivierung und technologische Weiterentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen fortzuführen.

Dabei ist der zeitliche und finanzielle Förderumfang dahingehend zu begrenzen, dass die Schwelle zum Markteintritt zwar überwunden, die nachfolgende Entwicklung eines selbsttragenden Marktes aber ausschließlich den wirtschaftlichen Akteuren überantwortet wird.

Da Skaleneffekte der wirksamste Hebel zur Kostensenkung und damit breiten Kommerzialisierung BZ-betriebener PKW und Busse sind, empfiehlt sich auch eine nachfrageseitige Marktaktivierung durch die öffentliche Hand. Mittels Beschaffungsprogrammen für BZ-Fahrzeuge ebenso wie durch die Bildung von Einkaufsgemeinschaften können Behörden und öffentliche Unternehmen maßgeblich zur Kommerzialisierung der H₂-Mobilität beitragen [102].

Daher wird der öffentlichen Hand nahegelegt, den Markthochlauf von BZ-Fahrzeugen durch Beschaffungsprogramme und Einkaufsgemeinschaften zu unterstützen.

9.6 Förderung von Marktaktivierung und F&E für H₂-Infrastruktur

Wie in den Abschnitten 3.1, 3.2 und 6.3 dargelegt, wird in Deutschland wie Europa auch die Technologieentwicklung und Kommerzialisierung von H₂-Infrastrukturen staatlicherseits finanziell unterstützt. Als unabdingbarer Bestandteil der H₂-Mobilität bedürfen die Infrastrukturen einer den Fahrzeugen vergleichbaren Unterstützung. Daher wird analog für die Fortführung der Fördermaßnahmen plädiert:

Im Übereinstimmung mit anderen Analysen zur H₂-Infrastruktur [189], [156] wird empfohlen, die auf europäischer und deutscher Ebene bereitgestellten Förderangebote für Marktaktivierung und technologische Weiterentwicklung von H₂-Infrastrukturen fortzuführen.

Als Teil dieser Maßnahmen sollte die in Deutschland und Europa gängige Förderung von Investitionskosten von Infrastrukturelementen einschließlich von Tankstellen und Wasserelektrolyseuren fortgesetzt werden. Allerdings werden die Gestehungskosten von H₂ im Wesentlichen nicht von den Investitions-, sondern von Betriebskosten geprägt. Wie in 6.1 erwähnt, werden die Kosten von per Elektrolyse hergestelltem H₂ maßgeblich durch die Strombezugpreise mitbestimmt. Gerade die verhältnismäßig hohen Kosten von H₂ stellen jedoch für die Betreiber von BZ-Fahrzeugflotten eine ernstzunehmende Beeinträchtigung dar [102], [110]. Diesbezüglich kann ein in Frankreich entwickeltes Instrument Abhilfe schaffen, dass die Mehrkosten elektrolytisch und auf EE-Basis hergestellten Wasserstoffs gegenüber aus Erdgas gewonnenem H₂ ausgleicht [16].

Daher wird vorgeschlagen, die in Deutschland und Europa vorherrschende Förderung von Investitionskosten von Infrastrukturen um eine Subventionierung von Betriebskosten zu ergänzen, welche im Falle der elektrolytischen und EE-basierten Herstellung von H₂ die Mehrkosten gegenüber aus Erdgas gewonnenem H₂ zumindest teilweise ausgleicht.

Wie bei allen von dieser Studie empfohlenen Fördermaßnahmen ist der zeitliche und finanzielle Umfang zu begrenzen. Die Förderung sollte die zu Beginn des Markteintritts hohen Mehrkosten gegenüber konventionellen Referenztechnologien mindern und so die Entstehung eines wirtschaftlich selbsttragenden Marktes ermöglichen. Mit zunehmender Marktfähigkeit ist die Förderung zu reduzieren und letztendlich zu beenden.

In Deutschland sind auf per Elektrolyse hergestellten Wasserstoff erhobene Umlagen, Abgaben und Steuern von herausragender Bedeutung für die H₂-Gestehungskosten. Die hohen Belastungen sind vorrangig auf das *Erneuerbare-Energien-Gesetz* zurückzuführen und verteuern in den meisten Fällen die H₂-Produktion erheblich. Die Literatur stimmt weitestgehend darin überein, dass die Aufwendungen einen wirtschaftlichen Betrieb von PtX-Anlagen zur Gewinnung von EE-H₂ für den Verkehr unmöglich machen. Daher wird von vielen Seiten die vollständige oder teilweise Befreiung von den Umlagen, Abgaben und Steuern gefordert [63], [156], [171], [110].

Im Konsens mit zahlreichen relevanten Akteuren wird deshalb empfohlen, die hohen beim Betrieb von PtX-Anlagen anfallenden Umlagen, Abgaben und Steuern erheblich zu reduzieren, um so eine ökonomisch tragfähige Herstellung von EE-H₂ für den Verkehr zu ermöglichen.

Darüber hinaus sind übergreifende Marktaktivierungsprogramme für PtX-Anlagen und PtX-Produkte relevant, wie sie z.B. durch eine Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse [156] und die Stakeholder-Initiative *Power-to-X-Allianz* [189] konzipiert wurden. Durch die Kombination und Bündelung der oben beschriebenen sowie ergänzender Maßnahmen werden integrierte Gesamtkonzepte der Marktaktivierung geschaffen, welche die H₂-Mobilität kraftstoffseitig wesentlich befördern könnten.

Die Entwicklung übergreifender Marktaktivierungsprogramme für PtX-Anlagen und PtX-Produkte sollte unterstützt werden und ggf. in praktischer Umsetzung münden.

9.7 Restriktive Maßnahmen

Letztlich sind neben der Technologieförderung auch restriktive Maßnahmen für den Markterfolg der H₂-Mobilität von Bedeutung: Wie dargelegt, sind diesbezüglich insbesondere die EU-Richtlinien zur CO₂-Reduzierung und zur Beschaffung von Niedrig- und Nullemissionsfahrzeugen hochrelevant. Darüber hinaus wurde in Kapitel 4 festgestellt, dass in allen untersuchten europäischen Ländern bis auf Deutschland restriktive Vorgaben als wesentliche Treiber für den Markteintritt von BZ-Fahrzeugen wirken. So tragen Einfahrverbote für Verbrennerfahrzeuge in urbanen Räumen sowie anspruchsvolle politische Ziele zum Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen erheblich zur Innovationsdynamik der H₂-Mobilität bei.

Daher wird empfohlen, ergänzend zur Technologieförderung auch den Einsatz restriktiver Maßnahmen im Sinne der Kommerzialisierung der H₂-Mobilität zu prüfen. Beispielsweise könnten sich Fahrverbote für ältere Verbrennerfahrzeuge mit höheren Schadstoff- und Lärmemissionen in stark belasteten Innenstädten als wirksame Mittel des Umwelt- und Gesundheitsschutzes ebenso wie als wirksame Treiber der H₂-basierten Mobilität erweisen. Im Sinne des Klimaschutzes sollten durch entsprechende Maßnahmen jedoch nicht allein die Reduzierungen lokaler Emissionen, sondern auch die Verminderung globaler CO₂-Emissionen angestrebt werden. Bei der Definition restriktiver Maßnahmen sollten die zugrunde gelegten Well-to-Tank-Analysen um Well-to-Wheel-Bewertungen ergänzt werden.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Kapitel fasst die Studieninhalte zusammen und interpretiert deren Ergebnisse als Grundlage eines abschließend präsentierten Fazits. Die Studie wurde vom DVGW beauftragt, um ein besseres Verständnis der H₂-basierten Mobilität zu erlangen und die vom Verband vertretenen Akteure über die mit dem Aufkommen der H₂-Mobilität verbundenen Marktperspektiven zu informieren: Erweist sich die H₂-Mobilität als vielversprechende Zukunftsoption, entstehen lukrative Märkte für H₂ als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge, für deren Bedienung die Gasindustrie gut positioniert ist. Die Studie analysiert Stand, Trends und Perspektiven der H₂-Mobilität und zeigt die für die Gasindustrie entstehenden Marktchancen auf.

10.1 Zusammenfassung und Ergebnisinterpretation

Kapitel 3 liefert einen Überblick zur H₂-Mobilität in der Europäischen Union und ausgewählten Ländern. Die EU ist sowohl hinsichtlich von Technologieförderung wie auch Gesetzgebung zentral. Für die Jahre 2014 bis 2020 ist ein Budget von mindestens 1,3 Milliarden Euro für die Förderung von H₂- und BZ-Technologien vorgesehen, von dem etwa die Hälfte der H₂-Mobilität zugutekommt. Damit werden Demonstrations- und F&E-Projekte in den Bereichen BZ-betriebene PKW, Busse und LKW, sowie H₂-Infrastruktur gefördert und die Beschaffung technisch reifer Produkte subventioniert. Im April 2019 waren in der EU etwa 1.500 BZ-PKW in Betrieb und die Beschaffung weiterer 1.400 Fahrzeuge geplant, flankiert von 173 einsatzbereiten und 50 in Realisierung befindlichen H₂-Tankstellen.

Deutschland ist in Europa ein Vorreiter der H₂- Mobilität und stellt durch das seit 2006 laufende Programm NIP für den Zeitraum 2016 bis 2026 voraussichtlich 1,4 Milliarden Euro für die Technologieförderung zur Verfügung. Der Verkehrsbereich absorbiert einen Großteil des Budgets und umfasst Demonstrations- und F&E-Projekte ebenso wie Maßnahmen der Marktaktivierung. Im Leuchtturmprojekt Clean Energy Partnership wurden bis 2016 über 100 BZ-PKW und Busse samt H₂-Infrastruktur erprobt; die Industrieinitiative H₂ Mobility baut heute das frühkommerzielle Tankstellennetz für BZ-PKW weiter aus. Im April 2019 waren 505 BZ-Autos und 64 H₂-Tankstellen in Betrieb; attraktive Fördermaßnahmen und konkrete Industrieplanungen lassen einen starken Zuwachs erwarten.

Frankreich engagiert sich seit 2016 verstärkt für Wasserstoff und Brennstoffzellen und stellt ambitionierte Zielsetzungen für die H₂-Mobilität auf: Bis 2023 sollen 5.000 leichte und 200 schwere BZ-Nutzfahrzeuge im Land unterwegs sein, bis 2028 sollen die Flotten auf bis zu 50.000 leichte bzw. 2.000 schwere Fahrzeuge wachsen; flankiert von einer bedarfsgerecht ausgebauten Infrastruktur. Während im Oktober 2018 nur 324 BZ-PKW und 1 BZ-LKW in Betrieb waren, ist heute ein Flottenaufwuchs auf 1.600 PKW und 8 BZ-Busse allein im Rahmen verschiedener EU-Projekte konkret absehbar.

Das Vereinigte Königreich setzt seine langjährige Unterstützung der H₂-basierten Mobilität fort und ließ verschiedene Strategiepapiere erarbeiten. Als ehrgeizigste Zielvorstellungen wurde der Aufbau von 330 H₂-Tankstellen bis 2025 und 1.150 Stationen bis 2030 kommuniziert, wobei die derzeitige nationale Technologieförderung diese Ambitionen nur ansatzweise unterstützt. Im Dezember 2018 waren 100 BZ-PKW und 20 EU-geförderte BZ-Busse in Betrieb und die Beschaffung weiterer 73 PKW und 53 Busse geplant.

Die Niederlande gelten traditionell als starke Förderer der H₂-Mobilität und verleihen ihrem Engagement derzeit neue Dynamik: In zentralen Dokumenten der Klimaschutzpolitik wird Wasserstoff eine bedeutsame Rolle für die Realisierung einer CO₂-freien und sektorenübergreifenden Energieversorgung zugesprochen. Bis zum Jahr 2020 soll die Zahl der Ende 2018 nur 58 BZ-PKW und 8 BZ-Busse auf 2.000 bzw. 500 wachsen. Zugleich werden die Förderbudgets für die H₂-basierte Mobilität deutlich aufgestockt.

Auch Norwegen setzt sich seit langem für die H₂-Mobilität ein und verstärkt nach einer Phase der Zurückhaltung derzeit wieder klar sein Engagement: So wird eine Neufassung der nationalen Wasserstoffstrategie erarbeitet und voraussichtlich die große Bedeutung von BZ-Antrieben gerade für schwere Fahrzeuge bestätigen. Im März 2019 waren 159 BZ-PKW und 5 BZ-Busse in Betrieb; weitere Fahrzeuge werden beschafft. Die zukünftige Entwicklung der H₂-basierten Mobilität ist dennoch kaum absehbar.

Zur Bewertung der Aktivitäten von EU und einzelnen Ländern ist eine Einordnung in den gesamteuropäischen Kontext relevant. Die Alternative Fuels Infrastructure Directive ruft Mitgliedsstaaten zur freiwilligen Ausarbeitung von Strategien für den Aufbau von H₂-Infrastrukturen auf. Dem haben 14 von 28 Ländern Folge geleistet und so ihre Unterstützung der H₂-Mobilität signalisiert.

Die Untersuchung der EU und ausgewählter Länder zeigt ein insgesamt starkes Engagement für die H₂-basierte Mobilität, dass sich jedoch keineswegs mit der Innovationsdynamik Asiens messen kann: Japan und Südkorea liefern bislang fast alle kommerziell vertriebenen BZ-PKW und China steigt zu einem neuen Leitmarkt der H₂-Mobilität auf. Die Regierungen dieser Länder verfolgen ambitionierte Zielsetzungen für den Markthochlauf und unterstützen die Industrie durch attraktive Förderangebote für Fahrzeuge und Betankungsinfrastruktur.

Kapitel 4 analysiert gesetzliche Rahmenbedingungen der H₂-Mobilität und fokussiert auf EU-Regularien. Richtlinien zur Begrenzung des CO₂-Ausstoßes von PKW und Nutzfahrzeugen verlangen erhebliche Einsparungen und belegen Fahrzeughersteller bei Nichteinhaltung mit empfindlichen Strafen. Die CO₂-Emissionen von PKW und schweren Nutzfahrzeugen müssen bis 2025 um je 15 und bis 2030 um 37,5 bzw. 30 Prozent vermindert werden. Diese Vorgaben sind mit konventionellen Motoren nicht zu erfüllen und verlangen den Umstieg auf alternative Antriebe. Die Clean Vehicles Directive verpflichtet Behörden und öffentliche Unternehmen zur Beschaffung emissionsarmer und -freier Nutzfahrzeuge. In Deutschland müssen 10 Prozent der LKW und 45 Prozent der Busse bereits ab 2021 weniger als 50 Gramm CO₂ pro Kilometer ausstoßen, worauf der Anteil ab 2026 auf 15 bzw. 65 Prozent steigt. Zudem muss die Hälfte aller Busse einen CO₂-Ausstoß von 1 g/km unterschreiten. Die Vorgaben sind nur mit Elektro- einschließlich von BZ-Fahrzeugen erfüllbar und wirken als starker Treiber der H₂-Mobilität.

Auch nationale Rahmenbedingungen sind von Bedeutung: So unterstützt in Deutschland z.B. die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie die Kommerzialisierung von BZ-Fahrzeugen. In Frankreich wird ein innovatives Förderinstrument genutzt und gleicht die Mehrkosten erneuerbaren Wasserstoffs gegenüber fossilem H₂ aus. Die Niederlande und Norwegen fallen durch besonders attraktive Fördermaßnahmen einschließlich von Kaufanreizen und Steuernachlässen auf. In allen untersuchten Ländern bis auf Deutschland spielen auch restriktive Maßnahmen eine wesentliche Rolle: So tragen v.a. Einfahrverbote für Verbrennerfahrzeuge in urbane Räume und harte Vorgaben zum Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen zur Innovationsdynamik der H₂-Mobilität bei.

Letztendlich werden die in den Ländern vorherrschenden Rahmenbedingungen von europäischen wie auch nationalen Gegebenheiten geprägt und sind in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Bis auf Frankreich verfügen alle untersuchten EU-Mitgliedsstaaten über einen relativ gut entwickelten regulativen Rahmen. Nur wenige und überwiegend auf EU-Ebene befindliche Hindernisse für einen breiten Markthochlauf der H₂-Mobilität werden identifiziert und zusammen mit umsetzungsbezogenen Defiziten im späteren Studienverlauf diskutiert.

Kapitel 5 erarbeitet fahrzeugseitig ein vertiefendes Verständnis H₂-basierter Mobilität. Zunächst werden Technologiekonzepte verschiedener BZ-Fahrzeugtypen diskutiert und deren größtenteils hohe technische Reife festgestellt. Obgleich hohe Kosten als zentrales Problem der BZ-Antriebstechnologie verbleiben, stellen Skaleneffekten die Realisierung erheblicher Kostenreduzierungspotenziale in Aussicht.

BZ-PKW werden v.a. von asiatischen Automobilunternehmen kommerziell und zumeist auch in Deutschland angeboten. Hyundai fertigt das Modell Nexo und hat bislang rund 3.800 Fahrzeuge weltweit veräußert. Bis 2022 werden die Produktionskapazitäten auf 40.000 pro Jahr ausgebaut und sollen bis 2030 auf 700.000 steigen. Toyota setzte bis heute 10.000 Exemplare der BZ-Limousine Mirai weltweit ab und stellte ein Nachfolgemodell vor, von dem 30.000 Stück pro Jahr gebaut werden sollen. Honda vertreibt den BZ-PKW Clarity Fuel Cell außerhalb Deutschlands und kündigte ein Nachfolgemodell an. Daimler bietet das Modell GLC F-CELL zum Leasing an und beabsichtigt weniger als 1.000 Exemplare zu bauen. Der weltweite Bestand von BZ-PKW liegt aktuell bei 15.000 bis 18.000 Fahrzeugen.

Busse gelten als besonders attraktive Anwendung für BZ-Antriebe und zeichnen sich neben ihrer Emissionsfreiheit durch geringe Infrastrukturanforderungen aus. Sie werden von Herstellern wie Van Hool, Solaris und Daimler gebaut und in Europa überwiegend im Rahmen von EU-Projekten mit einem Zielbestand von 1.000 Fahrzeugen im Jahr 2023 betrieben. In Deutschland werden BZ-Busse derzeit v.a. in Köln, Wuppertal und Frankfurt eingesetzt. Die Anschaffungskosten sind kontinuierlich gesunken und sollten in wenigen Jahren auf 400.000 Euro fallen. Insbesondere die Total Costs of Ownership entwickeln sich günstig. Das aktuelle Busangebot kann die Nachfrage nicht befriedigen.

BZ-betriebene leichte und schwere LKW gelten als vielversprechende Zukunftstechnologien. Gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen bestehen deutliche Vorteile hinsichtlich höherer Reichweiten und kürzerer Betankungszeiten. Der deutsche Elektrofahrzeugbauer StreetScooter fertigt Lieferfahrzeuge mit BZ-Range-Extender und verkauft mehrere hundert Exemplare an Kunden. Hyundai stellte einen 18-Tonnen-BZ-LKW vor und kündigte an, ein schweizer H₂-Konsortium zwischen Ende 2019 und 2025 mit 1.600 schweren BZ-Nutzfahrzeugen zu beliefern. Das amerikanische Start-Up Nikola entwickelt verschiedene Versionen eines 40-t-BZ-LKW und beginnt 2020 mit der Auslieferung von 800 Fahrzeugen. Sowohl Hyundai wie auch Nikola zielen auch auf Gesamteuropa als Markt.

Die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber BZ-Fahrzeugen und H₂-Infrastruktur ist insofern hoch, dass Bürger und gewerbliche Akteure die Technologien insbesondere aufgrund ihrer Nachhaltigkeit grundsätzlich begrüßen. Allerdings würden nur die Wenigsten nennenswerte Mehrkosten oder Nachteile wie eine mangelnde Verfügbarkeit von H₂-Tankstellen hinnehmen. Dies beinhaltet, dass die H₂-Mobilität hinsichtlich der genannten und ähnlichen kundenbezogenen Parameter mit konventionellen Mobilitätsoptionen gleichziehen muss, um eine volle Marktakzeptanz zu gewinnen.

Die Nachhaltigkeit der H₂-Mobilität ist am belastbarsten anhand von Treibhausgas- und Lebenszyklusanalysen zu ermitteln, die neben den im Fahrbetrieb anfallenden Abgasen weitere Umweltfaktoren berücksichtigen. Well-to-Wheel-Analysen betrachten auch die während der Produktion, Verteilung und Abgabe von Kraftstoffen entstehenden Emissionen und zeigen, dass BZ-Fahrzeuge insbesondere bei Nutzung von erneuerbarem H₂ sehr niedrige THG-Emissionen aufweisen. Eine Lebenszyklusanalyse, die auch die bei Produktion und Wiederverwertung der Fahrzeuge aufkommenden Belastungen berücksichtigt, kommt zu ähnlichen Ergebnissen: Abhängig vom genutzten Kraftstoff kann ein BZ-Fahrzeug niedrigere THG-Emissionen als ein Batterieauto erzielen und ist stets deutlich nachhaltiger als ein Diesel-PKW.

Schienenfahrzeuge gelten als ein weiteres technisch und wirtschaftlich attraktives BZ-Einsatzfeld. Verschiedenen Studien zufolge sind die Gesamtbetriebskosten von BZ-Triebwägen und anderen Zügen günstig und sollten sich bis zum Jahr 2030 in respektablen Marktanteilen niederschlagen. Daher investieren sowohl Alstom wie auch Siemens in die Technologie. In den nächsten Jahren nehmen in Deutschland 41 Triebzüge von Alstom den Bahnbetrieb auf.

Kapitel 6 leistet eine vertiefende Betrachtung von Infrastrukturen zur Versorgung der H₂-Mobilität. Zunächst werden die wichtigsten klimafreundlichen Verfahren der H₂-Produktion mit Fokus auf die Wasserelektrolyse auf Basis erneuerbaren Stroms analysiert. Angesichts einer erwarteten starken Zunahme des H₂-Bedarfs wird ein erheblicher Ausbau der Elektrolysekapazitäten antizipiert. Elektrolytisch hergestellter H₂ kann heute zu reinen Erzeugungskosten ab 6 €/kg und bis 2030 für deutlich unter 5 €/kg bereitgestellt werden.

Bei Produktion von Wasserstoff in zentralen Anlagen ist ein Transport zu den Verbrauchern erforderlich, bei dem der gasförmige oder flüssige H₂ entweder in speziellen LKW oder in H₂-Pipelines befördert wird. Bislang erfolgt die Versorgung von H₂-Tankstellen nahezu ausschließlich per LKW oder Elektrolyse vor Ort. Für die Gasindustrie sind aber auch die Einspeisung von EE-H₂ ins Erdgasnetz, die Herstellung von synthetischem Erdgas, sowie die Umwidmung bestehender Gasnetze zu H₂-Pipelines relevant.

Das Tankstellennetz für BZ-PKW wird in Deutschland von H₂ Mobility ausgebaut und umfasst Mitte Januar 2020 insgesamt 81 im Betrieb und 24 im Aufbau befindliche Stationen. Es soll bis 2021 auf 140 und bis 2023 auf 400 Tankstellen erweitert werden, wobei letzteres Ziel auch vom Flottenzuwachs der BZ-Fahrzeuge abhängig gemacht wird. Durch die eingesetzte 700-bar-Technologie wird eine PKW-Betankung in drei Minuten möglich. Die Kosten einer deutschlandweiten H₂-Infrastruktur für PKW liegen Studien zufolge im Endausbau deutlich unter denen einer Ladeinfrastruktur für eine vergleichbare Anzahl von Batterieautos.

Tankstellen für BZ-Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge werden stets bedarfsgerecht aufgebaut und ermöglichen eine befriedigende Kraftstoffversorgung bei geringem infrastrukturellem Aufwand. Während die Anlagen standardmäßig auf 350-bar-Druckwasserstoff ausgelegt sind, gilt die 700-bar-Technologie zumindest bei LKW als interessante Zukunftsoption. Eine Tankstelle zur Versorgung von 50 Bussen setzt täglich etwa 1.300 kg H₂ um und kostet rund 5 Millionen Euro. Einem Forschungsprojekt zufolge können den Kraftstoffkosten von Dieselnissen vergleichbare H₂-Bereitstellungskosten von 4 bis 6 €/kg erreicht werden.

Kapitel 7 widmet sich der Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfrage und zieht zunächst die bisherigen Studienergebnisse zu Rate. Diese zeigen einen weltweiten Trend zur Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität und identifizieren aufgrund der fahrzeugtypisch hohen Verbräuche BZ-betriebene Busse und LKW als attraktive H₂-Absatzmarktsegmente.

Darüber hinaus erfordert eine Quantifizierung der zu erwartenden H₂-Nachfrage jedoch eine Konsultation speziell darauf ausgerichteter Untersuchungen.

Eine Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse modelliert die bis 2050 in Deutschland zu erwartenden Wasserstoffbedarfe. Im zentralen Zukunftsszenario ergibt sich 2030 eine H₂-Nachfrage von 78 Terawattstunden für das gesamte Energiesystem und steigt bis 2050 auf 294 TWh. H₂ wird hauptsächlich vom Verkehrsbereich und insbesondere schweren Nutzfahrzeugen nachgefragt. Aber auch als PKW-Kraftstoff gewinnt H₂ an Bedeutung.

Eine weitere Wasserstoffstudie untersucht die Rolle, welche H₂ im zukünftigen Energiesystem Deutschlands einnehmen kann. Die Bandbreite der aus sechs unterschiedlichen Szenarien resultierenden H₂-Nachfragen ist groß. 2030 kann der Bedarf aller Verbrauchssektoren maximal 300 Terawattstunden pro Jahr erreichen und bis 2050 auf 650 TWh steigen, ist aber in anderen Szenarien deutlich geringer.

Die aktuellste relevante Studie nimmt Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem in den Blick und spricht H₂ eine wesentliche Rolle bei der Energieversorgung der Zukunft zu. Zwei Szenarien werden modelliert und ermitteln für 2050 H₂-Volumina von 145 bzw. 399 TWh über alle Sektoren hinweg. Im Verkehrsbereich entfallen 33 bzw. 36 Prozent des Kraftstoffbedarfs von PKW und 46 bzw. 72 Prozent der Nachfrage des Güterverkehrs auf H₂.

Eine Hydrogen Roadmap Europe rundet das Bild mit Blick auf Europa ab und analysiert die zukünftig zu erwartenden H₂-Nachfragen anhand von Szenarien. Bei ambitionierten Annahmen kann H₂ bis 2050 einen Anteil von 24 Prozent am Gesamtenergiebedarf der EU bzw. 2.251 TWh erreichen und unter anderem 45 Millionen PKW und 2 Millionen schwere Nutzfahrzeuge mit Kraftstoff versorgen. Bei bloßer Fortsetzung bisheriger Trends wären die H₂-Anteile mit insgesamt 780 TWh und geringerer Verkehrsnachfrage aber wesentlich moderater.

Kapitel 8 vergleicht den Stand und die Zukunftspotenziale H₂-basierter Mobilität mit denen der Gasmobilität. Zunächst wird die Fahrzeugverfügbarkeit differenziert nach marktlicher Verfügbarkeit, technischer Reife und wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit diskutiert. Die aktuelle Verfügbarkeit von Gasfahrzeugen übertrifft die vergleichbarer BZ-Fahrzeuge bei weitem und die Kosten der Gasfahrzeuge sind deutlich niedriger. Hinsichtlich der technischen Reife besteht nur noch bei LKW ein klarer Vorsprung der Gasmobilität. Bis 2030 könnte es zu einer fahrzeugseitigen Kostenparität beider Antriebsoptionen kommen, die mit einer vergleichbaren Marktverfügbarkeit der bis dahin technisch gleichermaßen ausgereiften Konzepte einhergehen sollte. In diesem Fall wären die Zukunftsperspektiven beider Mobilitätsoptionen vergleichbar. Allerdings ist die tatsächliche zukünftige Entwicklung kaum absehbar.

Derzeit stehen für gasbetriebene PKW etwa elfmal so viele Tankstellen wie für BZ-Autos zur Verfügung, aber schon 2023 könnte der Vorsprung auf Faktor zwei schrumpfen. Während Gastankstellen bislang bezüglich Kosten und Zuverlässigkeit punkten, sind diesbezügliche Verbesserungen bei H₂-Tankstellen zu erwarten. Die Tankstellenabdeckung beider Mobilitätsoptionen für Busse und andere schwere Nutzfahrzeuge ist noch gering, sollte aber bedarfsgerecht steigen. Nach heutigem Stand sind auch Gastankstellen für schwere Fahrzeuge kostengünstiger und zuverlässiger als ihre H₂-Pendants.

Die nutzerseitige Akzeptanz gegenüber beiden Mobilitätskonzepten ist vergleichbar: sowohl BZ- wie auch Gasfahrzeuge werden insbesondere aufgrund ihrer Umweltvorteile von der Allgemeinheit begrüßt. Allerdings stellen hohe Kosten und eine mangelnde Breite der Fahrzeugangebote potenzielle Akzeptanzhindernisse dar.

Die H₂- und die Gasmobilität können die aus Nachhaltigkeitsgründen gebotene Integration von EE in den Verkehrssektor gleichermaßen gewährleisten. Allerdings erfüllen nur BZ-Fahrzeuge die Anforderungen zur Verminderung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen in Gänze. Die THG-Emissionen sowohl von BZ- wie auch Gasfahrzeugen liegen auf einem vergleichbaren und sehr niedrigen Niveau, obgleich der Energieverbrauch Letzterer höher ist. Insgesamt erweisen sich BZ-Fahrzeuge als die nachhaltigere Alternative.

Die Bewertung der Eignung der H₂- und Gasmobilität zur Erfüllung regulativer Vorgaben ergibt, dass nur BZ-Antriebe von den Regularien profitieren: Sowohl die EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen wie auch zur Beschaffung emissionsarmer und -freier Nutzfahrzeuge schaffen Märkte für BZ-Fahrzeuge, schließen jedoch Gasfahrzeuge vom Wettbewerb aus. Dies ist ein entscheidender Vorteil für die H₂-Mobilität, benachteiligt aber die Gasmobilität aufgrund der ausschließlichen Berücksichtigung während der Fahrt anfallender Abgase. Bei Zugrundelegung von WtW-Analysen könnten die sehr niedrigen THG-Emissionen von Gasfahrzeugen einen dringend benötigten Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Kapitel 9 entwickelt Maßnahmenvorschläge zur Förderung der H₂-Mobilität. Zunächst werden EU-Regularien komplementär zur Analyse positiver Aspekte in Kapitel 4 mit Fokus auf Defizite und Entwicklungserfordernisse adressiert. Dann wendet sich die Analyse verstärkt Maßnahmen auf Ebene Deutschlands und anderer EU-Mitgliedsstaaten zu.

EU-Richtlinien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen legen strenge Grenzwerte für Fahrzeuge fest. Überdies verpflichtet die CVD die öffentliche Hand zur Beschaffung von Niedrig- und Nullmissionsfahrzeugen. Beide Maßnahmen werden als starke Treiber der H₂-Mobilität begrüßt. Allerdings wird die den Gesetzen zugrundeliegende Tank-to-Wheel-Methodik aufgrund ihrer Vernachlässigung bedeutsamer Umweltbelastungen kritisiert. Die Zugrundelegung von Well-to-Wheel- oder Lebenszyklusansätzen wird empfohlen, welche eine vollständigere Erfassung von Umweltwirkungen ermöglichen.

Die Renewable Energy Directive und die Fuel Quality Directive schreiben Mindestquoten für erneuerbare und CO₂-arme Kraftstoffe vor und werden als wirksame Treiber der H₂-Mobilität begrüßt. Allerdings gibt es bislang kein Herkunftsnachweissystem für erneuerbaren und CO₂-armen H₂ und wird daher dessen Anrechnung auf Quoten und Handel erheblich erschwert. Deshalb wird die Schaffung eines entsprechenden Nachweissystems nahegelegt.

Die AFID ruft EU-Mitgliedsstaaten zur freiwilligen Erarbeitung nationaler Strategien für den Aufbau von H₂-Infrastrukturen auf, erreicht trotz positiver Effekte für die H₂-Mobilität aber nur die Hälfte der Länder. Daher empfiehlt die Studie, gegenüber allen Mitgliedsstaaten auf die Erstellung ehrgeiziger Strategien für den Infrastrukturaufbau zu dringen.

Neben den eigentlichen EU-Gesetzen sind auch nachgeordnete Umsetzungsbestimmungen von Belang. Diese schließen bislang noch optimierungsbedürftige Genehmigungsprozesse für H₂-Tankstellen sowie Verfahren zur Qualitäts- und Mengenmessung von H₂ ein. Die Weiterentwicklung der entsprechenden Prozesse und Verfahren wird empfohlen.

Auch zur Erfüllung der ehrgeizigen EU-Regularien ist eine weitere Unterstützung der Marktaktivierung und Technologieentwicklung von BZ-Fahrzeugen vonnöten. Die Reduzierung von Kosten und die Bedienung verbleibender F&E-Erfordernisse bedarf einer fortgesetzten Förderung durch die öffentliche Hand. Daher empfiehlt die Studie, die auf europäischer und deut-

scher Ebene bestehenden Förderangebote für Fahrzeuge fortzuführen. Speziell zur Realisierung von Skaleneffekten wird nahegelegt, den Markthochlauf durch öffentliche Beschaffungsprogramme und Einkaufsgemeinschaften zu unterstützen.

Als Bestandteil der H₂-Mobilität bedürfen auch H₂-Infrastrukturen einer den Fahrzeugen vergleichbaren Unterstützung. Daher wird empfohlen, die einschlägigen europäischen und deutschen Förderangebote fortzuführen. Speziell zur Reduzierung der Kosten von per Elektrolyse hergestelltem EE-H₂ wird vorgeschlagen, die übliche Förderung von Investitionskosten um eine Subvention von Betriebskosten zu ergänzen, welche die Mehrkosten gegenüber aus Erdgas gewonnenem H₂ ausgleicht. In Deutschland gelten hohe auf die elektrolytische H₂-Herstellung erhobene Umlagen, Abgaben und Steuern als ein zentrales Hindernis für den Betrieb von PtX-Anlagen. Daher empfiehlt diese Studie, die finanziellen Belastungen erheblich zu reduzieren, um so eine ökonomisch tragfähige Herstellung von EE-H₂ zu ermöglichen.

Letztlich sind auch restriktive Maßnahmen für den Markterfolg der H₂-Mobilität von Bedeutung und tragen in einigen europäischen Ländern maßgeblich zur Innovationsdynamik bei. Daher wird empfohlen, ergänzend zur Technologieförderung auch den Einsatz restriktiver Maßnahmen im Sinne der Kommerzialisierung der H₂-Mobilität zu prüfen.

10.2 Schlussfolgerungen

Die starke politische Unterstützung und zunehmende Dynamik der H₂-basierten Mobilität in der EU, Deutschland, Frankreich und den Niederlanden schafft günstige Voraussetzungen für die weitere Marktentwicklung. Das Vereinigte Königreich sowie Norwegen fördern die Technologie in einem geringeren Ausmaß und die Hälfte aller EU-Mitgliedsstaaten plant den Aufbau von H₂-Infrastrukturen. Somit wird die H₂-Mobilität von politisch wie wirtschaftlich starken Akteuren vorangetrieben und von weiteren Ländern unterstützt. Zugleich setzen insbesondere asiatische Technologievorreiter deutsche und europäische Akteure unter zunehmenden Wettbewerbsdruck. Daher ist eine Fortsetzung der politischen Unterstützung und des dynamischen Ausbaus der H₂-basierten Mobilität in Europa zu erwarten. Als Konsequenz ist mit wachsenden Märkten für die Hersteller und Transporteure von H₂ zu rechnen.

Die EU-Richtlinien zur Begrenzung des CO₂-Ausstoßes von Fahrzeugen und zur Beschaffung CO₂-armer und -freier Nutzfahrzeuge sind nur mit Elektro- einschließlich von BZ-Fahrzeugen zu erfüllen und schaffen die wohl stärksten Treiber der H₂-Mobilität. Die Hauptlast beider Regularien liegt auf schweren Fahrzeugen mit hohen Anforderungen an Leistung, Reichweite und betriebliche Flexibilität, denen Batteriefahrzeuge in diversen Anwendungsfällen nicht gewachsen sind. So ist z.B. der Einsatz batteriebetriebener LKW im Langstreckenverkehr ohne Zwischenladung ebenso wenig wie der batterieelektrischer Räumfahrzeuge im Winterdienst technisch darstellbar. Hier bieten nur BZ-Fahrzeuge eine Option und sollten aus heutiger Sicht eine dominante Marktposition erreichen. Zugleich benötigen schwere Fahrzeuge deutlich mehr Kraftstoff als PKW und lassen das Entstehen umfassender H₂-Märkte erwarten.

Neben BZ-betriebenen PKW sind Busse in wachsenden Stückzahlen in Deutschland und Europa kommerziell verfügbar. LKW werden zeitnah in der Schweiz und anderen Ländern im marktrelevanten Umfang zum Einsatz kommen. Bei weiterer Kostensenkung sowie technischer Optimierung steht einem breiten Markteintritt nichts entgegen und auch Akzeptanzprobleme wären nicht zu erwarten. Dies bestätigt die günstigen Perspektiven für die H₂-Lieferanten der entstehenden und fahrzeuggestypisch nachfragestarken Kraftstoffmärkte.

Infrastrukturseitig ist ein erheblicher Zuwachs der zur Bedienung der künftigen H₂-Nachfrage erforderlichen Elektrolysekapazitäten zu erwarten. Neben dem Mobilitätsbereich werden auch andere Sektoren erneuerbaren Wasserstoff nachfragen und den H₂-Bedarf weiter erhöhen. Hier könnten die vom DVGW vertretenen Akteure ihre bestehenden PtX-Kompetenzen in eine kommerzielle Nutzung überführen und sich an der klimaneutralen H₂-Produktion beteiligen. Mit dem Aufkommen der H₂-Mobilität ist auch eine erhebliche Zunahme des H₂-Transportvolumens verbunden. An dieser Stelle kommen die Erdgasnetze der Gasindustrie ins Spiel, die z.B. durch Beimischung und spätere Abtrennung von H₂, oder durch Umwidmung zu H₂-Pipelines, auch längerfristig als wertvolles Infrastrukturgut genutzt werden könnten. Dies gilt besonders dann, wenn zukünftig EE-H₂ in größerem Umfang über lange Distanzen transportiert werden muss. So könnten Importe von EE-H₂ aus Regionen mit günstigen Produktionsbedingungen erhebliche Bedeutung erlangen und über das Gasnetz in deutsche Verbrauchszentren befördert werden. Zugleich kann die Gasinfrastruktur für das Gelingen der Energiewende unerlässliche Speicherfunktionen zur Integration fluktuierender EE bereitstellen.

Die Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffnachfragen bestätigt die voraussichtliche Entstehung lukrativer H₂-Märkte. Trotz einer großen Ergebnisbandbreite gehen alle referierten Studien von sektorenübergreifenden H₂-Bedarfen von mehreren hundert Terawattstunden in Deutschland bis 2050 aus. Für Europa werden im Mittel H₂-Volumina von weit über tausend TWh gesehen. Davon entfallen jeweils beträchtliche Anteile auf die H₂-Mobilität.

Der Potenzialvergleich der H₂-basierten und der Gasmobilität belegt in vielerlei Hinsicht die Zukunftsfähigkeit beider Technologien. Aufgrund der regulativen Vorgaben zu CO₂-Emissionen und Nutzfahrzeugbeschaffung ist die H₂-Mobilität die derzeit zukunftssträchtigere Option. Es bleibt allerdings abzuwarten, ob und inwieweit regulatorische Maßnahmen im Sinne einer konsequenten Technologieoffenheit angepasst werden. Die Gasmobilität kann schon heute einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele des Verkehrssektors leisten und Schadstoffemissionen, z.B. in Ballungsräumen, wesentlich reduzieren. Die H₂-Mobilität wird ihr Potenzial eher mittel- und längerfristig in größerem Maße entfalten können.

Das für die Marktperspektiven der H₂-Mobilität wichtige Regelwerk auf Ebene der EU und der Mitgliedstaaten einschließlich von Deutschland ist relativ weit entwickelt und zeitigt einen überschaubaren Optimierungsbedarf. Verbleibende regulative Hindernisse wurden identifiziert und sind überwindbar bzw. werden bereits konkret angegangen. Insgesamt überwiegen die der Marktentwicklung dienlichen Rahmenbedingungen die regulativen Hemmnisse deutlich.

Die Kommerzialisierung der H₂-basierten Mobilität läuft in Deutschland erst an, entfaltet sich aber dynamisch in einem innovationsförderlichen Kontext: Insbesondere begünstigen klimapolitische Anforderungen und starker Wettbewerbsdruck aus Asien den Marktantritt, während sich gleichzeitig die Technologie und Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen wie auch Infrastruktur verbessert. In der Schnittmenge dieser Faktoren entwickelt die H₂-Mobilität eine zunehmende und von allen diskutierten Technologiedimensionen getragene Dynamik. Aller Voraussicht nach werden für die Hersteller und Transporteure von EE-H₂ attraktive Märkte entstehen.

Literaturverzeichnis

- [1] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, „Multi-Annual Work Plan 2014–2020,“ Brussels, 2014.
- [2] J. Cotta, „IPHE Country Update April 2019: European Commission,“ [Online]. Available: <https://www.iphe.net/european-commission>. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [3] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, „Programme Review Report 2017,“ Brussels, 2018.
- [4] M. Atanasiu, „Introduction to FCH 2 JU and call 2019,“ [Online]. Available: <https://fch.europa.eu/sites/default/files/2.%20InfoDay%202019%20-%20Introduction%20-%20M.Atanasiu%20%28ID%205296018%29%20%28ID%205308753%29.pdf>. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [5] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, „Clean Hydrogen In European Cities: 2010 – 2016: Fuel Cell Electric Buses: A Proven Zero-Emission Solution: Key Facts, Results, Recommendations,“ Brussels, 2016.
- [6] Bundesverkehrsministerium BMVI, „Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 2016–2026,“ [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/nipii-massnahmen-bmvi.pdf>. [Zugriff am 20. Juli 2019].
- [7] S. Geitmann, „BMVI gibt 250 Mio. Euro frei: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 32, April 2017.
- [8] O. Ehret und K. Bonhoff, „Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 5526-5533, March 2015.
- [9] O. Ehret, T. Herbert und K. Bonhoff, „Electricity-Based Fuels at NOW GmbH,“ in *WHEC 2016 – 21st World Hydrogen Energy Conference 2016*, Zaragoza, 2016.
- [10] M. Altmann, „Status und Perspektive von PtX: LBST analysiert Entwicklung in Deutschland,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 16-18, Juli 2019.
- [11] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „Förderrichtlinien/ Förderaufrufe,“ [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/foerderrichtlinien>. [Zugriff am 22. Juli 2019].
- [12] S. Geitmann, „40 Prozent Förderung von BZ-Autos ... allerdings fehlen die Fahrzeuge,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 33, Oktober 2017.

- [13] G. Tjarks, „IPHE Country Update April 2019: Germany,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_336cbeee11d44353974f65831786a281.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [14] L. Antoni, „Country Update France,“ Mai 2016. [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_6a7f5b3b37be42938e5bd258b030ed04.pdf. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [15] Ministère de la Transition écologique et solidaire, „Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_5674644ba353434392a8d80bf755eb32.pdf. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [16] C. Werquin und M. Junker, „HyLAW: Position paper on the national strategy to create a regulatory framework for hydrogen and its applications – France,“ [Online]. Available: https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2018-12/HyLaw_National%20Policy%20Paper_France%20%28EN%29%20v3.pdf. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [17] L. Antoni, „IPHE Country Update November 2018: France,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_8ecbb652fcec4c37b01e0c531ec4ba56.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [18] L. Antoni und B. Frois, „IPHE Country Update October 2017: France,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_75e44a84b64244f89cea60ae72f9a28f.pdf. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [19] C. Randall, „Zero Emission Valley: How Auvergne-Rhône-Alpes is leveraging hydrogen mobility,“ [Online]. Available: <https://www.electrive.com/2019/04/27/zero-emission-valley-how-auvergne-rhone-alpes-is-leveraging-hydrogen-mobility/>. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [20] C. Werwitzke, „Paris: H2-Taxiflotte „Hype“ wächst auf 100 Fahrzeuge an,“ [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2018/07/25/paris-h2-taxiflotte-hype-waechst-auf-100-fahrzeuge-an/>. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [21] ITM Power, „First Hydrogen Bus route in France,“ [Online]. Available: <http://www.itm-power.com/news-item/first-hydrogen-bus-route-in-france>. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [22] UK H2 Mobility, „UK H2 Mobility: Communication pack: Jan 2017,“ [Online]. Available: http://www.ukh2mobility.co.uk/wp-content/uploads/2017/09/Communication_pack_January_2017.pdf. [Zugriff am 27. Juli 2019].
- [23] D. Hayter, „HyLaw: UK National Policy Paper,“ [Online]. Available: https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-01/HyLaw%20UK%20Policy%20Paper_Final_December%202018.pdf. [Zugriff am 27. Juli 2019].

- [24] D. Hart, J. Howes, B. Madden und E. Boyd, „Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth: A Roadmap for the UK,“ [Online]. Available: <http://www.e4tech.com/wp-content/uploads/2016/11/UKHFC-Roadmap-Final-Main-Report-171116.pdf>. [Zugriff am 27. Juli 2019].
- [25] R. Wadey, „IPHE Country Update April 2019: United Kingdom,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_4c2e56f36c8b4f3ab5ffcf92e972e2.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [26] European Policy Solutions, „UK Hydrogen Transport Programme Phase 2 Announced,“ 7. August 2018. [Online]. Available: <https://www.europeanpolicysolutions.com/uk-hydrogen-transport-programme-phase-2-announced/>. [Zugriff am 27. Juli 2019].
- [27] Fuel Cell Electric Buses knowledge base, „Towards clean public transport with hydrogen,“ [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/>. [Zugriff am 23. Juni 2019].
- [28] J. Gigler und M. Weeda, „Outlines of a Hydrogen Roadmap,“ [Online]. Available: <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/publicaties/20180514%20Roadmap%20Hydrogen%20TKI%20Nieuw%20Gas%20May%202018.pdf>. [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [29] J. P. van der Meer, R. Perotti und F. de Jong, „HyLaw: National Policy Paper - Netherlands,“ [Online]. Available: https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/HyLAW_National%20Policy%20Paper_Netherlands.pdf. [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [30] W. Fiechter, „IPHE Country Update April 2019: The Netherlands,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_93d8bcf67e60433198b2c2bcb08b261f.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [31] W. Fiechter, „IPHE Country Update November 2017: The Netherlands,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_7ba62019ffb340d6b742009a72fcc709.pdf. [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [32] W. Fiechter, „IPHE Country Update Nov 2018: The Netherlands,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_db665471c71545328666339d9d63a01e.pdf. [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [33] W. van der Laak, „Fuel Cell Electric Trucks: Demonstrations and developments,“ [Online]. Available: https://great-region.org/wp-content/uploads/2018/02/Wouter_vanderLaak_WaterstofNet.pdf. [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [34] S. Bratzel, R. Tellermann und O. Ehret, „Branchenstudie Elektromobilität 2018: Analyse der Markt- und Innovationstrends in Deutschland und internationalen Kernmärkten,“ Center of Automotive Management, Bergisch Gladbach, 2018.

- [35] S. Damman und J. Gjerløw, „HyLAW: National Policy Paper - Norway,“ [Online]. Available: <https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/National%20Policy%20Paper%20-%20Norway%20%2810.03.2019%29.pdf>. [Zugriff am 2. August 2019].
- [36] „IPHE Country Update March 2019: Norway,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_be48178d15064402ac2eceb1b72893ef.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2019].
- [37] T. Nørbech, „IPHE Country Update November 2015: Norway,“ [Online]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_1e794d4ce9934e82a60652f9cc1594d4.pdf. [Zugriff am 2. August 2019].
- [38] V. Frihammer, „Norway aims for 1000 hydrogen trucks by 2023,“ [Online]. Available: <https://www.openaccessgovernment.org/hydrogen-trucks/52230/>. [Zugriff am 2. August 2019].
- [39] European Commission, „Clean transport, Urban transport: Alternative fuels for sustainable mobility in Europe,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cpt_en. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [40] A. Floristean, „HyLAW: Deliverable 4.5: EU policy paper,“ [Online]. Available: <https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-06/EU%20Policy%20Paper%20%28June%202019%29.pdf>. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [41] O. Ehret, „Hydrogen and fuel cells: Eight important questions & answers for the media,“ National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology, Berlin, 2019.
- [42] T. Tang, „The Development of Hydrogen & Fuel Cell Industry in China,“ in *f-cell 2019, 10-11 September 2019, Stuttgart*.
- [43] Y. Wang, „Prospect of Hydrogen Energy Industry in China,“ in *f-cell 2018, 18-19 September 2018, Stuttgart*.
- [44] Ballard Power Systems, „Ceremonial Opening of Ballard’s China Stack Joint Venture Production Facility,“ [Online]. Available: <http://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/09/06/ceremonial-opening-of-ballard-s-china-stack-joint-venture-production-facility>. [Zugriff am 5. August 2019].
- [45] European Commission, „Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles_en. [Zugriff am 22. Juli 2019].
- [46] PA Knowledge Limited, „Driving into a low emissions future,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.paconsulting.com/insights/2018/driving-into-a-low-emissions-future/>. [Zugriff am 22. Juli 2019].
- [47] Umweltbundesamt, „Kraftstoffe,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/kraftstoffe>. [Zugriff am 22. Juli 2019].

- [48] S. Bratzel und J. Thömmes, *Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen: Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilssektor*, Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2018.
- [49] European Commission, „Renewable energy directive,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>. [Zugriff am 22. Juli 2019].
- [50] European Commission, „Fuel Quality,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel_en. [Zugriff am 23. Juli 2019].
- [51] „Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates,“ [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=EN>. [Zugriff am 12. August 2019].
- [52] Bundeswirtschaftsministerium BMWi, „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende: Die Energie der Zukunft: Berichtsjahr 2015 – Kurzfassung,“ Berlin, 2016.
- [53] Bundesverkehrsministerium BMVI, „Energie auf neuen Wegen: Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung,“ Berlin, 2017.
- [54] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, „Die Zukunft der Mobilität,“ [Online]. Available: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/>. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [55] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: Arbeitsgruppe 1 "Klimaschutz im Verkehr", „Zwischenbericht 03/2019: Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor,“ [Online]. Available: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Zwischenbericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [56] Bundesverkehrsministerium BMVI, „Aktuelles zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie,“ [Online]. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [57] Bundesverkehrsministerium BMVI, „Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr: Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe),“ Berlin, 2017.
- [58] S. Geitmann und S. Jösting, „Die Politik erkennt die Potentiale von H2: Ein Masterplan für eine Wasserstoffwirtschaft,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 8-10, Oktober 2019.
- [59] S. Geitmann, „Wirtschaftsminister kündigt H2-Strategie an: Altmaier verkündet die Gewinner der Reallabore,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 10-11, Oktober 2019.
- [60] T. Herbert, „Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie des Bundes: Fokus auf das Thema Nutzfahrzeuge,“ in *Jahrestagung Mobilität der Netzwerke Brennstoffzelle und*

Wasserstoff, Elektromobilität sowie Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft, 27. Juni 2019, Düsseldorf.

- [61] S. Altenburg, A. Auf der Maur, S. Eckert, M. Faltenbacher, A. Labinsky und B. Reuter, „Nullemissionsnutzfahrzeuge: Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative,“ e-mobil BW GmbH, Stuttgart, 2017.
- [62] European Commission, „Alternative Fuels: Member State Country Fiches,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/alternative-fuels-ms-country-fiches.pdf>. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [63] G. Harms und D. Nozharova, „HyLAW: Nationales Strategiepapier - Deutschland,“ [Online]. Available: <https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2018-12/20181217%20National%20Policy%20Paper%20DE%20de%20Final.pdf>. [Zugriff am 26. Juli 2019].
- [64] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „Die deutsche H₂-RCS-Roadmap 2025: RCS-Regulations, Codes & Standards: Regelwerke, Durchführungsbestimmungen & Normen im Bereich Wasserstoff (H₂),“ [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/now_deutsche-h2-rcs-roadmap.pdf. [Zugriff am 5. August 2019].
- [65] A. Floristean, M. Julie, D. Hayter und D. Nozharova, „HyLAW: D4.1 Cross-country comparison,“ [Online]. Available: <https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2018-11/D.4.1%20-%20Analysis%20of%20commonalities%20and%20differences%20between%20countries.pdf>. [Zugriff am 27. Juli 2019].
- [66] Roland Berger, „Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe: A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking,“ Munich, 2015.
- [67] J. Adolf, K. Arnold, C. Balzer, M. Fishedick, J. Louis, A. Pastowski, U. Schabla und D. Schüwer, „Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂,“ Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2017.
- [68] Mercedes-Benz AG, „Einstieg in eine neue Ära der E-Mobilität,“ 10. Oktober 2018. [Online]. Available: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL.xhtml?oid=41478388&ls=L2RIL2luc3RhbmlNIL2tvLnhodG1sP29pZD00MTQ3NTc3MCZhamF4UmVxdWVzdHNHYWRIPTEmcmVsSWQ9MTAwMSZmcm9tT2lkPTQxNDc1NzcwJmJvcmlcnM9dHJ1ZSZyZXN1bHRJbmcZvVHlwZUIk>. [Zugriff am 19. Juni 2019].
- [69] Toyota, „Outline of the Mirai,“ [Online]. Available: <https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/feel/environment/better-air/fuel-cell-vehicle>. [Zugriff am 17. Juni 2019].

- [70] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien – Tragende Säulen der Energiewende: Maßnahmenkatalog zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie,“ Berlin, 2015.
- [71] Fuel Cell Technologies Office, „Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan: Fuel Cells,“ 2017. [Online]. Available: www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_myRDD_fuel_cells.pdf. [Zugriff am 18. Juni 2019].
- [72] A. Martin, „AutoStack Industrie: Projektziele, Status und Erfahrungen,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff: Vollversammlung zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), 05.-06. Dezember 2018*, Berlin.
- [73] M. Henneka, W. Köppel, K. Kröger und D. Gerstein, „Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten (Busstudie),“ 2019. [Online]. Available: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201810-busstudie-abschlussbericht.pdf>. [Zugriff am 23. September 2019].
- [74] S. Herbst, „Toyota’s hydrogen and electrification strategy,“ in *f-cell 2019, 10-11 September 2019, Stuttgart*.
- [75] Ministry of Economy, Trade and Industry, „The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells: Industry-academia-government action plan to realize “Hydrogen Society” (overall),“ [Online]. Available: <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-3.pdf>. [Zugriff am 15. Januar 2020].
- [76] Toyota Deutschland, „Neuwagen,“ [Online]. Available: <https://www.toyota.de/automobile/prius/>. [Zugriff am 15. Januar 2020].
- [77] O. Gutt, Interviewee, *Persönliche Mitteilung*. [Interview]. 8. September 2017.
- [78] S. Geitmann, „Linde beendet Beezero,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 5, Juli 2018.
- [79] D. Bönnighausen, „Hyundai nennt Produktionszahlen für FE Fuel Cell,“ 20. Juni 2017. [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2017/06/20/hyundai-nennt-produktionszahlen-des-fe-fuel-cell-concept/>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].
- [80] S. Geitmann, „Nexo-Premiere in Offenbach: Hyundai präsentiert neues Brennstoffzellenmodell,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 32-33, April 2018.
- [81] S. Geitmann, „Dieses Auto macht glücklich: Zu Besuch im Autohaus Päsler,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 36-37, Januar 2019.

- [82] Hyundai Motor Deutschland GmbH, „Pressemappen: Nexo,“ [Online]. Available: <https://www.hyundai.news/de/pressemappen-modelle/gallery/images/13/Nexo/>. [Zugriff am 17. Januar 2020].
- [83] J. Wieler, „Nah am Wasser,“ *ADAC Motorwelt*, pp. 32-37, Oktober 2018.
- [84] S. Geitmann, „Toyota setzt auf die Brennstoffzelle: Probefahrt mit dem Mirai,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 28-29, April 2017.
- [85] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „CleverShuttle startet Service in Stuttgart,“ 29. Mai 2018. [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/clevershuttle-startet-service-in-stuttgart>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].
- [86] Toyota Deutschland GmbH, „Toyota Mirai Concept: Ausblick auf zweite Modellgeneration,“ 11. Oktober 2019. [Online]. Available: https://www.toyota.de/news/mirai_concept.json. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [87] Toyota Deutschland GmbH, „Mirai,“ [Online]. Available: <https://www.toyota-media.de/blog/toyota-modelle/thema/mirai/bilder>. [Zugriff am 17. Januar 2020].
- [88] American Honda Motor Co., Inc., „Clarity Fuel Cell,“ [Online]. Available: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].
- [89] Honda Deutschland, „<https://www.honda.de/cars/world-of-honda/news-events/2019-08-08-honda-uebergibt-brennstoffzellenfahrzeug.html>,“ 8. August 2019. [Online]. Available: <https://www.honda.de/cars/world-of-honda/news-events/2019-08-08-honda-uebergibt-brennstoffzellenfahrzeug.html>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].
- [90] T. Brachmann, Interviewee, *Persönliche Mitteilung*. [Interview]. 5. September 2017.
- [91] C. Mohrdieck, „Mobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle: Was wurde seit 2006 erreicht? Daimler Brennstoffzellenaktivitäten und die Schlüsselrolle des NIP,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle: Ergebniskonferenz des NIP: 14.-15. Dezember 2016, Berlin*.
- [92] Daimler AG, „Mercedes-Benz Cars auf der IAA 2017: Aufsehen erregende Fahrzeug-Neuheiten und innovative Veranstaltungsformate vom Erfinder des Automobils,“ 21. August 2017. [Online]. Available: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Cars-auf-der-IAA-2017-Aufsehen-erregende-Fahrzeug-Neuheiten-und-innovative-Veranstaltungsformate-vom-Erfinder-des-Automobils.xhtml?oid=28924491>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].
- [93] Daimler AG, „Mercedes-Benz GLC F-Cell: Besonderer Hybrid mit Brennstoffzelle,“ 27. September 2019. [Online]. Available: <https://www.daimler.com/produkte/pkw/mercedes-benz/glc-f-cell.html>. [Zugriff am 15. Oktober 2019].

- [94] S. Geitmann, „Brennstoffzelle kommt sicherlich nach 2025: Daimler und Ford beenden AFCC,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 31, Juli 2018.
- [95] S. Geitmann, „Keine Offensive bei Daimler,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 37, Januar 2019.
- [96] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV: Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte,“ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2018.
- [97] D. Snauwaert, Interviewee, *Persönliche Mitteilung und Dokumentenbereitstellung*. [Interview]. 15. Januar 2020.
- [98] G. Van Hecke, „Wasserstoffbusse - Der Weg zu Nullemissionen!,“ in *Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop 2.0: Batterie + Brennstoffzelle. War's das mit Otto und Diesel?*, 07. September 2017, Duisburg.
- [99] T. Herbert, „Einsatz von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im ÖPNV,“ in *Fachtagung Öffentlicher Nahverkehr, 15. Juni 2017*, Hannover.
- [100] S. Geitmann, „Engpass bei der Produktion von BZ-Bussen: Große Nachfrage, aber kaum Angebote,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 32-35, April 2019.
- [101] S. Geitmann, „Daimler baut BZ-Technik in Nutzfahrzeuge ein: Brennstoffzellenbusse frühestens ab 2022,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 35-36, Oktober 2018.
- [102] Element Energy Limited, „Strategies for joint procurement of fuel cell buses: A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking,“ Brussels, 2018.
- [103] S. Geitmann, „Bekanntnis zu Brennstoffzellenbussen: European Zero Emission Bus Conference in Köln,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 36-38, April 2019.
- [104] K. Stolzenburg, „Übersicht und Zwischenfazit zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellenbussen,“ in *25. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, 07.-10. November 2018, Stralsund.*
- [105] S. Schaal, „H2Bus: Neues Konsortium für Brennstoffzellen-Busse,“ 4. Juni 2019. [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2019/06/04/h2bus-neues-konsortium-fuer-brennstoffzellen-busse/>. [Zugriff am 10. Oktober 2019].
- [106] F. Koch und M. Dolman, „A European Approach for the Commercialization of Fuel Cell Buses in Public Transport,“ in *evs 30: The 30th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 9-11 October 2017*, Stuttgart.

- [107] J. Conrad, „BIC-H2: Fuel Cell Buses and Infrastructure in the Cologne Region,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff: Vollversammlung zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), 05.-06. Dezember 2018*.
- [108] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 6. Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/winzenhoeler-erster-brennstoffzellenbus-fuer-den-oepnv-in-hessen>. [Zugriff am 23. Juni 2019].
- [109] EMCEL GmbH, „Wie entwickeln sich die Preise für Brennstoffzellenbusse?,“ 16. Mai 2018. [Online]. Available: <https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/>. [Zugriff am 23. Juni 2019].
- [110] B. Reuter und M. Faltenbacher, „Betankung von BZ-Busflotten: NewBusFuel – Wirtschaftliche Versorgung mit Wasserstoff,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 28-29, Januar 2018.
- [111] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, „Annual Work Plan and Budget,“ Brussels, 2018.
- [112] C. Navas, „Making Hydrogen and Fuel Cells an everyday reality,“ in *Decarbonising heavy-duty road transport: GREAT and HyER seminar, 31 January 2018, Brussels*.
- [113] European Commission, „Hydrogen fuel cell trucks for heavy-duty, zero emission logistics,“ [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/224393/factsheet/en>. [Zugriff am 24 October 2019].
- [114] A. Kampker, „StreetScooter: Wertschöpfung für Elektromobilität in NRW,“ in *17. Jahrestreffen des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität NRW, 30. November 2017, Düsseldorf*.
- [115] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „H2M und StreetScooter kooperieren bei Wasserstoffmobilität,“ 4. Dezember 2017. [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/h2m-und-streetscooter-kooperieren-bei-wasserstoffmobilitaet>. [Zugriff am 24 Juni 2019].
- [116] StreetScooter, „StreetScooter im Einsatz: Westnetz,“ [Online]. Available: <https://www.streetscooter.eu/de/stories/streetscooter-im-einsatz-westnetz/>. [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [117] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „DHL und StreetScooter entwickeln neuen Elektrotransporter mit Wasserstoff-Technologie,“ 24. Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/dhl-und-streetscooter-entwickeln-neuen-elektrotransporter-mit-wasserstoff-technologie>. [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [118] Symbio, „Zero Emission Mobility Solutions,“ [Online]. Available: <https://www.symbio.one/en/>. [Zugriff am 25. Juni 2019].

- [119] SymbioFCCell, „Solution Datasheet: HyKangoo by SymbioFCCell,“ [Online]. Available: https://cdn.website-start.de/proxy/apps/aesai6/uploads/gleichzwei/instances/1D102608-ECDF-4AFB-B48E-53C4FCB157FC/wcinstances/epaper/35baa0f7-b5cc-4ebe-9f25-c93d84b91a38/pdf/Datasheet-HyKangoo_ANLEG.pdf. [Zugriff am 25. Juni 2019].
- [120] S. Geitmann, „Show der elektrischen Lastesel: IAA Nutzfahrzeuge in Hannover,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 30-31, Januar 2019.
- [121] S. Geitmann, „Erster H2-Truck auf der Straße: Schweiz eröffnet ein neues Kapitel H2-Geschichte,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 30-31, Juli 2017.
- [122] H2 Energy AG, „Chancen und Herausforderungen des urbanen Wirtschaftsverkehrs,“ in *NOW Workshop urbaner Wirtschaftsverkehr – Herausforderungen, Chancen und Perspektiven*, 18. Oktober 2017, Berlin.
- [123] H2 Energy, „Unsere Geschäftsfelder,“ [Online]. Available: <https://h2energy.ch/geschaeftsfelder-2/>. [Zugriff am 25. Juni 2019].
- [124] H2 Energy AG, „Hyundai Motor und H2 Energy bringen die weltweit erste Flotte von tausend Wasserstoff-Elektro-Nutzfahrzeugen auf den Schweizer Markt,“ 19. September 2018. [Online]. Available: <https://h2energy.ch/hyundai-motor-und-h2-energy-bringen-die-weltweit-erste-flotte-von-tausend-wasserstoff-elektro-nutzfahrzeugen-auf-den-schweizer-markt/>. [Zugriff am 10. Oktober 2019].
- [125] H2 Energy AG, „Hyundai und H2 Energy unterzeichnen Joint Venture-Vertrag und übernehmen damit eine führende Rolle in der Einführung der Wasserstoff-Elektromobilität – in der Schweiz und in Europa,“ 15. April 2019. [Online]. Available: <https://h2energy.ch/hyundai-motor-und-h2-energy-unterzeichnen-joint-venture-vertrag-zur-fuehrung-in-der-wasserstoff-mobilitaet-in-europa/>. [Zugriff am 10. Oktober 2019].
- [126] R. Huber, „Commercialization HD Fuel Cell Trucks: How to Get Going,“ in *f-cell 2019*, 10-11 September 2019, Stuttgart.
- [127] D. Hofer, „H2 Mobility Switzerland: On the move together: A new marketplace for H2 in Switzerland,“ in *f-cell 2019*, 10-11 September 2019, Stuttgart.
- [128] R. Griesser, Interviewee, *Persönliche Mitteilung und Dokumentenbereitstellung*. [Interview]. 15. Januar 2020.
- [129] Nikola Motor Company, „Nikola One Truck Revealed Tonight @ 7:00 p.m. MST: Class 8 zero-emission hydrogen-electric truck in production by 2020,“ 1. Dezember 2016. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-one-truck-revealed-tonight-700-p-m-mst-32. [Zugriff am 11. Oktober 2019].

- [130] Nikola Motor Company, „A world-first: The powertrain for the electric longhaul truck: Nikola Motor Company and Bosch develop the commercial vehicle powertrain of the future,“ 19. September 2017. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-motor-company-and-bosch-develop-the-commercial-vehicle-powertrain-of-the-future-35. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [131] Nikola Motor Company, „Nikola Motor Company names fuel cell key suppliers,“ 9. November 2017. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-motor-company-names-fuel-cell-key-suppliers-38. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [132] Nikola Motor Company, „Anheuser-Busch Continues Leadership in Clean Energy, Places Order for 800 Hydrogen-Electric Powered Semi-Trucks with Nikola Motor Company,“ 3. Mai 2018. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/anheuser-busch-continues-leadership-in-clean-energy-places-order-for-800-hydrogen-electric-powered-semi-trucks-with-nikola-motor-company-23. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [133] Nikola Motor Company, „Nikola Launches Stunning Truck for European Market,“ 5. November 2018. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-launches-stunning-truck-for-european-market-53. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [134] Nikola Motor Company, „Industry Group Signs MOU To Develop and Test Hydrogen Fueling Hardware for Heavy Duty Vehicles,“ 21. Februar 2019. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/press_releases/industry-group-signs-mou-to-develop-and-test-hydrogen-fueling-hardware-for-heavy-duty-vehicles-56. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [135] „Nikola,“ [Online]. Available: <https://nikolamotor.com/>. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [136] Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc., „The Future of Zero-Emission Trucking Takes Another Leap Forward,“ 22. April 2019. [Online]. Available: <https://pressroom.toyota.com/the-future-of-zero-emission-trucking-takes-another-leap-forward/>. [Zugriff am 11. Oktober 2019].
- [137] R. Zimmer, „HyTrust: Auf dem Weg in die Wasserstoffgesellschaft,“ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2013.
- [138] F. Meißner, N. Hollmichel, S. Krüger und M. Tschirley, „HyTrustPlus: Kostenoptimale Marktdurchdringung von FCEV in Deutschland bis 2030 – Szenarienanalysen,“ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2016.
- [139] U. Schneider und E. Dütschke, „Wasserstoff als neuer Energieträger: HYACINTH: Europaweite Akzeptanzbefragungen,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 31-33, Januar 2017.
- [140] V. Scheidler und T. Pfaff, „Wasserstoff in der Nachbarschaft: Studie zur Wahrnehmung und Akzeptanz von H₂-Stationen,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 28-30, Juli 2019.
- [141] S. Riepe, Interviewee, *Persönliche Mitteilung*. [Interview]. 18. September 2019.

- [142] J. Wind, Interviewee, *Persönliche Mitteilung und Dokumentenbereitstellung*. [Interview]. 6. Dezember 2019.
- [143] European Commission, „Welcome to the JEC website,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec>. [Zugriff am 12. Oktober 2019].
- [144] M. Wietschel, C. Moll, S. Oberle, B. Lux, S. Timmerberg, U. Neuling, M. Kaltschmitt und N. Ashley-Belbin, „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw: Endbericht,“ [Online]. Available: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>. [Zugriff am 12. Oktober 2019].
- [145] VDI/VDE, „Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge: Bedeutung für die Elektromobilität: VDI/VDE-Studie Mai 2019,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/resource/blob/1875246/3a4ac5081799af17650c62316c183eb4/studie-brennstoffzelle-data.pdf>. [Zugriff am 12. Oktober 2019].
- [146] H2 Mobility Deutschland, „Fraunhofer Studie zu THG-Emissionen BEV und FCEV,“ 14. Juli 2019. [Online]. Available: <https://h2.live/news/860>. [Zugriff am 16. Oktober 2019].
- [147] A. Sternberg, C. Hank und C. Hebling, „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km: Studie im Auftrag der H2 Mobility,“ 13. Juli 2019. [Online]. Available: https://content.h2.live/app/uploads/2019/07/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf. [Zugriff am 16. Oktober 2019].
- [148] A. Sternberg, C. Hank und C. Hebling, „H2 MOBILITY Deutschland Zusammenfassung: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km,“ 14. Juli 2019. [Online]. Available: <https://h2.live/news/860>. [Zugriff am 16. Oktober 2019].
- [149] R. Scholz, N. Gläser, D. Paluch und T. Schmidt, „Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr: Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene: Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland,“ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2016.
- [150] Roland Berger, „Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment,“ [Online]. Available: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf. [Zugriff am 19. August 2019].
- [151] T. Nawrocki, „LNVG LINT X –Einsatz von H2-Zügen in Niedersachsen,“ in *Vollversammlung zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), 05.-06. Dezember 2018, Berlin..*
- [152] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, „Weltweit größte Brennstoffzellenzug-Flotte für den Taunus geplant,“ [Online]. Available: <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/weltweit-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-fuer-den-taunus-geplant>. [Zugriff am 19. August 2019].

- [153] S. Geitmann, „Auf der Schiene geht’s voran: Großes Interesse an Brennstoffzellenzügen,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 34-35, Januar 2018.
- [154] N. Papaiordanidis, „Mireo Plus - Hybridzug mit Batterie und Brennstoffzelle,“ in *6. Fachkonferenz Elektromobilität vor Ort des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, 26.-27. März 2019, Stuttgart*.
- [155] O. Ehret, „Wasserstoffproduktion im NIP: Studien und Projekte,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle: Ergebniskonferenz des NIP: 14.-15. Dezember 2016, Berlin*.
- [156] T. Smolinka, N. Wiebe, P. Sterchele, A. Palzer, F. Lehner, M. Jansen, S. Kiemel, R. Miehe, S. Wahren und F. Zimmermann, „Studie IndWEDe: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme,“ 2018. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf. [Zugriff am 4. Oktober 2019].
- [157] e-mobil BW: Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, „Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf,“ 2013. [Online]. Available: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Wasserstoff-Infrastruktur_fuer_eine_nachhaltige_Mobilitaet_-_final_WEB.pdf. [Zugriff am 4. Oktober 2019].
- [158] Shell Deutschland Oil GmbH, „Shell Rheinland Raffinerie: Baubeginn der weltweit größten Wasserstoff-Elektrolyse,“ 25. Juni 2019. [Online]. Available: <https://www.shell.de/ueber-uns/projects-and-sites/shell-rheinland-refinery/aktuelles/refhyne.html>. [Zugriff am 4. Oktober 2019].
- [159] W. Köppel, S. Bajohr und J. Sauer, „Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen,“ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn, 2018.
- [160] G. Müller-Syring, M. Henel, M. Poltrum, A. Wehling, E. Dannenberg, J. Gladien, M. Stötzel, F. Möhrke, F. Ortloff und F. Kratz, „Transformationspfade zur Treibhausgasneutralität der Gasnetze und Gasspeicher nach COP 21,“ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn, 2018.
- [161] R. Erler, E. Schuhmann, W. Köppel und C. Bidart, „Erweiterte Potenzialstudie zur nachhaltigen Einspeisung von Biomethan unter Berücksichtigung von Power-to-Gas und Clusterung von Biogasanlagen,“ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn, 2019.
- [162] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, „Forschungsprojekte und Studien des DVGW,“ [Online]. Available: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/>. [Zugriff am 25. Oktober 2019].

- [163] W. Lang, „Clean Energy Partnership (CEP): Arbeitsgruppe Infrastruktur,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle: Ergebniskonferenz des NIP: 14.-15. Dezember 2016, Berlin*.
- [164] S. Geitmann, „H2-Infrastruktur wächst weiter: ... aber nicht alle Stationen sind betriebsbereit,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, p. 24, Januar 2017.
- [165] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „H2 MOBILITY: Wir bauen das Tankstellennetz der Zukunft,“ [Online]. Available: <https://h2.live/h2mobility>. [Zugriff am 5. Oktober 2019].
- [166] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „Netzausbau live: Der aktuelle Stand für Deutschland,“ [Online]. Available: <https://h2.live/>. [Zugriff am 15. Januar 2020].
- [167] B. Jödecke, „Aufbau einer H2-Infrastruktur in Deutschland,“ in *Saubere Mobilität mit Wasserstoff: Vollversammlung zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), 05.-06. Dezember 2018, Berlin*.
- [168] S. Geitmann, „H2 MOBILITY – Übernehmen Sie: Wechsel von CEP zu H2 MOBILITY,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 27-29, Juli 2017.
- [169] P. Braunsdorf und S. Riepe, Interviewees, *Persönliche Mitteilungen*. [Interview]. 8. September 2017.
- [170] M. Robinius, J. Linßen, T. Grube, M. Reuß, P. Stenzel, K. Syranidis, P. Kuckertz und D. Stolten, „Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles,“ 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/322698780_Comparative_Analysis_of_Infrastructures_Hydrogen_Fueling_and_Electric_Charging_of_Vehicles. [Zugriff am 5. Oktober 2019].
- [171] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., „Defossilisierung des Transportsektors: Optionen und Voraussetzungen in Deutschland,“ 2018. [Online]. Available: https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/materialien/FVV_Kraftstoffe_Studie_Defossilisierung_R586_final_v.3_2019-06-14_DE.pdf. [Zugriff am 5. Oktober 2019].
- [172] J. Michalski, J. Zerhusen, U. Bünger, W. Zittel, S. Nicolai, S. Kharboutli, C. Monsalve und S. Ruhe, „Langfristig zahlen sich BZ-PKW aus: Infrastruktur-Studie der Ludwig-Bölkow-Stiftung,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 32-34, Oktober 2019.
- [173] S. Kupferschmid, „Infrastructure requirements for H2 / FC busses in urban bus fleets,“ in *f-cell 2019, 10-11 September 2019, Stuttgart*.
- [174] D. Frimat, „Requirements on water electrolysis for green hydrogen production: The perspective of a technical gas supplier,“ in *f-cell 2018, 18-19 September 2018, Stuttgart*.

- [175] T. Smolinka, F. Lehner, S. Kiemel und G. Tjarks, „Wasserelektrolyse ist bereit für den Markthochlauf: Studie zeigt Roadmap zur Gigawattindustrie auf,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 26-28, Oktober 2018.
- [176] J. Michalski, U. Bünger, M. Altmann und W. Weindorf, „Potenziale eines zukünftigen Energiesystems: Erkenntnisse aus der Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen,“ *HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen*, pp. 24-26, Oktober 2019.
- [177] J. Michalski, M. Altmann, U. Bünger und W. Weindorf, „Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen,“ 2019. [Online]. Available: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/bericht_wasserstoffstudie_nrw-2019-04-09_komp.pdf. [Zugriff am 29. Oktober 2019].
- [178] Forschungszentrum Jülich: Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), „Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050: Kurzfassung,“ 31. Oktober 2019. [Online]. Available: https://fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf;jsessionid=7FD8749420B7853DC0408FD101052827?__blob=publicationFile. [Zugriff am 31. Oktober 2019].
- [179] M. Robinius, „Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050: Detailergebnisse,“ 31. Oktober 2019. [Online]. Available: https://fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_talk_detailedResults.pdf;jsessionid=7FD8749420B7853DC0408FD101052827?__blob=publicationFile. [Zugriff am 31. Oktober 2019].
- [180] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, „Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition,“ 2019. [Online]. Available: https://fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf. [Zugriff am 2 November 2019].
- [181] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, „Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition,“ 6 February 2019. [Online]. Available: https://fch.europa.eu/sites/default/files/20190206_Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Keynote_Final.pdf. [Zugriff am 2 October 2019].
- [182] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, „Daten und Fakten Erdgas: Gas-Mobilität: PKW, LKW, Bus: Umweltauswirkungen, Technologie und Wirtschaftlichkeit gasbasierter Mobilität,“ April 2018. [Online]. Available: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/daten-fakten-gasmobilitaet.pdf>. [Zugriff am 23. September 2019].
- [183] Deutsche Energie-Agentur, „LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität,“ [Online]. Available: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/Ing-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/>. [Zugriff am 15. Januar 2020].

- [184] Deutsche Energie-Agentur, „LNG-Tankstellen: Neue Karte zeigt Standorte,“ 21. August 2019. [Online]. Available: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/Ing-tankstellen-neue-karte-zeigt-standorte/>. [Zugriff am 23. September 2019].
- [185] T. Gnann, A. Kühn, C. Moll, D. Paufler-Mann, P. Plötz, D. Rüdiger, A. Sauer, M. Schellert, S. Stütz, A. Thielmann, V. Waßmuth und M. Wietschel, „Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie: Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential,“ 2017. [Online]. Available: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 21. September 2019].
- [186] ADAC, „So viele Tankstellen gibt es in Deutschland,“ 27. März 2019. [Online]. Available: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>. [Zugriff am 21. September 2019].
- [187] NGVA Europe, „Vehicle Catalogue 2019,“ [Online]. Available: https://www.ngva.eu/wp-content/uploads/2019/08/NGVA-Europe_VehicleCatalogue_2019.pdf. [Zugriff am 21. September 2019].
- [188] M. Murphy, „Autogipfel: Bis zu 6000 Euro: Kaufprämie für Elektroautos steigt,“ 5. November 2019. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/autogipfel-bis-zu-6000-euro-kaufpraemie-fuer-elektroautos-steigt/25188854.html?ticket=ST-68532024-6MM9utAXnMcVO6Ule4yr-ap6>. [Zugriff am 7. November 2019].
- [189] Power-to-X-Allianz, „Eckpunktepapier für ein Markteinführungsprogramm von Power-to-X-Technologien,“ Oktober 2017. [Online]. Available: https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017_okt_eckpunktepapier_power_to_x_allianz.pdf. [Zugriff am 7. November 2019].
- [190] Daimler Global Media Site, „Einstieg in eine neue Ära der E-Mobilität,“ 10. Oktober 2018. [Online]. Available: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL.xhtml?oid=41478388&ls=L2RIL2luc3RhbmluL2tvLnhodG1sP29pZD00MTQ3NTc3MCZhamF4UmVxdWVzdHNNYWRIPTEmcmVsSWQ9MTAwMSZmcm9tT2lkPTQxNDc1NzcwJmJvcmlcnM9dHJ1ZSZyZXN1bHRJbmlvVHlwZUIk>. [Zugriff am 19. Juni 2019].
- [191] EMCEL GmbH, „Warum sind Brennstoffzellenbusse noch nicht so verbreitet?,“ 16. Januar 2019. [Online]. Available: <https://emcel.com/de/brennstoffzellenbusse-einstiegshuerden/>. [Zugriff am 21. Juni 2019].
- [192] Fuel Cell Electric Buses knowledge base, „JIVE 2,“ [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2>. [Zugriff am 23 Juni 2019].
- [193] S. Altenburg, A. Auf der Maur, S. Eckert, M. Faltenbacher, A. Labinsky und B. Reuter, „Nullemissionsnutzfahrzeuge: Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative,“ Stuttgart, 2017.

[194] Deutsche Energie-Agentur, „LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität,“ [Online]. Available: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/>. [Zugriff am 15. Januar 2020].

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BZ	Brennstoffzelle
CEP	Clean Energy Partnership
CHIC	Clean Hydrogen in European Cities
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlendioxid
CVD	Clean Vehicles Directive
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FQD	Fuel Quality Directive
g	Gramm
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff (Molekül)
H2ME 2	Hydrogen Mobility Europe 2
HTEL	Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse
JIVE	Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
MEHRLIN	Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellen-technologie
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMEL	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
PKW	Personenkraftwagen
PtX	Power-to-X
RCS	Regulations, Codes and Standards
RED	Renewable Energy Directive
t	Tonne
tkm	Tonnenkilometer
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
TRL	Technologiereifegrade
TtW	Tank-to-Wheel
TWh	Terawattstunde
WtW	Well-to-Wheel
€	Euro

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.1: Aufbau des Mercedes-Benz GLC F-CELL [68].....	25
Abbildung 5.2: Komponenten und Funktionsprinzipien einer PEM-Brennstoffzelle [66].	25
Abbildung 5.3: Hyundai Nexo [80], [78], [81].....	27
Abbildung 5.4: Toyota Mirai [85], [69], [81].	28
Abbildung 5.5: Aufbau des Van Hool Brennstoffzellenbusses A330FC [95].....	29
Abbildung 5.6: Übersicht Busprojekte mit EU-Förderung [102].	31
Abbildung 5.7: Aufbau Prototyp Brennstoffzellen-LKW der Firma H2 Energy AG [120].	35
Abbildung 5.8: Hyundai Truck [126], [122].	36
Abbildung 5.9: Nikola One. Technische Daten für Nikola One und Nikola Two [133].	37
Abbildung 5.10: Toyota Truck [134].	37
Abbildung 5.11: Well-to-Wheel Vergleich der Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche verschiedener PKW [140].	39
Abbildung 5.12: Lebenszyklusvergleich von Brennstoffzellen-, Batterie- und Diesel-PKW 2020 bis 2030 bei einer Laufleistung von 150.000 km [146].	41
Abbildung 5.13: Ergebnisse erweiterter WtW-Analyse verschiedener Antriebskonzepte für Busse für den Personennahverkehr [73].	42
Abbildung 6.1: Wasserstoff-Gestehungskosten (nur Herstellung) [67].	47
Abbildung 6.2: Gegenüberstellung verschiedener Trailer-Konzepte zum Straßentransport von gasförmigen und flüssigen Wasserstoff [67].	48
Abbildung 6.3: Ausbau H2 Mobility-Tankstellennetz für BZ-PKW in Deutschland: Stand 2018 und Planung für 2019 und 2021. Eigene Darstellung basierend auf [165].	50
Abbildung 6.4: Vergleich der kumulierten Investitionen des Infrastrukturaufbaus für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge [168].	52
Abbildung 6.5: Tankstellenkonzepte für schwere Nutzfahrzeuge [171].	53
Abbildung 7.1: Wasserstoffverbräuche verschiedener mobiler Anwendungen [172].	56
Abbildung 7.2: Entwicklung der Wasserstoffnachfrage nach Szenarien bis 2030 gemäß [173].	57
Abbildung 7.3: Kraftstoffmix und Antriebsart im PKW- und Güterverkehr 2050 [176].	59
Abbildung 7.4: Anteil Wasserstoff am gesamten Energiebedarf der EU bis 2050 gemäß Szenarien der Hydrogen Roadmap Europe [179].	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-I: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen in der EU [2].	5
Tabelle 3-II: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen in Deutschland [13].	8
Tabelle 3-III: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen in Frankreich [17].	10
Tabelle 3-IV: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen im Vereinigten Königreich [25].	11
Tabelle 3-V: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen in den Niederlanden [30].	13
Tabelle 3-VI: BZ-Fahrzeuge und H ₂ -Tankstellen in Norwegen [36].	14