

Technische Hochschule Ingolstadt

Fakultät: Business School

Studiengang: Automotive & Mobility Management (M.A.)

Masterarbeit

Thema: Grüner Wasserstoff: Energieträger der Zukunft?
Eine Untersuchung aus Perspektive des deutschen Straßenverkehrssektors

Vor- und Zuname: Florin Miller

ausgegeben am: 03.07.2020

abgegeben am: 03.01.2021

Erstprüfer: Prof. Dr. oec. HSG Martin Bader

Zweitprüfer: Prof. Dr. rer. pol. Michael Mayr

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	9
1.1 Relevanz.....	9
1.2 Einordnung	13
1.3 Ziel der Arbeit	19
1.4 Abgrenzung und Positionierung.....	20
1.5 Aufbau und Vorgehensweise	20
1.6 Methodik.....	22
2 Grundlagen zu Wasserstoff	25
2.1 Eigenschaften.....	25
2.2 Herstellungsverfahren.....	27
2.2.1 Herstellungsverfahren auf Basis fossiler Energieträger	27
2.2.2 Herstellungsverfahren auf Basis von Biomasse.....	33
2.2.3 Herstellungsverfahren auf Basis von Wasser	37
2.3 Wasserstoff und Energiewende – „Grüner Wasserstoff“	40
3 Grundlagen zum Straßenverkehr in Deutschland	41
3.1 Der Verkehrssektor.....	41
3.2 Gliederung des Straßenverkehrs.....	45
4 Wasserstoff im Straßenverkehr	46
4.1 Technologie	47
4.2 Status Quo.....	48
5 Industrielle Herstellung von grünem Wasserstoff.....	50
5.1 Technologie.....	50
5.2 Status Quo.....	54

6	Fallstudie 2050: Grüner Wasserstoff im deutschen Straßenverkehr	58
6.1	Einleitung.....	58
6.1.1	Methodenbeschreibung und Ziel der Fallstudie	58
6.1.2	Relevanz und Dringlichkeit zur Dekarbonisierung im Straßenverkehr	60
6.2	Status Quo & Referenzsituation	62
6.2.1	Wasserstoff im Straßenverkehr – Deutschland 2020.....	62
6.2.2	Fahrzeuge.....	63
6.2.3	Infrastruktur.....	66
6.2.4	Förderung	68
6.2.5	Produktion.....	70
6.2.6	Fazit Status quo.....	71
6.3	Szenario 1 – Konservativer Entwicklungspfad.....	72
6.3.1	Untersuchungsfrage 1	73
6.3.2	Untersuchungsfrage 2	76
6.3.3	Untersuchungsfrage 3	78
6.3.4	Untersuchungsfrage 4	81
6.3.5	Untersuchungsfrage 5	83
6.3.6	Untersuchungsfrage 6	84
6.3.7	Untersuchungsfrage 7	87
6.4	Szenario 2 – Optimistischer Entwicklungspfad	89
6.5	Fazit Fallstudie	89
7	Zusammenfassung und Fazit	91
8	Literatur.....	92
	Ehrenwörtliche Erklärung zur Masterarbeit	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beitrag der Handlungsfelder zur Treibhausgasreduktion in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.	10
Abbildung 2: CO ₂ -Emissionen des deutschen Verkehrssektors 1990-2018 in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq. (zzgl. Ziele 2030 und 2050, schematisch).	11
Abbildung 3: Relativer Gesamtenergieverbrauch nach Energieträger in der EU in Prozent.	14
Abbildung 4: Entwicklung der energetischen Wasserstoffnachfrage aus Industrie und Verkehr in TWh/a.	15
Abbildung 5: Relative Minderung von Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 nach Handlungsfeldern in Prozent.	18
Abbildung 6: Phasengliederung der Untersuchung.	21
Abbildung 7: Idealtypischer Forschungsprozess einer Fallstudie.	24
Abbildung 8: Prozess der Dampfreformierung (Ausschnitt).	29
Abbildung 9: Anlage zur Dampfreformierung der Linde AG.	30
Abbildung 10: Konversionspfade thermochemischer Wasserstoffherstellung aus Biomasse.	35
Abbildung 11: Konversionspfade biochemischer Wasserstoffherstellung aus Biomasse.	36
Abbildung 12: Bestandteile eines Verkehrssystems.	41
Abbildung 13: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018 nach Sektoren in Petajoule.	42
Abbildung 14: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor 1990-2018 in Petajoule.	43
Abbildung 15: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland im Jahr 2018 nach Verkehrsträger in Petajoule.	43
Abbildung 16: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland im Jahr 2018 nach Energieträger in Petajoule.	44
Abbildung 17: Kraftfahrzeugbestand 1. Januar 2020 nach Fahrzeugklasse in Prozent.	45
Abbildung 18: Schema einer alkalischen Elektrolysezelle.	51
Abbildung 19: Schema einer PEM-Elektrolysezelle.	53

Abbildung 20: Systemaufbau eines alkalischen Elektrolyseurs.	54
Abbildung 21: Kraftwerk am Großen Assuan Damm.	55
Abbildung 22: Elektrolyseanlage am Assuan-Staudamm.	56
Abbildung 23: PEM-Elektrolyseanlage REFHYNE in Wesseling, Deutschland.	57
Abbildung 24: Szenarien der Fallstudie.	60
Abbildung 25: CO2 Emissionen nach Sektoren 1990 in Millionen Tonnen.	61
Abbildung 26: CO2 Emissionen nach Sektoren 2018 in Millionen Tonnen.	61
Abbildung 27: Betankung eines GLC F-CELL.	63
Abbildung 28: Antriebskonzepte PKW.	65
Abbildung 29: Gesellschafterstruktur H2 Mobility.	66
Abbildung 30: Wasserstofftankstellennetz.	67
Abbildung 31: H2-Mix im Straßenverkehr 2020 in Prozent.	71
Abbildung 32: Kehrmachine mit Brennstoffzelle.	74
Abbildung 33: Kostendegression von H ₂ -Pkw in Prozent.	75
Abbildung 34: Bedarf- und Kapazitätsprognosen für grünen Wasserstoff in Terrawattstunden.	77
Abbildung 35: Markthochlauf für die industrielle Produktion von H ₂ .	80
Abbildung 36: Erzeugung Erneuerbare Energien.	82
Abbildung 37: Vision eines Wasserstoffnetzes.	86

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
AEL	Alkalische Elektrolyse
ATR	Autotherme Reformierung
BEV	Battery Electric Vehicle
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BZF	Brennstoffzellenfahrzeug
Bzgl.	Bezüglich
Bzw.	Beziehungsweise
Ca.	Circa
CCS	Carbon Capture and Storage
CH ₄	Methan
C _n H _m	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente: Einheit zur Beschreibung des Treibhauspotentials von Gasen
D.h.	Das heißt
Dena	Deutsche Energieagentur
DWA	Druckwechseladsorption
E	Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EE-Strom	Strom aus erneuerbaren Energien
EL	Elektrifizierung
Engl.	Englisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
Ggü.	Gegenüber

GW	Gigawatt
H ⁰	Reaktionsenthalpie
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	International Energy Agency
IPCEI	Important Project of Common European Interest
J/m ³	Joule pro Kubikmeter
K	Kelvin
Kfz	Kraftfahrzeug
Kg	Kilogramm
KJ	Kilojoule
KJ/mol	Kilojoule pro mol
Kmol	Kilomol
KOH	Kalilauge
KW	Kilowatt
KWh	Kilowattstunde(n)
KWh/kg	Kilowattstunden pro Kilogramm
LKW	Lastkraftwagen
M	Masse
M ³	Kubikmeter
Mbar	Millibar
Mg	Milligramm
Mio.	Millionen
Mt	Millionen Tonnen
MW	Megawatt
N/A	Not available
NIP	Nationales Innovationsprogramm
Nm ³	Normkubikmeter

Nm ³ /h	Normkubikmeter pro Stunde
O ₂	Sauerstoff
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PEMFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
Pkw	Personenkraftwagen
POX	Partielle Oxidation
PTFE	Polytetrafluorethylen
RED II	Renewable Energy Directive II
SMR	Steam Methane Reforming
SOEL	Solid Oxide Elektrolysis
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
THGMP	Treibhausgasminderungspotential
TM	Technologiemix
TWh	Terawattstunde
TWh/a	Terrawattstunden pro Jahr
V	Volumen
Vgl.	Vergleiche
Vol.-%	Volumenprozent
Z.B.	Zum Beispiel
Zzgl.	zuzüglich

1 Einleitung

Dieses Kapitel erläutert zunächst die Relevanz bzw. Problemstellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Anhand der Zielsetzung und Forschungsfragen soll das Anforderungsprofil der Thesis geschärft und eine klare Erwartungshaltung an die finalen Ergebnisse definiert werden.

Eine inhaltliche Abgrenzung des Untersuchungsgebiets ergibt sich aus den formalen und zeitlichen Restriktionen und beeinflusst die Auswahl der Untersuchungsmethodik.

Anschließend wird eine mögliche Vorgehensweise zur Lösung des Problems vorgestellt, die zu einem Erkenntnisfortschritt in Bezug auf grünen Wasserstoff als Energieträger der Zukunft im deutschen Straßenverkehr liefern soll.

1.1 Relevanz

Eine der größten Herausforderungen für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen zur Abmilderung des globalen Klimawandels. Am 12. Dezember 2015 verabschiedete die internationale Staatengemeinschaft mit dem „Übereinkommen von Paris“ eine multilaterale Vereinbarung mit dem Ziel, die Weltwirtschaft auf klimafreundliche Art und Weise zu verändern.¹ Die 195 ratifizierenden Staaten² bekennen sich damit völkerrechtlich verbindlich dazu, die Limitierung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu halten.³ Der von der deutschen Bundesregierung im Jahr 2016 verabschiedete „Klimaschutzplan 2050“ stellt die für Deutschland geltende und vom Pariser Abkommen geforderte Klimaschutzlangfriststrategie dar.⁴ Als Handlungsleitbild für die deutsche Klimaschutzpolitik definiert der Plan die weitgehende Treibhausgasneutralität der Bundesrepublik Deutschland bis zur Mitte des Jahrhunderts und eine Minderung der Treibhausgasemissionen um mindestens 55% bis 2030.⁵ Darüber hinaus hat sich die Bundesregierung auch im Rahmen der europäischen Energie- und Klimaziele

¹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017b.

² Vgl. Vereinte Nationen, 2015.

³ Vgl. Umweltbundesamt, 2020b.

⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017a.

⁵ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016, S. 6 ff.

dazu verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 – 95% im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Das von der Kommission von der Leyen vorgestellte Konzept „European Green Deal“ strebt an, die gesamt-europäischen Ziele analog der nationalen Verpflichtungen Deutschlands weiter zu verschärfen.⁶ Abgeleitet vom Klimaschutzziel 2050 formuliert der nationale Klimaschutzplan der Bundesrepublik Meilensteine und Maßnahmen zur Zielerreichung in fünf zentralen Handlungsfeldern. Die fünf Handlungsfelder leiten sich aus den folgenden fünf Emissionshauptquellen ab: Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie sowie Landwirtschaft, Landnutzung und Forstwirtschaft.⁷ Pro Handlungsfeld wird definiert, welchen Beitrag dieser Sektor zur Reduktion von Treibhausgasen zu leisten hat (siehe Abbildung 1).

Handlungsfeld	1990 (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.)	2014 (in Mio. Ton- nen CO ₂ -Äq.)	2030 (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.)	2030 (Minderung in % ggü. 1990)
Energiewirtschaft	466	358	175 - 183	62 - 61 %
Gebäude	209	119	70 - 72	67 - 66 %
Verkehr	163	160	95 - 98	42 - 40 %
Industrie	283	181	140 - 143	51 - 49 %
Landwirtschaft	88	72	58 - 61	34 - 31 %
Teilsomme	1.209	890	538 - 557	56 - 54 %
Sonstige	39	12	5	87 %
Gesamtsumme	1.248	902	543 - 562	56 - 55 %

Abbildung 1: Beitrag der Handlungsfelder zur Treibhausgasreduktion in Mio. Tonnen CO₂-Äq.⁸

Für den deutschen Verkehrssektor, mit Treibhausgasemissionen in Höhe von 163 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent („CO₂-Äq.“) im Basisjahr 1990, bedeutet dies, dass bis zum Meilenstein 2030 eine Reduktion um mindestens 40% auf ca. 98 Mio. Tonnen CO₂-Äq. erfolgen muss.⁹ Somit hat der Verkehrssektor in Deutschland die durch ihn verursachten Treibhausgasemissionen in den kommenden

⁶ Vgl. Europäische Kommission, 2019, S. 7.

⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016, S. 32.

⁸ Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016, S. 33.

⁹ Vgl. Umweltbundesamt, 2020b; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b.

zehn Jahren um mindestens 65 Mio. Tonnen CO₂-Äq. zu reduzieren. In den nächsten 30 Jahren soll der Verkehrssektor nahezu dekarbonisiert¹⁰ und damit weitgehend treibhausgasneutral organisiert werden (siehe Abbildung 2). Um die beschriebenen Ziele zu erreichen sind die Maßnahmen so zu gestalten, dass sie möglichst schnell wirken, um schon bis 2030 ihre Wirkung zu entfalten, und sollen gleichzeitig bereits heute solche Entwicklungen anstoßen, die dazu beitragen den Verkehr bis 2050 nahezu vollständig zu dekarbonisieren (d.h. 80 – 95% der Emissionen im Vergleich zu 1990).¹¹

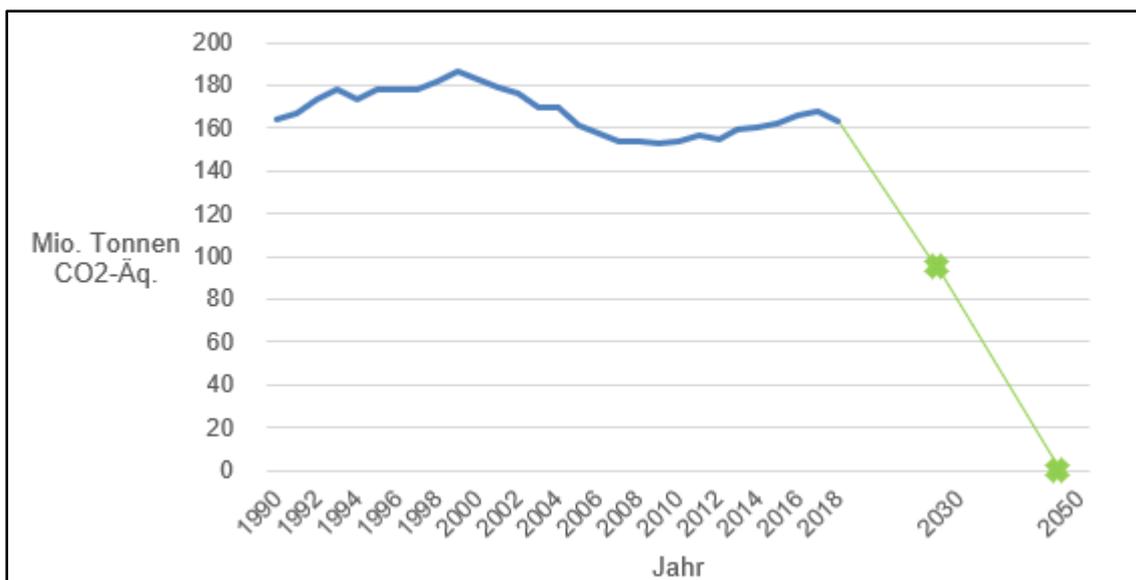


Abbildung 2: CO₂-Emissionen des deutschen Verkehrssektors 1990-2018 in Mio. Tonnen CO₂-Äq. (zzgl. Ziele 2030 und 2050, schematisch).¹²

Im Hinblick auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist der Verkehr aber nicht als isolierter Sektor zu betrachten, sondern vielmehr als Teil eines integrierten Energiesystems. Innerhalb dieses abgestimmten Energiesystems können durch intelligente Kopplung aller Sektoren sinnvolle Transformationspfade hin zu einer Treibhausgasneutralität in 2050 entwickelt werden. Die Senkung des Endenergieverbrauchs durch Effizienzanstrengungen ist dabei in allen Sektoren notwendig. Darüber hinaus ist der massive Ausbau erneuerbarer Energien die Grundvoraussetzung zur Erreichung der Klimaziele. Eine umfangreiche Studie

¹⁰ Dekarbonisierung meint die Verminderung kohlenstoffhaltiger Emissionen (besonders durch die Abkehr von fossilen Energieträgern)

¹¹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018, S. 7.

¹² Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b.

der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) zur integrierten Energiewende sieht darüber hinaus die synthetischen erneuerbaren Energieträger als dritten entscheidenden Faktor für eine erfolgreiche Energiewende.¹³

Ein synthetischer Kraftstoff, der aktuell besonders im Fokus öffentlicher Aufmerksamkeit steht, ist der sogenannte „grüne Wasserstoff“. Als grüner Wasserstoff wird Wasserstoff bezeichnet, der durch das Verfahren der Elektrolyse aus Wasser hergestellt wird. Für die Elektrolyse darf dabei nur Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommen.¹⁴ Damit ist der Kraftstoff in seiner Herstellung klimaneutral. Besonders interessant ist die Wasserstoffelektrolyse im Rahmen der Energiewende, weil in Hochzeiten, in denen die Produktion erneuerbarer Energien den Strombedarf übersteigt, überschüssiger Strom zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden kann. Dieser wiederum kann direkt oder nach weiteren Syntheseschritten als klimaneutraler Kraftstoff in alle Sektoren zurückfließen. Gerade für den Verkehrssektor, der in besonderem Maße von Mineralölen abhängig ist, gilt Wasserstoff neben der Elektrisierung als zukunftssträchtiger Kraftstoff.

So stellt etwa Forschungsministerin Anja Karliczek fest: „Im Verkehr kann Wasserstoff bis 2050 zum Kraftstoff Nummer eins werden, bis zu 70 Prozent der Autos und der leichten Nutzfahrzeuge könnten damit fahren.“¹⁵ Außerdem beschreibt Sie grünen Wasserstoff als eine zentrale Option zur Erreichung der Klimaziele 2030 und darüber hinaus.¹⁶ Wirtschaftsminister Peter Altmaier möchte die industrielle Erzeugung von grünem Wasserstoff vorantreiben. In einem Interview mit dem Handelsblatt sagt der Minister: „Ich will, dass das Wasserstoffthema fliegt, und zwar auch im wörtlichen Sinne. Synthetische Kraftstoffe, die auf Basis von grünem Wasserstoff hergestellt werden, eröffnen die Möglichkeit für klimaneutrales Fliegen.“¹⁷ Ressortübergreifend hat die Bundesregierung im Juni 2020 eine Nationale Wasserstoffstrategie veröffentlicht um ihrer internationalen Ver-

¹³ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 11.

¹⁴ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019c, S. 5.

¹⁵ Karliczek, 3. November 2019.

¹⁶ Vgl. Karliczek, 3. November 2019.

¹⁷ Koch und Stratmann, 2019.

antwortung gerecht zu werden und „(...) Wasserstoff als Dekarbonisierungsoption zu etablieren.“¹⁸ Auch hier wird Wasserstoff als vielseitiger Energieträger der Zukunft beschrieben und festgestellt, dass die Mobilitätsanwendungen große Potentiale zur Anwendung von Wasserstoff bergen.¹⁹ Darüber hinaus stellt die Bundesregierung klar, dass aus ihrer Sicht „(...) nur Wasserstoff, der auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wurde („grüner“ Wasserstoff), auf Dauer nachhaltig [ist].“²⁰

Ausgehend von den europäischen Klimaschutzzielen sowie den politischen Bemühungen der deutschen Politik lässt sich die Bedeutung sowie die Dringlichkeit der Dekarbonisierung deutlich erkennen. Insbesondere der Verkehrssektor bietet hierbei noch viel Potenzial, das insbesondere durch den Einsatz von Wasserstofftechnologie gehoben werden könnte. Mit der Analyse der Möglichkeiten, den Chancen und Herausforderungen des Einsatzes von nachhaltig produziertem („grünem“) Wasserstoff im Straßenverkehr wird sich die vorliegende Arbeit im weiteren Verlauf beschäftigen.

1.2 Einordnung

Betrachtet man den Gesamtenergieverbrauch auf europäischer Ebene (EU28) für 2017 lässt sich feststellen, dass der Verkehrssektor etwa ein Drittel der Endenergie verbraucht. Der Großteil der im Verkehrssektor verbrauchten Energie stammt dabei aus erdölbasierten Energieträgern (siehe Abbildung 3).

¹⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 3.

¹⁹ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 2 und S. 11.

²⁰ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 2.

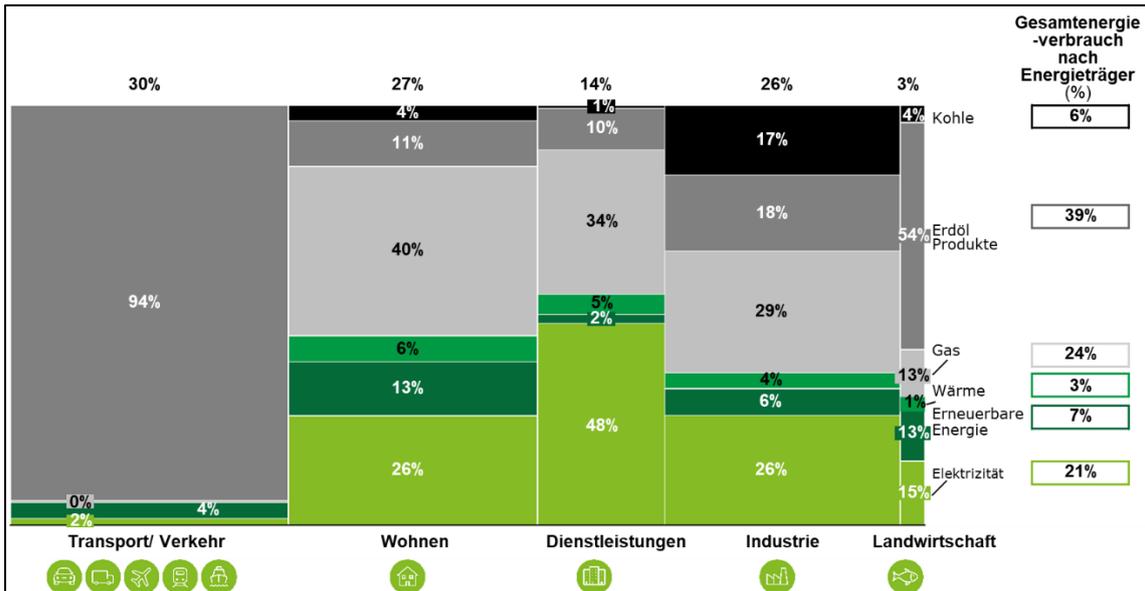


Abbildung 3: Relativer Gesamtenergieverbrauch nach Energieträger in der EU in Prozent.²¹

Der Blick auf Deutschland bietet ein ähnliches Bild: Der Großteil des Energieverbrauchs im Jahr 2018, etwa 630 Terawattstunden („TWh“), fällt im Straßenverkehr an. Darüber hinaus ist der Verkehrssektor in besonderem Maße abhängig von der Verbrennung von Mineralölen, wodurch in großem Maßstab Emissionen von Treibhausgasen entstehen. Die aktuellen Zahlen aus dem Jahr 2018 liegen bei knapp 163 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente („CO₂-Äq.“), davon fallen rund 96% im Straßenverkehr an.

Der Mobilitäts- und Verkehrssektor steht nun in den nächsten Jahrzehnten vor der Herausforderung, den Energieverbrauch insgesamt zu senken und die treibhausgasintensive Nutzung von Mineralölen durch alternative, regenerative und treibhausgasneutrale Energieträger zu substituieren. Hierzu gibt es eine Reihe von Ansätzen: von der Digitalisierung des Mobilitätssystems und Sharing-Konzepten über die Verlagerung der Verkehrsleistung auf andere Verkehrsträger wie etwa den Schienenverkehr bis hin zur Elektrifizierung und Nutzung alternativer Kraftstoffe und Energieträger.

Als aussichtsreicher Energieträger im Verkehrssektor gelten Wasserstoff und flüssige Kraftstoffe, die durch weitere Syntheseschritte aus diesem hergestellt

²¹ Eigene Darstellung. Vgl. IEA, 2019.

werden. Besonders interessant ist dabei grüner Wasserstoff, da dieser zur Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende beiträgt und klimaneutral ist.

In der umfassenden Studie „dena Leitstudie Integrierte Energiewende“ der Deutsche Energie-Agentur GmbH („dena“) unter breiter Beteiligung unterschiedlicher Stakeholder wird das gesamte deutsche Energiesystem, d.h. alle Sektoren, vor allem im Hinblick auf Treibhausgasminde rung, Energiemengen und Kosten untersucht.

Dabei wird ein Referenzszenario und vier Zielszenarien untersucht, welche jeweils darauf ausgerichtet sind, das Ziel der Klimaneutralität 2050 zu erreichen. In allen zielerreichenden Szenarien wird sowohl für 2030 als auch für 2050 ein großer Bedarf an Wasserstoff für den Verkehrssektor prognostiziert, wobei das Maximum bei 120 TWh pro Jahr („TWh/a“) in 2050 liegt (siehe Abbildung 4).²²

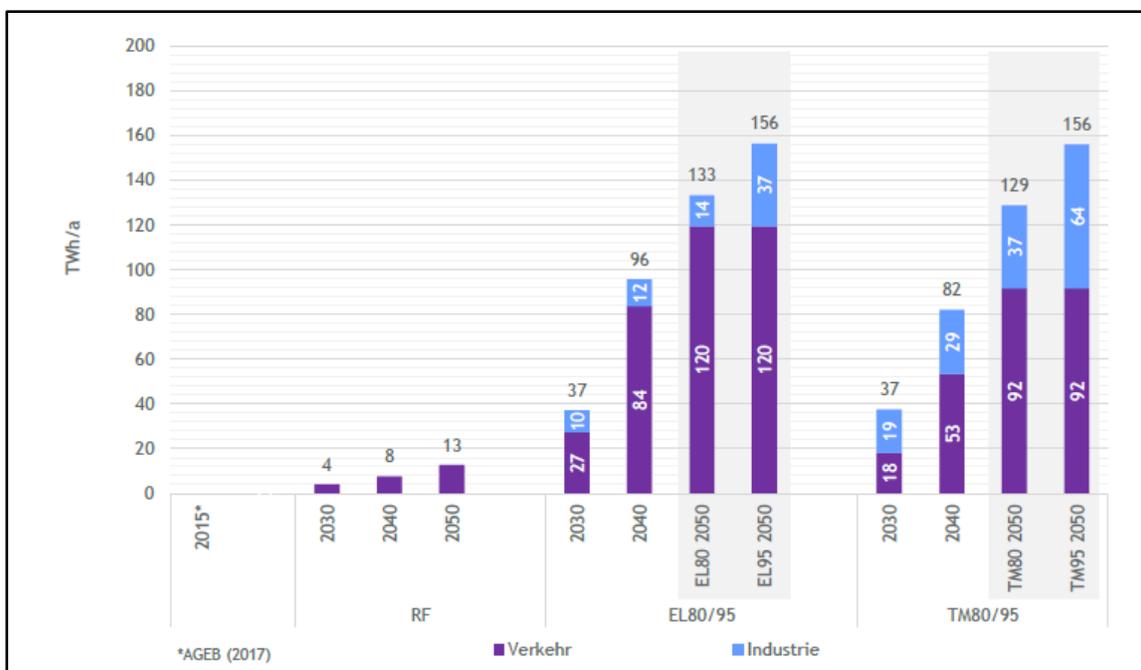


Abbildung 4: Entwicklung der energetischen Wasserstoffnachfrage aus Industrie und Verkehr in TWh/a.²³

²² Bründlinger und et. al, 2018b, 229 ff.

²³ Bründlinger und et. al, 2018b, S. 230.

Die obenstehende Abbildung 4 stellt dabei die Entwicklung der Nachfrage nach Wasserstoff aus den Sektoren Verkehr und Industrie über den Zeitraum 2030 bis 2050 dar.

Dieser steigt besonders in den zielerreichenden Szenarien Elektrifizierung 80 („EL80“) und Elektrifizierung 95 Innovation („EL95“) sowie in den Szenarien Technologiemix 80 („TM80“) und Technologiemix 95 („TM95“) im Zeitverlauf an, wobei der Verkehrssektor den wesentlichen Anteil der Nachfrage nach Wasserstoff verzeichnet.

Im Szenario EL80 stellt dieser im Jahr 2050 fast 90% der gesamten Wasserstoffnachfrage, wobei in den Szenarien EL80/95 angenommen wird, dass die Brennstoffzellen-Technologie insbesondere bei LKW intensiv angewendet wird.

Die Technologiemixszenarien TM80/95 hingegen weisen für den Vergleichszeitraum eine geringere Nachfrage nach Wasserstoff auf, was sich auf die anhaltende Nutzung von Benzin bzw. Dieselantriebstechnologien zurückführen lässt.

Betrachtet man die Nachfrage nach Wasserstoff durch die Industrie, liegt diese im Vergleichszeitraum in den Technologiemixszenarien TM80/95 höher als in den Szenarien Elektrifizierung EL80/ 95. Dies beruht auf der höheren Nachfrage nach Wasserstoff als Substitut für Kohle und Gas zur Stromerzeugung, wodurch die geringere Nachfrage des Verkehrssektors ausgeglichen wird.

Eine detaillierte Beschreibung der Szenarien sowie die methodische und inhaltliche Auseinandersetzung mit den erwähnten Szenarien findet im Rahmen der Fallstudienbetrachtung (*Kapitel 6*) statt.

Bisher hat Wasserstoff (sowohl aus konventioneller als auch aus regenerativer Herstellung) keine Bedeutung für die Energieversorgung in Deutschland. Unter Anwendung des Elektrolyseverfahrens werden in Deutschland aktuell etwa drei Terrawattstunden pro Jahr Wasserstoff hergestellt. Im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung vom Juni 2020 hat die Bundesregierung sich zum Ziel gesetzt, im Jahr 2030 Kapazitäten zur jährlichen Herstellung von bis zu 14TWh grünen Wasserstoffs einzurichten, d.h. eine Verfünffachung

der aktuellen Produktion bis 2030.²⁴ Der Bedarf an Wasserstoff, der für stoffliche Anwendungen anderer Industrien herangezogen wird, liegt schon heute bei etwa 55 TWh/a und wird überwiegend auf Basis fossiler Energieträger hergestellt.

Das konkrete Problem ist demnach, dass eine treibhausgasneutrale Zukunft des deutschen Straßenverkehrs in vielen Szenarien auch auf den intensiven Einsatz von Wasserstoff als Energieträger gebaut ist. Derzeit existieren aber kaum Kapazitäten zur Herstellung von treibhausgasneutralem grünem Wasserstoff.

Darauf aufbauend stellt sich die Frage, inwiefern grüner Wasserstoff für den deutschen Straßenverkehr ein Energieträger der Zukunft sein kann und welche Schritte und Investitionen notwendig sein werden, um dieses Ziel zu erreichen.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, steht der deutsche Verkehrssektor vor einem tiefgreifenden Wandel. Die Schaffung eines Mobilitäts- und Transportsystems das gleichzeitig weitgehend treibhausgasneutral sowie ökonomisch tragfähig und sozial ausgeglichen ist, stellt die gesamte Gesellschaft vor große Herausforderungen.²⁵ Doch gerade vom Verkehrssektor wird in den kommenden Jahren erwartet, bedeutende Veränderungen auf den Weg zu bringen, um große Mengen an Treibhausgasemissionen einzusparen. Während die anderen Sektoren schon heute bedeutende Reduktionen ihrer Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 1990 vorzeigen können, liegt der Verkehrssektor im Jahr 2018 annähernd auf dem Niveau des Basisjahres (siehe Abbildung 5). Vor diesem Hintergrund steht der Verkehrssektor in besonderem Maße in der Pflicht, zukünftig eine signifikante Senkung der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

²⁴ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a.

²⁵ Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2019.

Minderung von Treibhausgasemissionen gegenüber 1990					
	Status quo (2018)	Ziele			
		2020	2030	2040	2050
Gesamt-emissionen	-30,6 %	Mind. -40 %	Mind. -55 %	Mindestens -70 %	Weitgehend treibhausgas-neutral
Energiewirtschaft	-33,4 %		-62 bis -61 %		
Gebäude	-44,0 %		-67 bis -66 %		
Verkehr	-0,9 %		-42 bis -40 %		
Industrie	-30,7 %		-51 bis -49 %		
Landwirtschaft	-18,8 %		-34 bis -31 %		
Sonstige	-75 %		-87%		

Abbildung 5: Relative Minderung von Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 nach Handlungsfeldern in Prozent.²⁶

Die Senkung der durch den Verkehrssektor verursachten Emissionen bedarf eines mehrschichtigen Ansatzes. Dieser umfasst unter anderem die Nutzung von neuen, intelligenten Verkehrskonzepten (Sharing Angebote, usw.) insbesondere aber auch die Anwendung und Weiterentwicklung von alternativen Kraftstoffen und Antriebskonzepten wie der E-Mobilität sowie der Wasserstofftechnologie.

Im Hinblick auf die Emissionsziele steht hierbei die Reduktion des Energieverbrauchs sowie die Förderung von nachhaltigen, regenerativen Energieträgern im Fokus.

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern grüner Wasserstoff, also Wasserstoff, welcher durch Elektrolyse aus erneuerbarem Strom erzeugt wurde, dazu beitragen kann, die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland bis 2050 zu senken.

²⁶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019, S. 24.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es zu untersuchen, inwiefern grüner Wasserstoff dazu beitragen kann, die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland zu senken um diesen bis zum Jahr 2050 zu dekarbonisieren.

Anhand der **Forschungsfragen** soll das inhaltliche Profil der Arbeit geschärft und die Stoßrichtung der nachfolgenden Kapitel bestimmt werden. Die Forschungsfragen wurden bereits in der Konzeptionsphase erstellt und dienen als Ausgangsbasis und inhaltliche Leitlinie für die Ausarbeitung der Fallstudie.

Die zentrale Forschungsfrage lautet daher:

In welcher Form kann grüner Wasserstoff, der im Elektrolyseverfahren aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, zur Dekarbonisierung des deutschen Straßenverkehrs beitragen?

Um die zentrale Forschungsfrage zu bearbeiten, ist es notwendig untergeordnete Forschungsfragen (**Unterforschungsfragen**) zu definieren:

1. Inwiefern könnte grüner Wasserstoff innerhalb des Straßenverkehrs sinnvoll genutzt werden und welche Technologien wären dafür notwendig?
2. In welchem Umfang müsste grüner Wasserstoff in Deutschland zur Verfügung stehen um diese Anwendungen/ Technologien zu bedienen?
3. Wie könnte die Herstellung von grünem Wasserstoff im industriellen Maßstab aussehen?
4. Welche Entwicklungen im Rahmen der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland müssten vorangetrieben werden?
5. Inwiefern könnte der Import von grünem Wasserstoff nötig werden?
6. Welche Infrastrukturen in Bezug auf den Transport von Wasserstoff wären notwendig?
7. Welches Treibhausgasreduzierungspotential ergibt sich aus der Nutzung des grünen Wasserstoffs im Straßenverkehr und wie kann es ermittelt werden?

Um die Forschungsfragen zu bearbeiten, wird eine Fallstudie konstruiert. Im Rahmen der Fallstudie werden bestimmte Annahmen getroffen auf Basis derer die Anforderungen an einen Straßenverkehr mit dem Energieträger grüner Wasserstoff abgeleitet werden.

1.4 Abgrenzung und Positionierung

Generelles Ziel einer wissenschaftlichen Arbeit ist es, anhand von geeigneten Forschungsmethoden neue Erkenntnisse innerhalb der untersuchten Thematik zu generieren.²⁷

Die Einbeziehung grundsätzlicher theoretischer Perspektiven sowie von Beiträgen benachbarter Forschungsgebiete leisten einen wichtigen Beitrag zur Beantwortung der vorliegenden Forschungsfragen.

Nachfolgend wird der generelle Aufbau und die Vorgehensweise sowie im Anschluss die Methodik vorgestellt, die bei der Anfertigung dieser Masterthesis Anwendung fanden.

1.5 Aufbau und Vorgehensweise

Ausgangspunkt der Arbeit war die Beschäftigung mit Möglichkeiten der Einsparungen von Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr im Rahmen des Studiums im Fach Automotive & Mobility Management an der Technischen Hochschule Ingolstadt. Aufbauend auf dieser ersten inhaltlichen Vertiefung wurden anschließend im Rahmen eines Desk Research diverse deutsch- und englischsprachige Quellen recherchiert und aktuelle Veröffentlichungen von Forschungsinstituten, Dienstleistern, politischer Institutionen und Verbänden gesichtet.

Darauf aufbauend erfolgte die Festlegung der Bearbeitungsschwerpunkte und die Entwicklung eines Forschungskonzepts. Dieses hilft bei der Strukturierung der weiteren Vorgehensweise und veranschaulicht die im weiteren Forschungsprozess eingesetzten Methoden. Die angewandten Methoden leiten sich aus den Fragen ab, die im Rahmen der Master-Arbeit beantwortet werden sollen. Folgende Abbildung 6 veranschaulicht diesen Prozess.

²⁷ Chmielewicz, 1994, S. 37.

Phase	Phasengliederung der Untersuchung
Phase I	Definitionsphase
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition Problemstellung ▪ Literatur- und Onlinerecherche ▪ Grobstrukturierung der Herangehensweise und Zieldefinition
Phase II	Designphase
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufstellen von Forschungsfragen ▪ Recherche nach potentiellen Ansprechpartnern und Prüfung der Forschungsfragen auf Relevanz ▪ Inhaltliche Grobgliederung der Arbeit
Phase III	Ausarbeitungsphase
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feingliederung der Arbeit und Skizzierung der wesentlichen Inhaltspunkte ▪ Ausarbeitung der Kapitel ▪ Konzeption der Fallstudie und Definition der Szenarien ▪ Ausarbeitung der Fallstudie
Phase IV	Auswertung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse ▪ Interpretation der Ergebnisse und Einarbeitung in die Thesis

Abbildung 6: Phasengliederung der Untersuchung.²⁸

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich wie folgt:

Kapitel 1 beschreibt den Bezug der bearbeiteten Thematik zu den aktuellen Herausforderungen der Dekarbonisierung des deutschen Straßenverkehrs und erläutert die im Rahmen dieser Arbeit angewandte methodische Vorgehensweise.

Kapitel 2 stellt die konzeptionellen Grundlagen in Bezug auf die allgemeinen Eigenschaften sowie die traditionellen Herstellungsverfahren von Wasserstoff dar und skizziert die Bedeutung von grünem Wasserstoff im Zusammenhang mit der Energiewende.

Kapitel 3 erläutert wesentliche Grundlagen des Straßenverkehrs in Deutschland, um dadurch ein einheitliches Verständnis über die Bestandteile des Verkehrssystems (Kraftfahrzeugbestand, Endenergieverbrauch, usw.) zu schaffen.

²⁸ Eigene Darstellung.

Kapitel 4 gibt einen Überblick für die Anwendung von Wasserstoff im Straßenverkehr, die dafür zur Verfügung stehenden Technologien sowie den aktuellen Status bei der Umsetzung und künftige Entwicklungsperspektiven.

Die Möglichkeiten der industriellen Herstellung von grünem Wasserstoff unter Betrachtung der hierfür in Frage kommenden Technologien werden in **Kapitel 5** beschrieben. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls auf Limitierungen bei der aktuellen Herstellung eingegangen („Status Quo“).

In **Kapitel 6** wird im Rahmen einer Fallstudie untersucht, in welcher Form grüner Wasserstoff, der im Elektrolyseverfahren aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, zur Dekarbonisierung des deutschen Straßenverkehrs beitragen kann.

Abschließend fasst **Kapitel 7** die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung zusammen und leitet daraus entsprechende Schlussfolgerungen ab.

1.6 Methodik

Für die Untersuchung der zentralen Forschungsfrage sind generell drei unterschiedliche Bearbeitungsansätze möglich, die nachfolgend kurz skizziert und kritisch betrachtet werden sollen.

Ansatz 1: Auswertung von historischen Daten

Dieser Bearbeitungsansatz setzt eine breite Datenbasis voraus, die als repräsentative Grundlage für die Ableitung von Forschungsergebnissen und Erkenntnisgewinnen herangezogen werden könnte. Da die Anzahl von mit Wasserstoff betriebenen Verkehrsmitteln (Pkw, Busse, usw.) in Deutschland aktuell noch sehr gering ist, liegt dementsprechend noch keine ausreichende Datenbasis vor.

Ansatz 2: Datenerhebung und Analyse im Rahmen einer Feldstudie

Als zweite Möglichkeit für die Bearbeitung wäre die Datenerhebung und Analyse im Rahmen einer eigens dafür konzipierten und durchgeführten Feldstudie möglich. Feldstudie meint dabei die Beobachtung und Untersuchung von tatsächlich auftretenden Situationen. Da bei dieser Methode ein relativ langer Forschungszeitraum notwendig ist, kann dieser Bearbeitungsansatz ebenfalls nicht weiterverfolgt werden.

Ansatz 3: Durchführung einer Fallstudie

Die dritte Möglichkeit zur Untersuchung der zentralen Fragestellung besteht in der Durchführung einer Fallstudie. Die Fallstudienmethode gilt nach allgemeiner Auffassung besonders in Untersuchungssituationen als geeignet, die die folgenden Merkmale aufweisen:

- „Geringer theoretischer Erkenntnisstand im Themengebiet.“
- „Bedarf nach Exploration der Problemstellung.“
- „Starke Beeinflussung des Erkenntnisobjekts durch menschliches Verhalten.“²⁹

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser methodische Ansatz aufgrund seiner primär qualitativen Ausprägung sowie der negativen Verfügbarkeit von historischen Daten als besonders geeignet eingestuft und daher für die weitere Untersuchung angewandt.

Eine der gängigsten Definitionen der Fallstudie, die sich in der wissenschaftlichen Literatur findet, ist die von Yin. Yin definiert Fallstudien als empirische Untersuchungen, die zeitgenössische Phänomene innerhalb ihres realen Kontexts untersuchen. Mit anderen Worten stellt die Fallstudie demnach eine geeignete Methode dar, ein für die Untersuchung sowie das Forschungsziel passendes Design zu entwickeln. Der idealtypische Forschungsprozess einer Fallstudie gliedert sich in 5 Phasen (siehe Abbildung 7).³⁰

²⁹ Baumgarth, Eisend und Evanschitzky, 2009, S. 83.

³⁰ Vgl. Yin, 2003, S. 1 ff.; Yin, 2014, S. 1 ff.

Phase	Beschreibung der Phasen
Phase 1	Entwurf des Forschungsdesigns
Phase 2	Vorbereitung der Datensammlung
Phase 3	Durchführung der Datensammlung
Phase 4	Datenanalyse
Phase 5	Fallstudienreport

Abbildung 7: Idealtypischer Forschungsprozess einer Fallstudie.³¹

³¹ Baumgarth, Eisend und Evanschitzky, 2009, S. 86.

2 Grundlagen zu Wasserstoff

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften von Wasserstoff beschrieben. Darüber hinaus werden die gängigen Herstellungsverfahren erläutert. Schließlich wird der Terminus „grüner Wasserstoff“ beschrieben.

2.1 Eigenschaften

Wasserstoff ist das im Universum am häufigsten vorkommende Element. Er wurde im Jahr 1766 von dem Engländer Henry Cavendish entdeckt. Es ist das leichteste und am einfachsten gebaute Element. Die wissenschaftliche Beschäftigung mit Wasserstoff und seinen Verbindungen hat dementsprechend wesentlich zur Entwicklung des heutigen Verständnisses von Atomen und Molekülen beigetragen. Die Urknalltheorie geht davon aus, dass das Universum, neben kleinen Mengen von Helium, ausschließlich aus Wasserstoff gebildet wurde, was in der Folge bedeutet, dass alle Elemente aus Wasserstoff beziehungsweise dessen Bestandteilen zusammengesetzt sind.³² Der unter Normalbedingungen auf der Erde vorkommende Wasserstoff ist nicht atomarer Wasserstoff („H“), sondern diatomarer, molekularer Wasserstoff („H₂“). Bei Raumtemperatur ist Wasserstoff gasförmig, sein Siedepunkt liegt bei etwa -253°C. Es ist ein farb- und geruchloses Gas und nicht giftig, wassergefährdend, fruchtschädigend oder krebserzeugend. Wasserstoff ist nicht selbst entzündlich und nicht brandfördernd. Im Freien ist Wasserstoff nicht detonativ, da Wasserstoff einen hohen Diffusionskoeffizienten hat und sich schnell in der Umgebungsluft verteilt. Wasserstoff ist leichter als Luft und entweicht nach oben.³³

Kennzeichnend für Wasserstoff ist sein hoher Heizwert. Als Heizwert (früher: unterer Heizwert) eines Brennstoffs bezeichnet man die Wärmemenge, die bei vollständiger und vollkommener Verbrennung einer Einheit (Kilomol („kmol“), Kilogramm („kg“) oder Normkubikmeter („Nm³“)) des Brennstoffs unter konstantem Druck nutzbar wird.³⁴ Der Heizwert eines Brennstoffes gibt seine Energiedichte an. Die Energiedichte beschreibt die Verteilung der Energie E auf eine bestimmte

³² Vgl. Holleman, Wiberg und Wiberg, 1985, S. 252.

³³ Vgl. Linde Gas GmbH, 2013.

³⁴ Vgl. Beitz und Küttner, 1981, S. 250.; Brückner, 1952.

Größe X . Nach DIN 5485 ist die Energiedichte eine volumenbezogene Angabe, sprich die Energie E pro Volumen V in der Einheit Joule pro Kubikmeter („J/m³“).³⁵ In der Praxis wird auch häufig die sogenannte gravimetrische Energiedichte betrachtet, die die Energie E pro Masse M in der Einheit Joule pro Kilogramm („J/kg“) angibt.³⁶ Der Heizwert und damit auch die gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff liegt bei 33,33 kWh/kg. Gewöhnliches Motorenbenzin hingegen hat im Vergleich einen deutlich geringeren Heizwert von 11,1 – 11,6 kWh/kg.³⁷ Wasserstoff hat eine sehr geringe Dichte von 0,09 kg/m³ im gasförmigen Zustand sowie eine Dichte von 70,79 kg/m³ im flüssigen Zustand (bei unter -253°C).³⁸ Motorenbenzin hat eine deutlich höhere Dichte von etwa 720 - 775 kg/m³.³⁹

Wasserstoff hat damit gegenüber allen anderen Brennstoffen den höchsten Energieinhalt. Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Wasserstoff wird etwa die dreifache Menge an Energie frei, wie bei der Verbrennung eines Kilogramms Benzin.

Da reiner Wasserstoff auf der Erde nicht in technisch nutzbaren Mengen vorkommt, muss er unter Einsatz von Energie aus seinen Verbindungen gewonnen werden.⁴⁰ Die große Menge chemischer Energie, die im Wasserstoff gespeichert ist, muss wiederum bei seiner Herstellung auch aufgebracht werden. Da technische Prozesse nie ideal ablaufen und jede Energieumwandlung mit irreversiblen Verlusten verbunden ist, ist der Energieaufwand zur Bereitstellung von Wasserstoff immer höher als die im Energieträger gespeicherte und damit nutzbare Energie.⁴¹

Als Ausgangsstoff für Herstellung von Wasserstoff eignet sich praktisch jede seiner Verbindungen. Zweckmäßig sind dabei vor allem Wasser („H₂O“), das in praktisch unbegrenzten Mengen zur Verfügung steht oder Kohlenwasserstoffe

³⁵ Vgl. DIN 5485:1986-08, S. 6..

³⁶ Vgl. chemie.de, 2020; Paschotta, 2020.

³⁷ Vgl. DIN EN 228:2017.

³⁸ Vgl. Linde Gas GmbH, 2013.

³⁹ Vgl. Reif, 2014, S. 9.; DIN EN 228:2017, S. 9..

⁴⁰ Vgl. Quaschnig, 2013, S. 363.

⁴¹ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 50.

(„C_nH_m“) wie Methan („CH₄“), Kohle, Erdöl oder Erdgas, die auch noch in großen Mengen zur Verfügung stehen.⁴²

2.2 Herstellungsverfahren

Die globale Wasserstoffherstellung liegt aktuell bei etwa 70 Millionen Tonnen („Mt“) pro Jahr. Weltweit betrachtet ist dabei Erdgas der Hauptausgangsstoff und Basis für 76% der globalen Wasserstoffherstellung, wobei die Dampfreformierung das dominierende Verfahren ist. Aufgrund der elementaren Rolle von Kohle in China ist Kohle der zweit wichtigste Ausgangsstoff für die Wasserstoffproduktion. Sie ist die Basis für etwa 23% der globalen Wasserstoffherstellung. Die restlichen 2% der globalen Wasserstoffproduktion geht auf die Herstellung aus Öl und Strom zurück.⁴³

Die Verfahren zur Wasserstoffherstellung lassen sich anhand der jeweiligen Wasserstoffverbindungen, die als Ausgangsstoff in den Prozess einfließen, gliedern in Verfahren auf Basis fossiler Kohlenwasserstoffe, Verfahren auf Basis von Biomasse und Verfahren auf Basis von Wasser. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren kurz erläutert.⁴⁴

2.2.1 Herstellungsverfahren auf Basis fossiler Energieträger

Aktuell basiert im globalen Maßstab nahezu die gesamte Wasserstoffproduktion auf fossilen Kohlenwasserstoffen in Form von Erdgas und Kohle. Eine Herstellung von Wasserstoff ist auch auf Basis von Erdöl möglich.⁴⁵ Die gängigsten Verfahren werden im Folgenden dargestellt.

Die **Dampfreformierung (kurz: „SMR“, englisch: Steam Methane Reforming)** ist global gesehen momentan das bedeutendste Verfahren zur Wasserstoffherzeugung. Unter Reformierung versteht man die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen und Alkoholen in Wasserstoff, wobei als Nebenprodukt Wasserdampf,

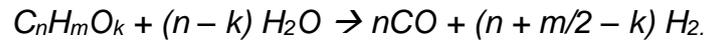
⁴² Vgl. Holleman, Wiberg und Wiberg, 1985, S. 253.

⁴³ Vgl. International Energy Agency, 2019, S. 38.

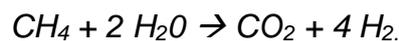
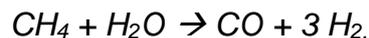
⁴⁴ Vgl. Holladay et al., 2009; Kothari, Buddhi und Sawhney, 2008; International Energy Agency, 2019, S. 39.

⁴⁵ Vgl. Adolf et al., 2007, S. 12.

Kohlenmonoxid („CO“) und Kohlendioxid („CO₂“) anfallen. Bei der Dampfreformierung werden leichte Kohlenwasserstoffe mit Wasserdampf zu einem Synthesegas umgesetzt. Die Nettoreaktionsgleichung lautet allgemein:



Als fossiler Ausgangsstoff wird meist Erdgas herangezogen, da Erdgas zum Großteil aus Methan („CH₄“) zusammengesetzt ist und Methan das höchste Wasserstoff-/Kohlenstoffverhältnis der fossilen Kohlenwasserstoffe aufweist. Prinzipiell könnten auch andere leichte Kohlenwasserstoffe wie Flüssiggas oder Naphtha (Rohbenzin) genutzt werden. Im ersten Prozessschritt wird das Erdgas entschwefelt, da der Schwefel später den Katalysator angreifen würde. Dem entschwefelten Erdgas wird anschließend überhitzter Wasserdampf im erforderlichen Dampf/Kohlenstoff-Verhältnis zugemischt. Dieses aufgeheizte Gasgemisch aus Erdgas und Wasserdampf strömt nun von oben nach unten durch sogenannte Reformerrohre. In den Reformerrohren finden die zentralen Reaktionen des Verfahrens statt:



Reformerrohre sind Stahlrohre, die mit einem Nickel-Katalysator gefüllt sind. Da es sich bei der Reaktion von Methan und Wasserdampf zu dem Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid um eine endotherme katalytische Umsetzung handelt, müssen die Reformerrohre von außen beheizt werden (auf circa 800°C), um der Reaktion die notwendige thermische Energie zuzuführen. Da bei der Reaktion sowohl die Kohlenstoff- als auch die H₂-Moleküle eine Verbindung mit Sauerstoff eingehen können, wird in den Reformerrohren ein Katalysator eingesetzt, der dazu beiträgt, dass weniger Wasserstoff zu Wasser oxidiert und damit die H₂-Ausbeute verbessert wird. Das Synthesegas, das zum Großteil aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid besteht, enthält zudem auch Anteile von Kohlendioxid, Wasserdampf und Rest-Kohlenwasserstoffe. Die folgende Abbildung 8 veranschaulicht diesen Prozess.

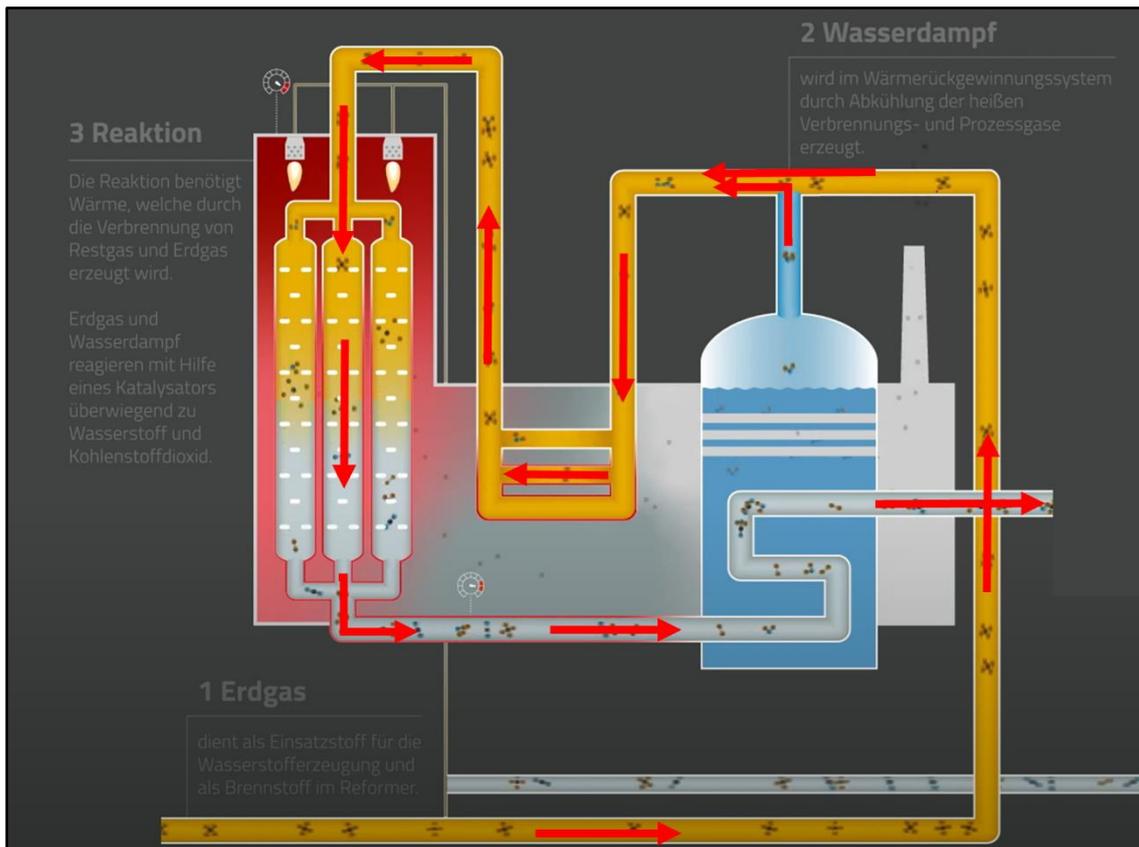


Abbildung 8: Prozess der Dampfreformierung (Ausschnitt).⁴⁶

In einer weiteren Reaktion, der sogenannten **Wassergas- oder Shiftreaktion**, lässt man das entstandene Kohlenmonoxid an einem Katalysator mit noch vorhandenem Wasserdampf reagieren zu Kohlendioxid und Wasserstoff:



Anschließend erfolgt eine Reinigung des Synthesegases durch **Druckwechseladsorption (kurz: „DWA“)**.

Es verbleibt der Wasserstoff und ein Restgas, das zu circa 60% aus brennbaren Anteilen besteht und zur Befeuerung des Reformers genutzt werden kann. Große Dampfreformierungsanlagen produzieren pro Stunde bis zu 100.000 Nm³, kleinere Anlagen liegen im Bereich von 150 Nm³/h. Die Wirkungsgrade der Anlagen liegen im Bereich von 75 – 80%. Für einen Nm³ Wasserstoff werden etwa 0,45

⁴⁶ Mahler AGS GmbH, 2019.

Nm³ Methan benötigt.⁴⁷ Dampfreformierungsanlagen können eine Wasserstoffreinheit von bis zu 99,9999 vol.-% erreichen.⁴⁸ Die folgende Abbildung 9 zeigt eine Anlage zur Dampfreformierung der Firma Linde AG in Leuna (Deutschland) zur Erzeugung von 35000 Nm³/h mit einer Reinheit von 99,99 vol.-%.⁴⁹



Abbildung 9: Anlage zur Dampfreformierung der Linde AG.⁵⁰

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung auf Basis fossiler Energieträger ist die partielle Oxidation. Bei der **partiellen Oxidation (kurz: „POX“)** werden schwere, langkettige Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise schweres Heizöl oder Kohle mit Sauerstoff in einer exothermen Reaktion umgewandelt. Dabei gilt allgemein folgende Nettoreaktionsgleichung:



⁴⁷ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 91 ff.; Getoff, 1977, S. 90 ff.; Maus, 2019, S. 308 ff.; Neumann, 2007.

⁴⁸ Vgl. Mahler AGS GmbH, 2020.

⁴⁹ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 94.

⁵⁰ Göbelbecker, 2019.

Unter hohen Temperaturen von bis zu 1400°C und hohem Druck von bis zu 100 bar werden die Kohlenwasserstoffe und Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. Da bei der Reaktion Wärme frei wird, ist außer zur partiellen Verbrennung des Rohstoffs keine externe Wärmequelle notwendig. Für Hexadecan, ein langkettiges in Gasöl vorkommendes Alkan, sieht die Reaktionsgleichung wie folgt aus:



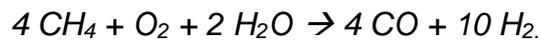
Wie bei der Dampfreformierung wird bei der Reaktion ein Synthesegas erzeugt. Das im Synthesegas enthaltene giftige Kohlenmonoxid muss nachfolgend unter Zugabe von Wasser und Sauerstoff zu Wasserstoff und Kohlendioxid ausreagiert werden. Dies kann wieder analog zur Dampfreformierung in einer Shiftreaktion erfolgen auf die eine Gasaufreinigung folgt.

Der wesentliche Unterschied zwischen partieller Oxidation und Dampfreformierung liegt im Oxidationsmittel. Im Gegensatz zum Wasserdampf bei der Dampfreformierung muss der Sauerstoff für die partielle Oxidation erst aufwendig in einer Luftzerlegungsanlage hergestellt werden, was den Energieverbrauch der partiellen Oxidation erhöht. Dies kann zum Teil durch die Auskopplung von Wärme aus der exothermen Reaktion aufgefangen werden. Trotzdem ist die partielle Oxidation weniger effizient, Wirkungsgrade von bis zu 70% sind möglich, als die Dampfreformierung, dafür aber wesentlich flexibler in der Auswahl der Rohstoffe, da sie nicht auf Methan angewiesen ist und auch Kohle genutzt werden kann.⁵¹

Die **autotherme Reformierung (kurz: „ATR“)** ist eine Kombination aus Dampfreformierung und partieller Oxidation, die es ermöglicht beliebige Kohlenwasserstoffe (etwa Erdgas, Benzin oder Diesel) einzusetzen. Bei der autothermen Reformierung werden beide Prozesse so verbunden, dass die Vorteile beider Verfahren zum Tragen kommen. Die höhere Wasserstoffausbeute der Dampfreformierung wird kombiniert mit der Abgabe von Wärmeenergie als interne Prozesswärme der partiellen Oxidation. Dabei müssen die Luft- und Wasserdampfzufuhr so abgestimmt werden, dass die freiwerdende Wärmeenergie der exothermen partiellen Oxidation den Energiebedarf der endothermen Dampfreformierung

⁵¹ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 94 f.; Adolf et al., 2007, S. 12 ff.; e-mobil GmbH, 2012, S. 21.

möglichst deckt. Die leicht endotherme Reformierung von Methan nach diesen Verfahren erfolgt nach folgender Reaktionsgleichung:



Der Vorteil der autothermen Reaktion ist die Unabhängigkeit der Reaktion von äußerer Wärmezufuhr. Dem stehen höhere Investitions- und Betriebskosten entgegen. Diese kommen zustande da, wie bei der partiellen Oxidation, eine Luftzerlegeanlage notwendig ist. Außerdem enthalten die Rauchgase mehr Stickoxide, was eine aufwändigere Nachreinigung der Rauchgase erfordert.⁵²

Die Vergasung von Rohstoffen ist eine traditionelle Methode zur Herstellung eines Brenngases und wird schon sehr lange praktiziert. Die **Kohlevergasung/ -Pyrolyse** zur Wasserstoffherstellung ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt und damit das älteste großtechnische Verfahren zur Wasserstoffherstellung. Man versteht unter thermochemischer Vergasung die Umsetzung eines Kohlenstoffträgers (z.B. Kohle) mit einem sauerstoffhaltigen Vergasungsmittel (reiner Sauerstoff, Luft oder Dampf) zu einem Synthesegas bei hohen Temperaturen. Der Vergasungsprozess ist sehr komplex und lässt sich grob in zwei Schritte gliedern. Im ersten Schritt wird die Kohle (Fett-, Braun-, oder Steinkohle) unter Luftabschluss in einem Ofen auf über 1000°C erhitzt. Der Kohlenstoff bleibt dabei unverbrannt erhalten („Koks“) und die flüchtigen Bestandteile der Kohle werden gasförmig aus dem Ofen abgeführt. Dieses abgeführte Gas kann nach einer Aufreinigung energetisch weiterverwendet werden. Die verbleibende Kohle, also die Reinkohle oder Koks, wird in einem zweiten Schritt mit Sauerstoff verbrannt und in einem bestimmten Mischungsverhältnis im heißen Zustand mit Wasserdampf gemischt. Dabei kommt es zu einer Gleichgewichtsreaktion, bei der Synthesegas, ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, entsteht:



⁵² Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 95.; Adolf et al., 2007, S. 13.

Das im Synthesegas enthaltene Kohlenmonoxid wird wie bei der Dampfreformierung bereits beschrieben in einer folgenden Shiftreaktion mit Wasser zu Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Die Aufbereitung und Reinigung erfolgt ebenfalls ähnlich wie bei der Dampfreformierung.

Die Verfahren Dampfreformierung, partielle Oxidation und die autotherme Reaktion und Kohlevergasung nutzen Kohlenwasserstoffe zur Herstellung von Wasserstoff. Die Kohlenwasserstoffe fließen in Form von fossilen Energieträgern wie Erdgas, Erdöl oder Kohle in den Herstellungsprozess ein. Generell benötigen alle vier genannten Verfahren fossile Energieträger als Rohstoffe und hohe Prozesstemperaturen im Rahmen des Verfahrens. Stammt die Energie zur Bereitstellung der Prozesstemperaturen dabei zusätzlich aus der Verbrennung fossiler Energieträger sind damit wiederum CO₂-Emissionen verbunden. Aus Aspekten des Klimaschutzes kann es sinnvoller sein, die fossilen Energieträger direkt zu verbrennen, anstatt daraus erst aufwendig Wasserstoff zu erzeugen.⁵³

2.2.2 Herstellungsverfahren auf Basis von Biomasse

Die Herstellung von Wasserstoff durch den Einsatz von Biomasse ist im globalen Maßstab bisher zu vernachlässigen. Unter der Voraussetzung, dass ausreichend nachhaltig erzeugte Biomasse zur Verfügung stehen würde, könnte dieser Herstellungspfad in Zukunft eine mögliche Option darstellen. Die Wasserstoffherzeugung aus Biomasse erfolgt in technischen Anlagen mittels thermochemischer Verfahren wie bei der Erzeugung aus fossilen Kohlenwasserstoffen. Daneben existieren bio-chemische Verfahren im Labormaßstab, die im Interesse der Forschung stehen und im Folgenden kurz beschrieben werden.⁵⁴

Die thermochemischen Verfahren zur Wasserstoffherstellung sind im Wesentlichen die Vergasung von Biomasse oder die Reformierung (SMR, POX) von Biogasen. Bei der **Biomasse-Vergasung oder -Pyrolyse** wird feste oder flüssige Biomasse zu einem Synthesegas umgewandelt, welches anschließend weiter aufbereitet wird. Die Methoden entsprechen im Grundsatz denen der Kohlever-

⁵³ Vgl. Quaschnig, 2013, S. 364.

⁵⁴ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 104 ff.; Adolf et al., 2007, S. 14.

gasung mit anschließender Shiftreaktion und Aufreinigung. Zur Vergasung eignen sich im Bereich der festen Biomasse vor allem holz- und halmartige Biomasse, also Waldholz, Plantagenholz, Restholz oder Stroh. Dabei ist Holz besser geeignet als halmartige Biomasse, da im Halmgut viele Störstoffe enthalten sind und diese im Vergasungsprozess zu starker Aschebildung neigen. In Bezug auf Holz ist vor allem unbehandeltes Holz geeignet, da im Restholz häufig metallische Rückstände wie Nägel oder Schrauben verbleiben, welche die Druckbehälter zerstören können. Deshalb wird die Holzvergasung gewöhnlich drucklos durchgeführt, was den Wirkungsgrad negativ beeinflusst. Neben der Vergasung der Biomasse zu Wasserstoff ist es auch möglich, biologische Sekundäre-Energieträger in Form von **Biomasse-Reformierung** zu Wasserstoff weiter zu verarbeiten. Dazu kommen vor allem Biogas bzw. Biomethan (aus Biogasanlagen) in Frage. Diese Gase können analog den oben beschriebenen Methoden für fossile Gase zur Wasserstoffherstellung herangezogen werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass jede Umwandlung mit Verlusten behaftet ist, was die Gesamtbilanz des Endprodukts beeinträchtigt. In der folgenden Abbildung 10 werden die oben beschriebenen Konversionspfade veranschaulicht.⁵⁵

⁵⁵ Vgl. Zech et al., 2013, S. 6 ff.

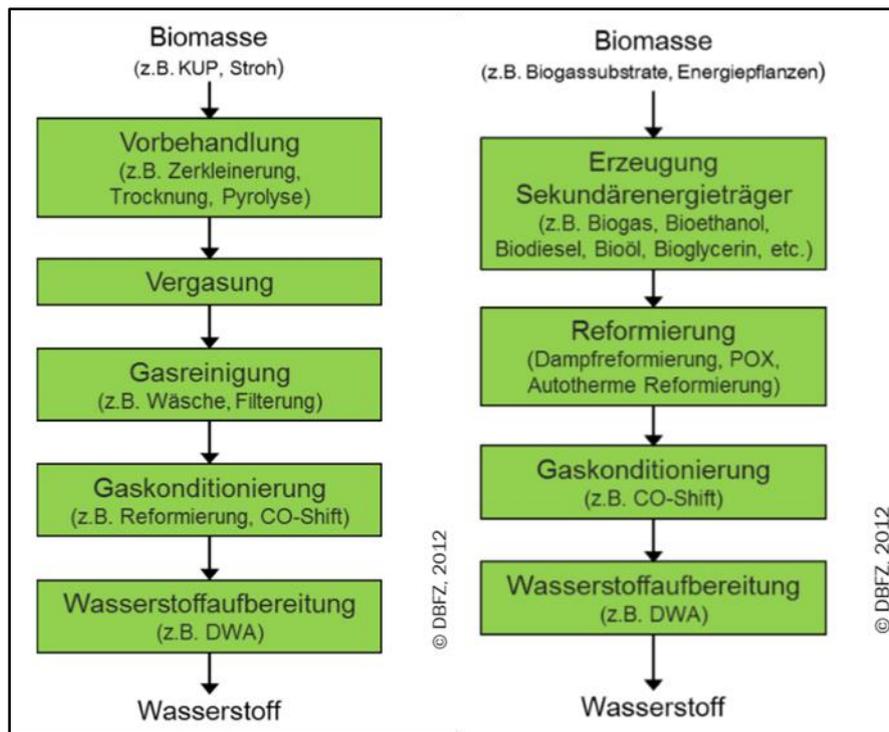


Abbildung 10: Konversionspfade thermochemischer Wasserstoffherstellung aus Biomasse.⁵⁶

Neben der thermochemischen Herstellung sind die biochemischen Verfahren Fermentation und der photochemischen Zersetzung von Biomasse Gegenstand aktueller Forschung.⁵⁷ Im Rahmen der **Fermentation** ist es möglich über mikrobielle Abbauprozesse aus Biomasse Wasserstoff zu erzeugen. Unter Fermentation versteht man in diesem Fall eine anaerobe Vergärung der Biomasse durch Zufügen bestimmter Bakterien in einem Dunkelreaktor. Diese Bakterien sind heterotroph, das bedeutet, dass ihnen die Biomasse als Nahrungsgrundlage für ihre Stoffwechselfvorgänge dient. Die Bakterien brauchen dafür kein weiteres Licht, weshalb man auch von dunkler Fermentation spricht. Als Biomasse für die Fermentation eignen sich vor allem stärkehaltige Substrate wie beispielsweise Mais oder Energiepflanzen sowie organische Abfälle. Nach einer Vorbehandlung ist es allerdings auch möglich, lingozellulosehaltige Substrate wie etwa Weizenstroh zu nutzen. Die Ausgangssubstrate werden anschließend enzymatisch in einzelne

⁵⁶ Zech et al., 2013, S. 8 ff.

⁵⁷ Vgl. Dos Santos, 2019.

Zuckermoleküle aufgespalten, welche schließlich fermentiert werden. Theoretisch ist es möglich, aus einem Mol Glukose ($C_6H_{12}O_2$) vier Mol Wasserstoff zu erhalten. Als Nebenprodukte entstehen bei der Reaktion Kohlendioxid und Essigsäure:



Die als Nebenprodukt entstehende Essigsäure lässt sich theoretisch separieren und in einem Photoreaktor durch das Verfahren der **photochemischen Zersetzung oder Photofermentation** weiter nutzen. Dabei zerlegen photosynthetische Mikroorganismen mit Hilfe von Lichtenergie und katalytischen Enzymen die organische Säure, wobei Wasserstoff und Kohlendioxid entstehen. Der dabei entstehende Wasserstoff würde die Gesamteffizienz des Verfahrens erhöhen. In der Literatur finden sich je nach eingesetzter Biomasse, Bakterien und den Bedingungen Produktionsraten von 0,1 bis 200mg Wasserstoff pro Liter Nährlösung und Stunde bei Wirkungsgraden von circa 25%. Trotz intensiver Forschung auf dem Feld der Fermentation existieren entsprechende wasserstoffproduzierende Anlagen nur im Labormaßstab mit Kapazitäten von bis zu 10 Litern.⁵⁸ In der folgenden Abbildung 11 werden die Umwandlungspfade der biochemischen Wasserstoffherzeugung dargestellt.

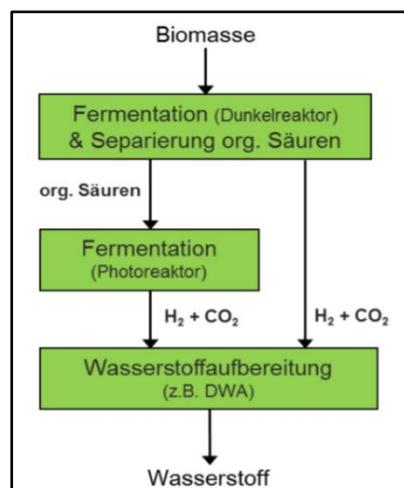


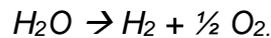
Abbildung 11: Konversionspfade biochemischer Wasserstoffherstellung aus Biomasse.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Zech et al., 2013, S. 15 ff.; Adolf et al., 2007, S. 14.; Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 107.

⁵⁹ Zech et al., 2013, S. 12.

2.2.3 Herstellungsverfahren auf Basis von Wasser

Alle Verfahren der Wasserstoffherstellung aus Wasser beruhen direkt, oder mit vorhergehenden Reaktionsschritten, auf der Grundgleichung der Wasserspaltung:



Um das Wasser zu spalten, muss Energie zugeführt werden. Die notwendige Energiemenge zur Durchführung der Reaktion, die Reaktionsenthalpie ΔH^0 , beträgt 289,5 kJ/Mol. Als Reaktionsenthalpie H^0 wird der Energieumsatz einer bei konstantem Druck ablaufenden Reaktion bezeichnet. Die Reaktionsenthalpie für die Reaktion der Wasserspaltung gibt vor, dass für die Herstellung von einem Gramm Wasserstoff eine Energie von mindestens 145 kJ eingebracht werden muss (ein H_2 -Molekül wiegt etwa zwei Gramm). Je nach Verfahren kann diese Energie als elektrische Energie, als Wärme oder als Energie von Photonen zugeführt werden.⁶⁰ Die Verfahren auf Basis der Wasserspaltung gelten, in Abhängigkeit der Herkunft der zugeführten Energie, gemeinhin als klimaverträgliche Alternativen zur Herstellung von Wasserstoff. Das elektrochemische Verfahren der Elektrolyse ist hierbei momentan am bedeutendsten. Daneben existieren thermochemische und biochemische Verfahren zur Wasserspaltung, welche sich aktuell noch im Entwicklungsstadium befinden.

Bei der **thermochemischen Wasserspaltung** wird Wasser auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt. Bei sehr hohen Temperaturen verschiebt sich das thermodynamische Gleichgewicht der Wasserspaltung immer mehr vom Wassermolekül hin zu den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff. Etwa ab einer Temperatur oberhalb von 1800 – 2000 Kelvin ist eine Wasserzerlegung allein durch thermische Dissoziation möglich. Die thermische Dissoziation bezeichnet die Spaltung von Molekülen in kleinere Moleküle oder Atome ausschließlich durch die Einwirkung von Wärme.⁶¹ Allerdings liegt der Partialdruck des Wasserstoffs bei diesen Temperaturen bei etwa 10 mbar, was für eine großtechnische Anwendung des

⁶⁰ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004; Behr et al., 2016.

⁶¹ Vgl. Spektrum, 1998b.

Verfahrens zu niedrig ist. Der Partialdruck ist der Druckanteil, den eine Komponente in einer gasförmigen Mischung zum Gesamtdruck beiträgt.⁶² Um den Wasserstoff aus dem Gasgemisch nach der thermischen Dissoziation vom Sauerstoff abzutrennen wäre ein höherer Partialdruck von etwa einem bar notwendig. Dieser wird erst bei Temperaturen zwischen 3000 – 4000 K erreicht. Bis heute sind jedoch keine technischen Wege zur selektiven Abtrennung des Wasserstoffs gefunden worden. Auch die Realisierung von technischen Anlagen, die in diesem Temperaturbereich bestehen ist aktuell nicht möglich, sodass momentan keine technische Realisierbarkeit des Verfahrens vorstellbar ist. Zur Senkung der notwendigen Reaktionstemperaturen wäre es grundsätzlich möglich, das Verfahren in mehrere Schritte, die sogenannten thermochemischen Kreisprozesse, aufzuteilen.⁶³ Dieses Vorgehen ist auch Gegenstand aktueller Forschungsbemühungen.⁶⁴

Ebenfalls im Entwicklungsstadium befindet sich das Verfahren der **Photolyse**. Als (Bio-)Photolyse bezeichnet man die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff unter Zuhilfenahme von Mikroorganismen und Lichtenergie. Als Organismen kommen Grünalgen oder bestimmte Bakterien infrage, wobei sich die Vorgänge der Wasserspaltung in Abhängigkeit vom eingesetzten Organismus unterscheiden. Der Vorteil der biophotolytischen Wasserstoffherstellung im Vergleich zu den biogenen Verfahren im vorigen Kapitel liegt darin, direkt Wasser aufzuspalten und nicht auf Biomasse als Ausgangsstoff angewiesen zu sein. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt allerdings in seinem geringen Entwicklungsstand und den sehr hohen Kosten. Um mit elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff auf Basis von Windstrom konkurrieren zu können, müsste sich die Ausbeute des Verfahrens ver Hundertfachen.⁶⁵

Ein Verfahren zur Wasserstoffherstellung welches heute schon eine hohe technische Reife erreicht hat ist die elektrolytische Herstellung. Bei der **Elektrolyse** wird Wasser in einem Elektrolyseur mit der Hilfe von Strom in seine Bestandteile

⁶² Vgl. Spektrum, 1998a.

⁶³ Vgl. Peschka, 1984, S. 10.; Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 51–52.

⁶⁴ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2017.

⁶⁵ Vgl. Zech et al., 2013, S. 17 ff.

(Wasserstoff und Sauerstoff) zerlegt. Ein Elektrolyseur besteht aus einer Gleichstromquelle, zwei Elektroden (Kathode und Anode) und einem Elektrolyt.⁶⁶ Die Elektrolyse existiert schon seit 1800 und ist das verfahrenstechnisch einfachste und in Bezug auf die eingesetzte elektrische Energie ein sehr effizientes Verfahren zur Wasserstofferzeugung.⁶⁷ Auch die großtechnische Herstellung mittels Elektrolyse wird schon sehr lange betrieben, dennoch macht Elektrolysewasserstoff nur etwa 2% der heutigen globalen Wasserstoffproduktion aus.⁶⁸ Zur Zeit existieren drei bekannte Wasserelektrolysetechnologien, die sich anhand des ionenleitenden Elektrolyten unterscheiden lassen.⁶⁹ Da es sich bei dem Wasserstoff aus elektrolytischer Herstellung mit erneuerbarem Strom um den sogenannten **grünen Wasserstoff**⁷⁰ handelt mit dem sich diese Arbeit befasst, werden diese Herstellungsverfahren in *Kapitel 5.1 Industrielle Herstellung von grünem Wasserstoff* detaillierter erläutert.

Auch der Wasserstoff auf Basis anderer zugrundeliegender Herstellverfahren wird in der öffentlichen Diskussion häufig anhand von Farbbezeichnungen untergliedert. Als **grauer Wasserstoff** wird Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger bezeichnet, bei dessen Herstellung in großem Maße CO₂ an die Atmosphäre abgegeben wird. **Blauer Wasserstoff** basiert auf denselben Herstellverfahren wie grauer Wasserstoff, allerdings wird die Wasserstoffherstellung hier mit CO₂-Abscheide- und Speicherungsverfahren gekoppelt (kurz CCS, engl. Carbon Capture and Storage). Das anfallende CO₂ gelangt so nicht in die Atmosphäre, sondern wird in unterirdischen Lagerstätten eingelagert. Als **türkiser Wasserstoff** wird vereinzelt Wasserstoff auf Basis der Methanpyrolyse bezeichnet, wenn die Wärmeversorgung aus erneuerbaren Energiequellen erfolgt und der entstehende Kohlenstoff dauerhaft gebunden wird. Grüner Wasserstoff ist wie oben beschrieben Wasserstoff auf Basis der Elektrolyse, wenn ausschließlich elektrischer Strom aus erneuerbaren Energien herangezogen wird. Unabhängig vom Elektrolyseverfahren ist grüner Wasserstoff CO₂-frei. Die weitergehende Analyse im

⁶⁶ Vgl. Adolf et al., 2007, S. 2.

⁶⁷ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 52.

⁶⁸ Vgl. Peschka, 1984, S. 6.; International Energy Agency, 2019, S. 37.; Vgl. Steinmüller et al., 2014, S. 30.

⁶⁹ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 52.

⁷⁰ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019.

Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf grünen Wasserstoff nach der obigen Definition.

2.3 Wasserstoff und Energiewende – „Grüner Wasserstoff“

Hauptziel der Energiewende im Sinne des Klimaschutzes ist die Abkehr von fossilen Energieträgern. Für viele Anwendungsbereiche in der Industrie werden fossile Energieträger in Kraftwerken verstromt und die elektrische Energie wird herangezogen, um in unterschiedlichsten Maschinen Arbeit zu leisten. In einigen Anwendungsbereichen wie dem Flugverkehr oder im Straßenverkehr werden allerdings fossile Energieträger in ihrer chemischen Form herangezogen, um mittels einer Wärmekraftmaschine mechanische Arbeit zu leisten. In der Zukunft kann Wasserstoff hierbei als vielfältiger Energieträger eine Schlüsselrolle einnehmen. Klimafreundlich hergestellter grüner Wasserstoff kann CO₂-Emissionen dort verringern, wo eine direkte Nutzung von Strom nicht zur Anwendung kommen kann.

Darüber hinaus hat Wasserstoff gegenüber elektrischem Strom den Vorteil, deutlich besser gespeichert werden zu können. Fossile Energieträger wie Erdöl oder Erdgas können zu einem beliebigen Zeitpunkt gefördert werden, sie können in Tanks, Kavernen oder Rohrleitungsnetzen vorgehalten werden und zu jedem beliebigen Zeitpunkt in entsprechenden Maschinen genutzt werden um Arbeit zu leisten. Die als erneuerbare Energie bezeichnete Energie aus Windenergie, Sonnenenergie oder Wasserkraft hingegen steht nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt zur Verfügung. Abgesehen von der Biomasse liegen die erneuerbare Energien auch nicht als chemischer Energieträger vor, sondern als elektrischer Strom. Die erneuerbare Energie aus Wasser, Wind und Sonne schwankt also in ihrem Aufkommen und lässt sich in ihrer Grundform als Elektrizität sehr schwer über längere Zeiträume speichern. Wenn das vorliegende Angebot an elektrischem Strom aus erneuerbaren Energien den aktuellen Strombedarf übersteigt, kommt grüner Wasserstoff ins Spiel. In einer Elektrolyseanlage kann mittels des überschüssigen elektrischen Stroms verfahrenstechnisch Wasser zerlegt werden in Sauerstoff und Wasserstoff (Power-to-Gas). Der Wasserstoff kann in seiner chemischen Form gespeichert, transportiert und zu jedem

beliebigen Zeitpunkt genutzt werden. Durch den Wasserstoff kann eine engere Verzahnung der wichtigen Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie erfolgen. Dies wird in der öffentlichen Diskussion häufig als Sektorkopplung bezeichnet.⁷¹

3 Grundlagen zum Straßenverkehr in Deutschland

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen des Straßenverkehrssektors in Deutschland dargelegt. Dazu wird der Verkehrssektor zunächst als solcher beschrieben um anschließend den Straßenverkehr genauer zu betrachten.

3.1 Der Verkehrssektor

Als Verkehr im Sinne dieser Arbeit wird die Ortsveränderung von Personen und Gütern bezeichnet. Je nach dem welches Objekt eine Ortsveränderung erfährt spricht man von Personenverkehr oder Güterverkehr. Zur Durchführung dieser Ortsveränderung ist ein Verkehrssystem erforderlich. Betrachtet man das Verkehrssystem eines ganzen Landes, besteht dieses aus einer Vielzahl verschiedener, funktionell verknüpfter Subsysteme. Jedes Subsystem operiert nach anderen Gesetzmäßigkeiten und in Abhängigkeit der jeweiligen Systemumgebung. Die folgende Abbildung 12 zeigt eine Gliederung des Verkehrssystems anhand der vier Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasserstraße und Luft mit Beispielen entsprechender Verkehrsmittel.⁷²

Subsysteme	Verkehrsmittel (Beispiele)
Spurgebundene Verkehrssysteme	Straßenbahn, U-Bahn, Güterzug
Straßengebundene Verkehrssysteme	Kraftfahrzeug, Ominibus, Lastkraftwagen
Luftverkehrssysteme	Passagierflugzeug, Frachtflugzeug
Binnenwasserstraßen- und Seeverkehrssysteme	Personenfähre, Frachtschiff

Abbildung 12: Bestandteile eines Verkehrssystems.⁷³

⁷¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020c.

⁷² Vgl. Köhler, 2014, S. 9.; Ammoser und Hoppe, 2006, S. 38.

⁷³ Köhler, 2014, S. 9.

Darüber hinaus lässt sich motorisierter Verkehr und nicht-motorisierter Verkehr unterscheiden. Auf Deutschland bezogen wird der Großteil der Verkehrsleistung vom motorisierten Verkehr erbracht, der dabei auf die Bereitstellung großer Mengen Energie angewiesen ist. Im Jahr 2018 lag der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland bei 2705 Petajoule. Dies entspricht etwa einem Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland (8.996 Petajoule) (siehe Abbildung 13).

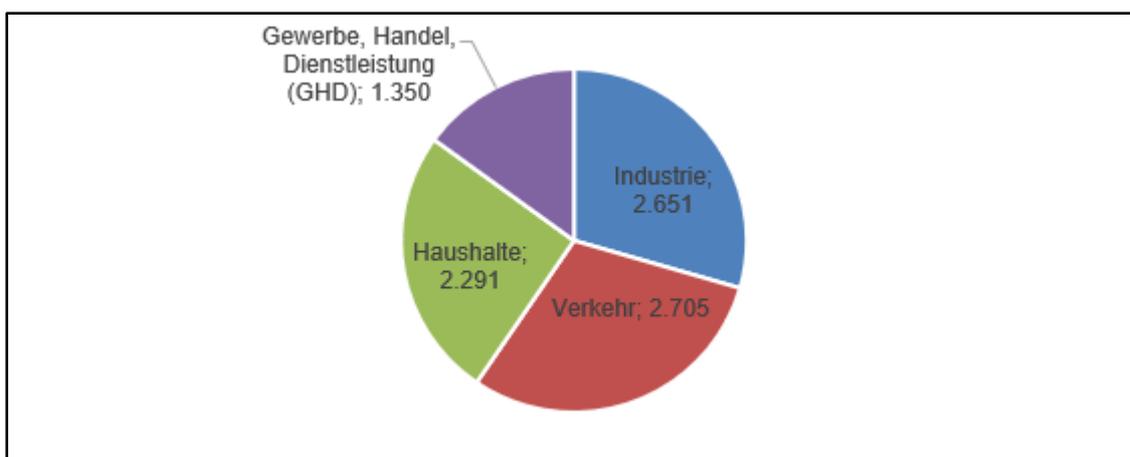


Abbildung 13: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018 nach Sektoren in Petajoule.⁷⁴

Es lässt sich feststellen, dass der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors seit 1990 angestiegen ist. Im Bezugsjahr 1990 betrug der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor 2379 Petajoule und stieg in den folgenden neun Jahren bis zum derzeitigen Höchststand im Jahr 1999 auf 2781 Petajoule. Nach einem Rückgang bis 2009 (2541 Petajoule) folgt erneut ein Anstieg bis 2017 (siehe Abbildung 14). Grund für den Anstieg war eine Zunahme des Personen- und Güterverkehrs auf der Straße, welcher die technischen Verbesserungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge überkompensierte.⁷⁵

⁷⁴ Einene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b, Tabellenblatt 5.

⁷⁵ Vgl. Umweltbundesamt, 2020a.

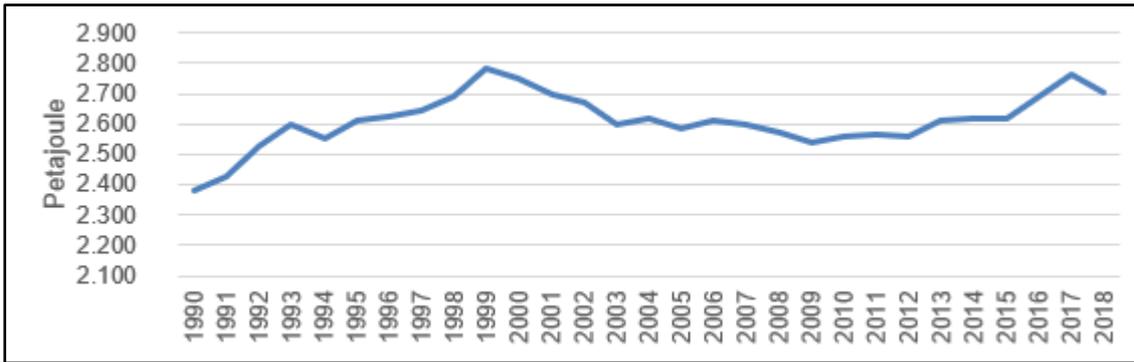


Abbildung 14: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor 1990-2018 in Petajoule.⁷⁶

Untersucht man den Energieverbrauch des Verkehrssektors genauer, so lässt sich feststellen, dass im Jahr 2018 der Straßenverkehr mit 2267 Petajoule für 86% des Energieverbrauchs im Verkehrssektor verantwortlich war (siehe Abbildung 15).

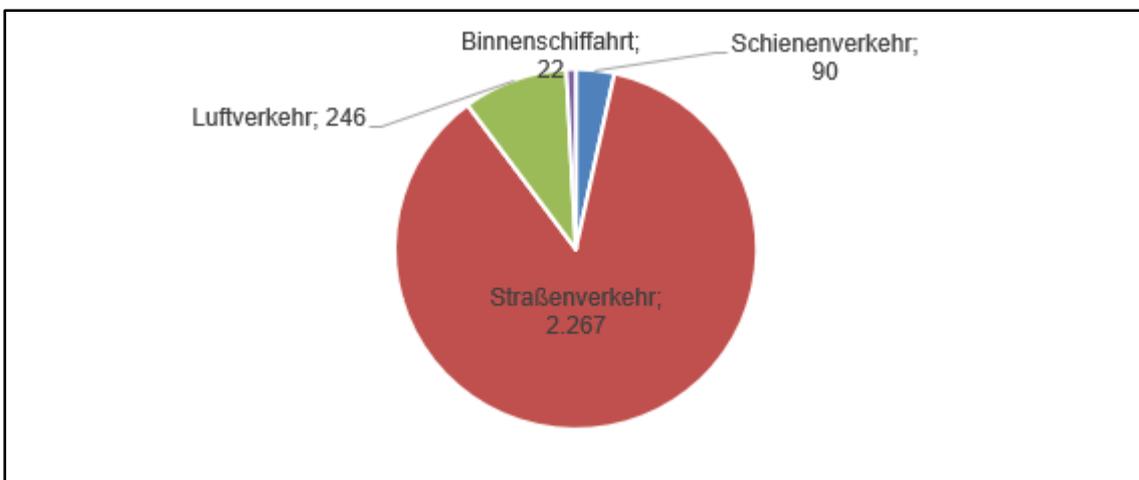


Abbildung 15: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland im Jahr 2018 nach Verkehrsträger in Petajoule.⁷⁷

Bei der Betrachtung der Energieträger, mit welchen der Energiebedarf der Sektoren bedient wurde, fällt auf, dass der Verkehrssektor wie kein anderer Sektor von der Verbrennung mineralischer Kraftstoffe abhängig ist.⁷⁸ Im Jahr 2018

⁷⁶ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019b, Tabellenblatt 5.

⁷⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019, Tabellenblatt 303.

⁷⁸ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019a, S. 4.

wurde fast 94% des Energiebedarfs des Verkehrssektors über Mineralöle gedeckt. Die Energieträger elektrischer Strom, erneuerbare Energieträger sowie sonstige Energieträger decken zusammen nur 6% des Energiebedarfs (siehe Abbildung 16).

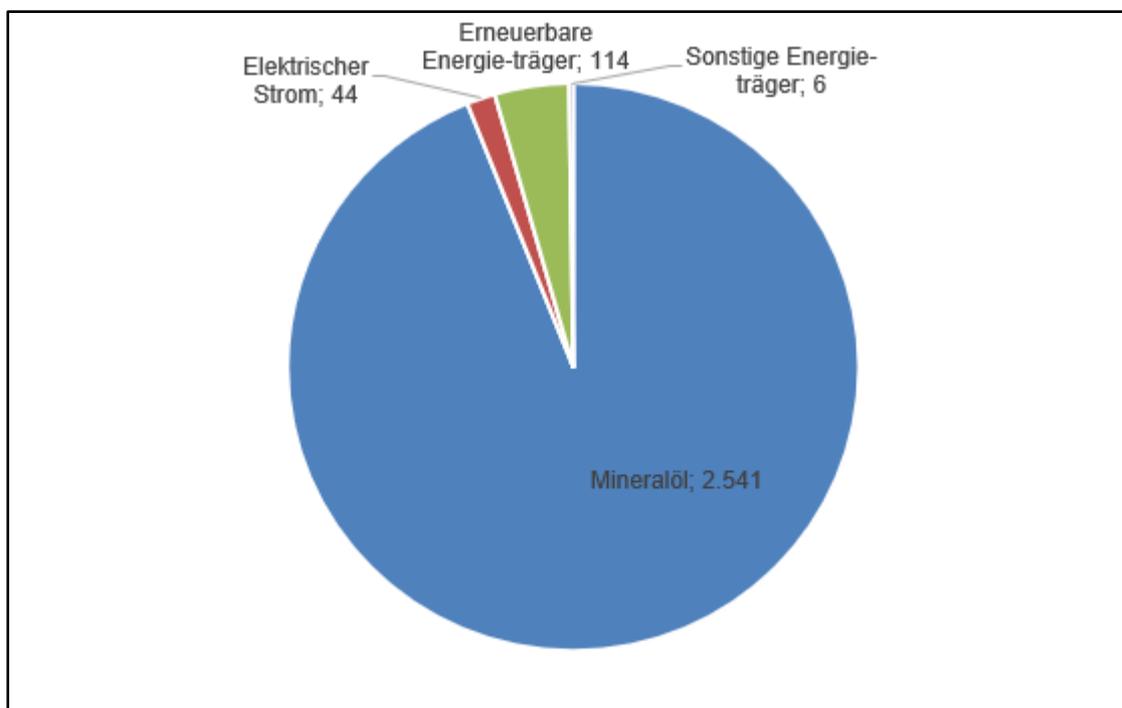


Abbildung 16: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland im Jahr 2018 nach Energieträger in Petajoule.⁷⁹

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Verkehrssektor etwa ein Drittel der Endenergie in Deutschland verbraucht. Der Großteil dieses Energieverbrauchs fällt im Straßenverkehr an. Darüber hinaus ist der Straßenverkehrssektor in besonderem Maße abhängig von der Verbrennung von Mineralölen, wodurch in großem Maßstab Emissionen von Treibhausgasen entstehen.

Nachfolgend wird im Rahmen dieser Arbeit der straßengebundene Verkehr in Deutschland genauer analysiert.

⁷⁹ Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019, Tabellenblatt 304.

3.2 Gliederung des Straßenverkehrs

Am 1. Januar 2020 gab es in Deutschland über 58 Millionen zugelassene Kraftfahrzeuge. Die über 47 Millionen Personenkraftwagen (PKW) und die etwa 4,5 Millionen Krafträder machen dabei den Großteil aus. Daneben gab es rund 80.000 Omnibusse und knapp 5,5 Millionen Lastkraftwagen und Zugmaschinen (siehe Abbildung 17).

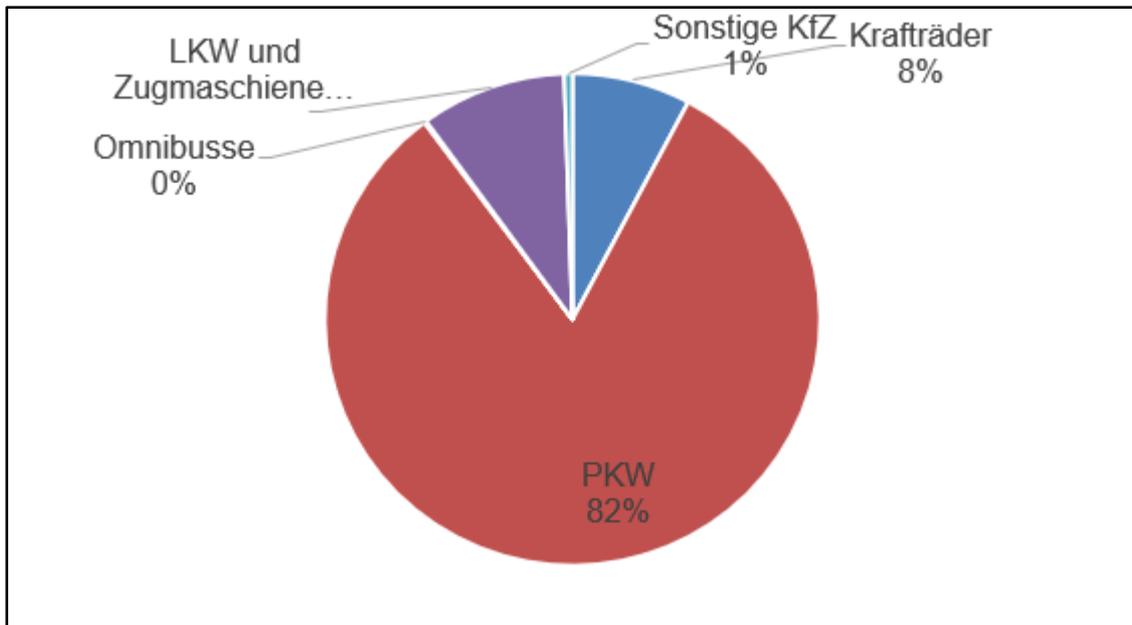


Abbildung 17: Kraftfahrzeugbestand 1. Januar 2020 nach Fahrzeugklasse in Prozent.⁸⁰

⁸⁰ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.

4 Wasserstoff im Straßenverkehr

Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger zum Antrieb von Straßenkraftwagen kann grundsätzlich auf Basis zweier unterschiedlicher Technologien erfolgen. Zum einen durch **Verbrennung** eines Wasserstoffgemisches in einer Kraftwärmemaschine, in diesem Fall eines klassischen Kolbenmotors. Diese Technik existiert schon sehr lange. Sogar das als erstes Fahrzeug mit Motor mit interner Verbrennung (ICE, engl. Internal Combustion Engine) geltende Fahrzeug „Hippomobile“ (Baujahr 1860) von Etienne Lenoir wurde mit einem Wasserstoffgemisch betrieben. Doch auch in jüngerer Vergangenheit wurden Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor entwickelt. Im Wesentlichen wird auf konventionelle, fremdgezündete Verbrennungsmotoren zurückgegriffen. Dabei müssen einige Systeme wie die Gemischbildung oder das Brennverfahren modifiziert werden und darüber hinaus sämtliche Komponenten, die mit Wasserstoff in Kontakt kommen, dahingehend angepasst werden. Jüngere Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotoren waren beispielsweise MAN Wasserstoff-Stadtbusse in den 1990er Jahren oder eine kleinere Flotte von BMW Hydrogen 7-Modellen zu Anfang der 2000er Jahre.⁸¹ Neben der klassischen Verbrennung von Wasserstoff in einem Kolbenmotor kann Wasserstoff auch mittels einer **Brennstoffzelle** im Fahrzeug rückverstromt werden und damit einen Elektromotor antreiben. Ernsthaftige Initiativen zu Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen (Fuel Cell Electric Vehicles; engl. „FCEVs“) erfolgten mit Beginn der 2000er Jahre. Gegenwärtig gibt es bereits zahlreiche nationale sowie internationale Automobilhersteller, die FCEVs (sowohl im PKW-Bereich als auch Busse und andere Fahrzeuge) zum Verkauf anbieten.⁸² Nach aktuellem Stand setzt sich die Brennstoffzelle als Energiewandler für Wasserstoff in Straßenfahrzeugen durch. Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die angebotenen Technologien im Bereich der Brennstoffzellen und die aktuelle Ist-Situation („Status Quo“) gegeben werden.

⁸¹ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 199 ff.

⁸² Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020b.

4.1 Technologie

Es gibt unterschiedliche Arten von Brennstoffzellen, die für einen Einsatz im Straßenverkehr geeignet sind. Technisch ist es prinzipiell möglich, diese in fast allen Fahrzeugen einzusetzen und damit die Verbrennungsmotoren zu substituieren. Die Brennstoffzellen sind den Elektrolyseuren technisch sehr ähnlich. Es gibt sogar sogenannte reversible Brennstoffzellen, die sowohl Wasser verstromen können als auch Wasserstoff herstellen können.⁸³ Auf eine detaillierte technische Erläuterung soll deshalb mit Verweis auf *Kapitel 5.1* verzichtet werden.

Die wichtigsten Brennstoffzellenarten werden untenstehend kurz skizziert.

- Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (auch engl.: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, kurz: „PEMFC“ oder „PEM“)

Bei den PEM-Brennstoffzellen handelt es sich um die weltweit am weitesten verbreitete und meistverkaufte Brennstoffzellenart mit Anwendungsmöglichkeiten sowohl im mobilen als auch stationären Bereich.

- Oxidkeramische Brennstoffzellen (engl.: Solid Oxide Fuel Cell, kurz: „SOFC“)

SOFC-Brennstoffzellen sind die nach den PEM-Brennstoffzellen zweitwichtigste Brennstoffzellenart. Sie kommen vor allem im stationären Bereich (Energie-/ Wärmeezeugung) zur Anwendung.

In der Praxis werden für den Antrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen in der Regel nur PEM-Brennstoffzellen verwendet, bei denen elektrischer Strom durch die kontrollierte Reaktion von Sauerstoff und Wasserstoff erzeugt wird. Während der benötigte Sauerstoff über die Luft bezogen wird, muss der Wasserstoff in speziellen Druckbehältern der Fahrzeuge getankt und mitgeführt werden.⁸⁴

Der aus der Reaktion der beiden Stoffe gewonnene elektrische Strom wird dann, je nach Fahrsituation, entweder direkt für den Antrieb eines Elektromotors verwendet oder in einer Batterie zwischengespeichert und bei Bedarf an den Elektromotor geleitet. Weitere Bestandteile der Brennstoffzellenfahrzeugtechnik sind in der Regel Systeme zur Bremsenergieerückgewinnung. Der Aufbau von FCEVs

⁸³ Vgl. Forschungszentrum Jülich GmbH, 2018.

⁸⁴ Vgl. Klell, Eichlseder und Trattner, 2018, S. 141 ff.

ist für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen (PKW, Busse, LKW) grundsätzlich ähnlich, auch wenn bei der technischen Konzeption fahrzeugbedingte Unterschiede existieren. Der wesentliche Vorteil der Brennstoffzellentechnik, insbesondere gegenüber Fahrzeugen mit Batterietechnik (engl.: Battery Electric Vehicle, kurz: BEV), liegt vor allem in der hohen Reichweite sowie den kurzen Betankungszeiten. Die Alltagseinschränkungen im Vergleich zu traditionellen diesel- oder benzinbetriebenen Fahrzeugen sind daher entsprechend gering und begünstigen einen Wechsel bzw. eine kontinuierliche Substitution von Fahrzeugen mit traditionellem Verbrennungsmotor durch FCEVs. Der wesentliche Vorteil hierbei besteht darin, dass FCEVs mit ihrer bereits heute sehr effizienten Antriebstechnologie erneuerbare Energien als Kraftstoff nutzen können und damit zu einer Reduzierung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern beitragen. Die dadurch eingesparten Treibhausgase und Schadstoffemissionen sind ein wichtiger Baustein für die Luftreinhaltung in den Innenstädten und die Reduzierung lokaler Umweltbelastungen. Die FCEVs dienen somit auch dem Ziel einer nachhaltigeren Ausgestaltung des innerstädtischen Straßenverkehrs. Im direkten Vergleich mit Batteriefahrzeugen erweisen sich die FCEVs insbesondere durch ihre hohe Reichweite (Pkw ca. 500 km, Busse ca. 300 km) als alltagstauglich. Dies zeigt sich auch bei der größeren Reichweite für schwerere Fahrzeuge. FCEVs sind in der Lage auch bei höherem Fahrzeuggewicht eine akzeptable Reichweite zu erzielen, während sich BEVs auf Basis der aktuellen Technik eher für kleinere PKW/ Nutzfahrzeuge und kurze Distanzen eignen. Da für schwere Pkw und Nutzfahrzeuge in Deutschland gegenwärtig fast nur Dieselmotoren eingesetzt werden, stellt die Brennstoffzellentechnologie als potenzieller Dieseleratz damit eine umweltschonende Alternative zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele im Straßenverkehr dar.⁸⁵

4.2 Status Quo

National sowie international dominieren nach wie vor herkömmliche, d.h. im Wesentlichen mit Benzin und Diesel betriebene Fahrzeuge den Transport von Gütern (LKW) und Personen (PKW und Busse). Grundsätzlich wäre eine zumindest

⁸⁵ Vgl. Ehret, 2018.

teilweise Substitution in den genannten Kategorien durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellen denkbar und möglich, wobei das PKW-Segment aufgrund seiner weltweiten Dominanz und die Gesamtanzahl an Fahrzeugen das wichtigste Einsatzfeld darstellt. Im Vergleich zu den mit Verbrennungsmotoren ausgestatteten PKW ist die Anzahl an FCEVs jedoch noch sehr gering. Lediglich einige hundert Fahrzeuge bewegen sich gemäß der vom Kraftfahrtbundesamt veröffentlichten Zahlen derzeit auf deutschen Straßen, wobei sich das Angebot auf wenige verfügbare Modelle (z.B. Toyota Mirai, Hyundai NEXO, Hyundai ix35 und Mercedes-Benz GLC) beschränkt.⁸⁶ Zwar sind weitere Brennstoffzellen PKW-Modelle angekündigt und auch der Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes schreitet kontinuierlich voran (von etwa 100 Ende 2019 auf bis zu 1000 in 2030). Von einer Versorgung über öffentlich zugängliche Tankstellen ist man aktuell allerdings noch weit entfernt. Neben der mangelhaften Betankungsinfrastruktur sind es auch die vergleichsweise hohen Kosten der angebotenen Fahrzeuge, die einen flächendeckenden Einsatz der FCEVs bremsen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Bussen. Im Bereich des Bustransports finden gegenwärtig einige Testprojekte in Deutschland statt.⁸⁷ Tankstellen, die in der Lage wären, Brennstoffzellenbusse oder -LKW in größeren Skalen zu bedienen, sind in Deutschland bisher noch keine eingerichtet. Im Gegensatz zu den PKW lässt sich bei brennstoffzellenbetriebenen Stadtbussen eine vergleichsweise dynamische Entwicklung diagnostizieren. Dies ist zum einen auf die Verpflichtung der Städte und Kommunen zurückzuführen, Emissionen drastisch zu verringern, mehr noch jedoch auf die von staatlicher und EU-Ebenen zur Verfügung gestellten Fördermittel für den Ausbau des Transportnetzes mit alternativen und möglichst CO₂ schonenden Fahrzeugen. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von Brennstoffzellentechnologie in Bussen besteht darin, dass die infrastrukturellen Anforderungen (planbare Betankungsstruktur, usw.) tendenziell geringer sind als bei PKWs.⁸⁸

⁸⁶ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

⁸⁷ Vgl. Rundfunk Berlin-Brandenburg, 2020.

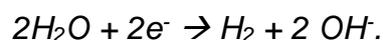
⁸⁸ Vgl. Ehret, 2018.

5 Industrielle Herstellung von grünem Wasserstoff

Wie in *Kapitel 2.2.3 Herstellungsverfahren auf Basis von Wasser* beschrieben gibt es grundsätzlich drei Verfahren der Elektrolyse. Nach aktuellem Stand eignen sich zwei davon zur industriellen Herstellung von grünem Wasserstoff: die alkalische Elektrolyse und die sogenannte PEM-Elektrolyse. Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen ist die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (kurz: „SOEL“; engl.: **Solid Oxide Electrolysis**). Aktuell ist die SOEL nicht im industriellen Maßstab nutzbar. Die obengenannte alkalische Elektrolyse und die PEM Elektrolyse werden im Folgenden genauer erläutert.

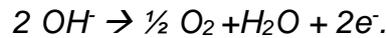
5.1 Technologie

Die **alkalische Elektrolyse** (kurz: „AEL“), bei der Kalilauge als wässriges Elektrolyt genutzt wird, erreicht den technisch am weitesten entwickelten Stand. Eine alkalische Elektrolysezelle besteht im Wesentlichen aus einem Gehäuse, das mit zwei Gasabscheidern verbunden ist. Innerhalb der Zelle ist das Elektrolyt, ein Gemisch aus Wasser und Kalilauge (KOH), in den Anoden- und Kathodenräumen enthalten. Die Anoden- und Kathodenräume werden durch ein ionendurchlässiges Diaphragma abgetrennt. Die Elektroden, Kathode (Minuspol) und Anode (Pluspol), befinden sich als Vorbleche direkt vor dem Diaphragma. An die Elektroden wird eine Gleichstromquelle angeschlossen. Die folgende Abbildung 18 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Zelle. Wenn die an der Elektrolysezelle angelegte Spannung höher ist als die Summe aus dem sogenannten elektrochemischen Zersetzungspotential von Wasser und der Überspannung (durch Widerstände in der Zelle), fließt elektrischer Strom durch die Zelle. Entsprechend der Elektronenflussrichtung werden zunächst an der Kathode aus Wassermolekülen unter Bildung von Ionen (OH⁻-Ionen) Wasserstoff-Gasmoleküle gebildet:



Die Wasserstoffmoleküle bilden Gasblasen, die sich von unten nach oben an der Kathode sammeln. Die OH⁻-Ionen werden durch die Spannungsdifferenz im Elektrolyten zwischen Kathode und Anode durch das Diaphragma zur Anode

transportiert. An der Oberfläche der Anode werden diese wieder mit Wasserstoffatomen zu Wasser rekombiniert. Dabei entstehen Sauerstoffmoleküle, die sich ebenfalls als Gasblasen an der Elektrode sammeln:



An der Kathode bildet sich genau doppelt so viel Wasserstoff, als sich Sauerstoff an der Anode bildet. Es ergibt sich folgende Gesamtgleichung:

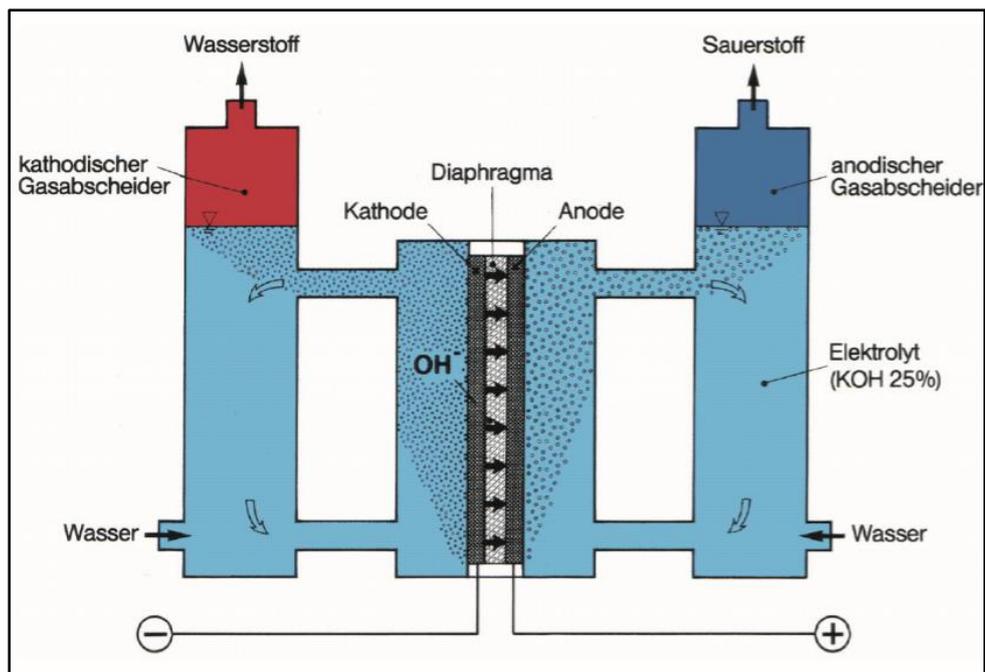
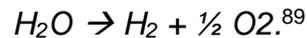


Abbildung 18: Schema einer alkalischen Elektrolysezelle.⁹⁰

Die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff werden an den Elektroden jeweils auf der dem Diaphragma zugerichteten Seite produziert. Die Elektroden werden dabei als Lochblech oder engmaschiges Gitternetz ausgeführt, sodass die Gase aus den Zwischenräumen in die Gassammelräume strömen können. In den Gasabscheidern werden Wasserstoff und Sauerstoff von der Flüssigkeit abgetrennt. Um eine entsprechend nutzbare Menge an Wasserstoff produzieren zu können,

⁸⁹ Vgl. Steinmüller et al., 2014, S. 30 ff.; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2013, S. 1 ff.; Peschka, 1984, S. 7 ff.

⁹⁰ Schiller, 2012.

werden in der Praxis viele einzelne Zellen elektrisch und verfahrenstechnisch zu einem Elektrolyseblock zusammengefügt.

Die alkalische Elektrolyse erreicht aktuell Wirkungsgrade von etwa 70%, bezogen auf den oberen Heizwert von Wasserstoff. Theoretisch sind im Teillastbetrieb Wirkungsgrade von über 80% technisch realisierbar. Die Steigerung der Wirkungsgrade fortschrittlicher AEL-Zellen-Konzepte basiert im Wesentlichen auf der Optimierung der Elektroden und der Erhöhung des Betriebsdrucks. Dabei werden die Elektroden mittels thermischer Beschichtung mit speziellen Legierungen katalytisch aktiviert.⁹¹

Eine zweite aussichtsreiche und technisch bewährte Elektrolysetechnik ist die **Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse** (kurz: „**PEM**-Elektrolyse“), welche als Elektrolyt eine protonenleitende Membran nutzt. Die Membran trennt Anoden- und Kathodenraum. Die Elektroden werden üblicherweise direkt auf die Membran aufgebracht. Bei der Membran handelt es sich um eine Kunststoffmembran auf Basis von PolyTetraFluorEthylen („PTFE“), welche die entsprechenden Ionen leitet und gleichzeitig die Gase voneinander abtrennt.⁹² Folgende Abbildung 19 zeigt den Aufbau einer PEM-Elektrolysezelle.

⁹¹ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 54.

⁹² Vgl. Steinmüller et al., 2014, S. 30 ff.; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2013, S. 4 ff.

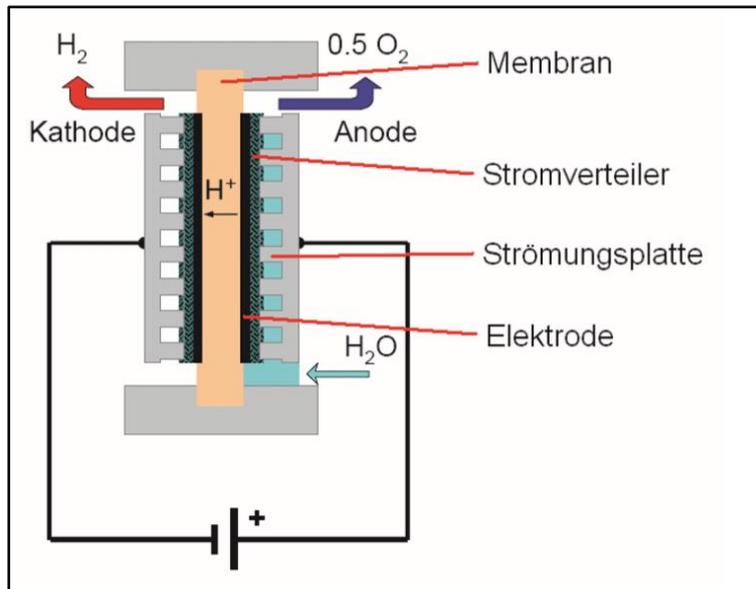
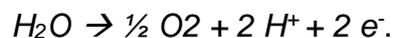


Abbildung 19: Schema einer PEM-Elektrolysezelle.⁹³

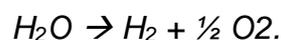
Obwohl sowohl die AEL als auch die PEM-Elektrolyse auf derselben chemischen Reaktion beruhen, unterscheidet sich die Funktion der entsprechenden Zellen stark. Bei der PEM-Elektrolysezelle wird das Elektrolysewasser an der Anodenseite zugeführt, an der Kathodenseite gibt es nahezu kein flüssiges Wasser. Dem Wasser wird auch kein alkalischer Elektrolyt beigemischt, stattdessen kommt ein saurer Elektrolyt zum Einsatz, der als Feststoff Bestandteil des Membrankunststoffs ist. Nach Zufügen des Wassers und Anlegen einer Spannung wird zunächst auf der Anodenseite Sauerstoff erzeugt:



Dabei entstehen positiv geladene Wasserstoff-Ionen (H^+ -Ionen). Diese werden von der Membran zur Kathodenseite geleitet, an der wiederum der Wasserstoff entsteht:



Daraus ergibt sich erneut die Gesamtreaktion:



⁹³ Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2013, S. 4.

Im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse sind die Materialanforderungen an PEM-Zellen deutlich höher. So sind an beiden Elektroden Edelmetallkatalysatoren notwendig, um die Überspannungen möglichst zu minimieren. Der verfahrenstechnische Aufwand der PEM-Elektrolyse ist hingegen niedriger, da kein Elektrolyt-kreislauf notwendig ist. Aktuell scheinen PEM-Elektrolyseure vor allem in Bezug auf kleinere Anwendungen eine gute Alternative zur klassischen alkalischen Elektrolyse zu sein. Eine großtechnische Skalierung scheint aktuell hingegen nicht sinnvoll.⁹⁴

5.2 Status Quo

Bereits realisierte kommerzielle Anlagen auf Basis der **alkalischen Elektrolyse** weisen Produktionskapazitäten von 1 bis 760 Normkubikmeter pro Stunde („Nm³/h“) auf. Das entspricht einer Energieaufnahme von etwa 5kW bis etwa 3,4 MW. Der Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs wird bestimmt durch seinen Energieverbrauch zur Herstellung eines Normkubikmeters Wasserstoff. Die Elektrolysezellen sind in einen verfahrenstechnischen Systemaufbau mit zahlreichen Nebenaggregaten eingebettet (z.B. Wärmetauscher, Wasseraufreinigung, Gasseparation usw. Siehe Abbildung 20).⁹⁵

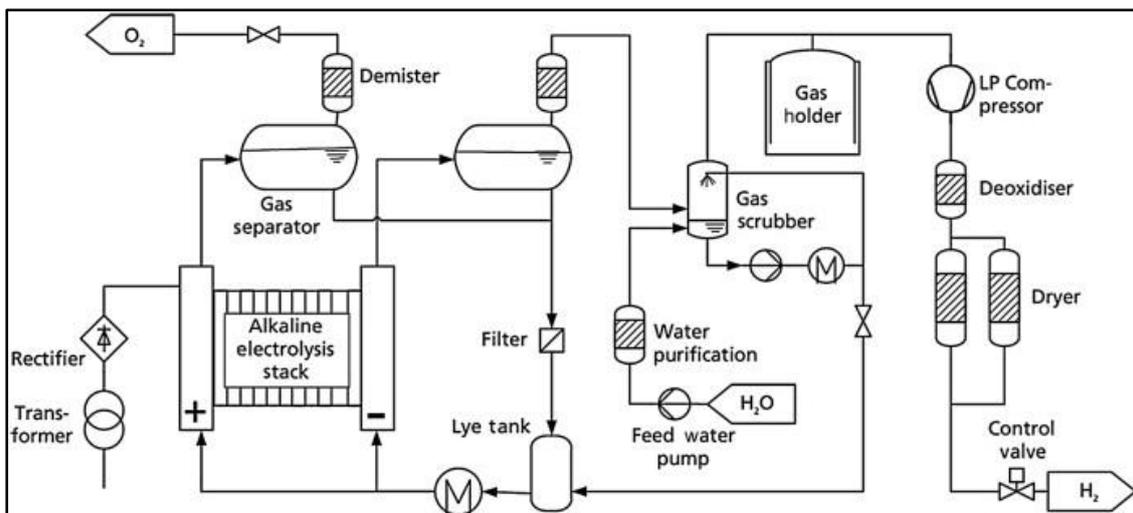


Abbildung 20: Systemaufbau eines alkalischen Elektrolyseurs.⁹⁶

⁹⁴ Vgl. Forschungsverbund Sonnenenergie, 2004, S. 54 ff.

⁹⁵ Vgl. Smolinka T.

⁹⁶ Vgl. Smolinka, Ojong und Garche, 2015.

Größere Anlagen arbeiten effektiver als kleine Anlagen, da sich der Energieverbrauch der Nebenaggregate so auf eine größere Produktionsmenge umschlagen lässt und der spezifische Energieverbrauch pro produziertem Normkubikmeter zurückgeht. Ab einer bestimmten Größe (ca. 100Nm^3) lassen sich durch die Modulbauweise von Elektrolyseuren nur noch geringe Einsparungen erzielen. Für größere Anlagen werden entsprechend mehrere Elektrolyseure parallel betrieben. Die größte Anlage für alkalische Elektrolyse im drucklosen Betrieb steht am Assuan-Staudamm in Ägypten. Die Anlage befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Staudamm, da hier mittels eines Wasserkraftwerks große Mengen an günstigem elektrischem Strom erzeugt werden (siehe Abbildung 21).⁹⁷



Abbildung 21: Kraftwerk am Großen Assuan Damm.⁹⁸

Bei einer Energieaufnahme von 156MW produziert die Anlage 33.000Nm^3 Wasserstoff pro Stunde. Hierbei kommen drucklose Elektrolyseure zum Einsatz (siehe Abbildung 21).

⁹⁷ Vgl. Smolinka T, Günther M. und Garcke J., 2011, S. 10 ff.

⁹⁸ Vgl. Mapio.net, 2020.

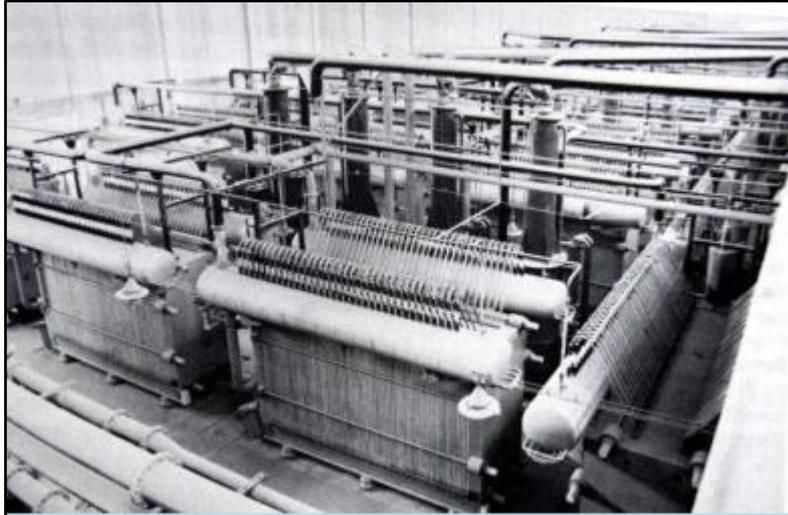


Abbildung 22: Elektrolyseanlage am Assuan-Staudamm.⁹⁹

Die größte druckbetriebene alkalische Elektrolyseanlage befindet sich in der Nähe von Cuzco, Peru. Unter einer Energieaufnahme von 22MW produziert die Anlage 4700 Nm³ Wasserstoff pro Stunde.

Auf Modulebene erreichen drucklosbetriebene alkalische Elektrolyseure einen Systemwirkungsgrad von 85% (bezogen auf den Brennwert). Druckbetriebene Elektrolyseure kommen auf einen Wirkungsgrad von etwa 78%, da zur Kompression eine große Energiemenge erforderlich ist.¹⁰⁰

Die vergleichsweise junge Technologie der **PEM-Elektrolyseanlagen** weisen einen einfacheren Aufbau auf. Außerdem können die Zellen mit höheren Stromdichten und Wirkungsgraden betrieben werden. Allerdings kommen dabei sehr teure Materialien zur Anwendung, sodass eine Skalierung zu größeren Anlagen aktuell nicht wirtschaftlich ist. PEM-Elektrolyseure kommen deshalb hauptsächlich in Nischen- und Kleinanwendungen zum Einsatz. Üblicherweise liegt der Leistungsbereich von PEM-Anlagen bei bis zu maximal 10 Nm³ pro Stunde.¹⁰¹ Die weltweit größte PEM-Wasserstoff-Elektrolyseanlage entsteht aktuell in Nordrhein-Westfalen (siehe Abbildung 23). Die Anlage ist mit einer Kapazität von

⁹⁹ Vgl. Nitsch, 2016, S. 2.

¹⁰⁰ Vgl. Smolinka T, Günther M. und Garcke J., 2011, S. 10 ff.

¹⁰¹ Vgl. Smolinka et al., 2018, S. 73 ff.

10MW geplant und soll so in der Lage sein jährlich rund 1300 Tonnen Wasserstoff herzustellen.¹⁰²



Abbildung 23: PEM-Elektrolyseanlage REFHYNE in Wesseling, Deutschland.¹⁰³

¹⁰² Vgl. IN4climate.NRW GmbH, 2020.

¹⁰³ Vgl. ITM Power, 2020.

6 Fallstudie 2050: Grüner Wasserstoff im deutschen Straßenverkehr

6.1 Einleitung

6.1.1 Methodenbeschreibung und Ziel der Fallstudie

Das Ziel des sechsten Kapitels und damit der *Fallstudie 2050: Grüner Wasserstoff im deutschen Straßenverkehr* soll die Beantwortung der in *Kapitel 1.3* formulierten Hauptforschungsfrage sein:

In welcher Form kann grüner Wasserstoff, der im Elektrolyseverfahren aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, zur Dekarbonisierung des deutschen Straßenverkehrs beitragen?

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wird die Methode der *Fallstudie* angewendet. Da die Thematik sehr komplex ist und diverse Wechselwirkungen mit unterschiedlichsten Einflussfaktoren bestehen, ist diese Methode geeigneter zur Erkenntnisgewinnung als beispielsweise die Optimierung eines mathematischen Modells.

Zum einen ist die Beantwortung der Forschungsfrage davon abhängig, in welchem Ausmaß Fahrzeuge mit Brennstoffzellentechnologie zur Verfügung stehen, ob die verfügbaren erneuerbaren Energien ausreichen, um die notwendige Menge an grünem Wasserstoff im Elektrolyseverfahren herzustellen und ob die Infrastruktur für den Transport des Wasserstoffs ausreichend ausgebaut ist. Weiterhin spielt es eine erhebliche Rolle, welche technischen Spezifikationen bei der Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen zum Standard werden und welche Länder hier eine Vorreiterrolle übernehmen werden. Gleichzeitig gilt es aus geographischen Gründen den Bedarf an Import von grünem Wasserstoff zu berücksichtigen, da die inländische Produktion hier an ihre Grenzen stoßen wird.¹⁰⁴

Dieses breite Spektrum an Einflussfaktoren verdeutlicht, dass die Optimierung einer Variable, wie z.B. die optimale anzustrebende Anzahl an Elektrolyseuren aufgrund der Komplexität der Einflussfaktoren und der mit großer Unsicherheit

¹⁰⁴ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 5–6.

behafteten Entwicklung, kein geeignetes Mittel darstellt, um die Hauptforschungsfrage angemessen zu untersuchen.

Stattdessen soll es bei der Fallstudie um ein exploratives und gleichzeitig strukturiertes Durchdenken von Zukunftsszenarien gehen. Damit soll ein besserer Überblick über die wichtigsten Einflussfaktoren, die den Einsatz von Wasserstoff bestimmen, gegeben werden. In diesem Sinn orientiert sich die Fallstudie an der dena-Leitstudie mit dem Fokus auf den Straßenverkehr.¹⁰⁵

Zunächst wird der Status Quo des Einsatzes von Wasserstoff im Straßenverkehr betrachtet. Im zweiten Teil der Fallstudie werden die Unterforschungsfragen durchdekliniert.¹⁰⁶ Dazu sollen analog zwei Zukunftsszenarien durchdacht und mögliche Entwicklungen für den verstärkten Einsatz von Wasserstoff im Straßenverkehr aufgezeigt werden.

Von der Bundesregierung wird bis 2050 eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 80% - 95% als Ziel gegenüber dem Niveau von 1990 angegeben. Die beiden Zukunftsszenarien nehmen die Ober- bzw. Untergrenze dieses Korridors an. Das Referenzszenario stellt den Status Quo sowie dessen Fortschreibung bis 2050 dar, wobei die dena-Leitstudie hier von einer erwarteten CO₂-Reduktion bis 2050 von 62 % ausgeht. Szenario 1 beschreibt einen konservativen Entwicklungspfad (im Folgenden Szenario 1), der zu einer CO₂-Reduktion von 80% führt und Szenario 2 beschreibt einen optimistischen Entwicklungspfad (im Folgenden Szenario 2), der eine CO₂-Reduktion von 95% zum Ziel hat. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass sich die drei Szenarien der Fallstudie zwar an die dena-Leitstudie anlehnen, dass jedoch keine quantitative Aussage zum Umfang der Dekarbonisierung durch den Einsatz von Wasserstoff im Straßenverkehr für das Jahr 2050 gegeben werden kann. Stattdessen soll viel mehr qualitativ erörtert werden, welche Bedingungen für einen mehr (Szenario 2) oder weniger (Szenario 1) starken Beitrag des Straßenverkehrssektors zur Dekarbonisierung durch den Einsatz von Wasserstoff erfüllt sein müssen. Dabei wird insbesondere bei

¹⁰⁵ Bründlinger, Thomas, et al. "dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050." Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), ewi Energy Research & Scenarios GmbH: Berlin/Köln, Germany (2018).

¹⁰⁶ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b.

Szenario 1 die Materie tiefer erläutert und darauf aufbauend in Szenario 2 in kurzer Form ein optimistischerer Entwicklungspfad diskutiert. Abbildung 24 stellt die verschiedenen Szenarien vor.¹⁰⁷

Szenario	Inhalt
Status Quo	Beschreibung des Status Quo und dessen Fortschreibung; CO ₂ -Reduktion bis 2050 von 62%
Szenario 1 – Konservativer Entwicklungspfad	CO ₂ -Reduktion bis 2050 von 80%
Szenario 2 – Optimistischer Entwicklungspfad	CO ₂ -Reduktion bis 2050 von 95%

Abbildung 24: Szenarien der Fallstudie.¹⁰⁸

6.1.2 Relevanz und Dringlichkeit zur Dekarbonisierung im Straßenverkehr

Wie in *Kapitel 1* kurz erläutert wurde, ist der Beitrag des Straßenverkehrssektors zur Reduktion von CO₂-Emissionen seit 1990 im Vergleich zu den anderen Sektoren sehr gering. Dadurch hat sich auch der relative Anteil der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs im Vergleich zu den anderen Sektoren erhöht. Die folgenden beiden Abbildungen verdeutlichen diesen relativen Anstieg der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr. Die folgende Abbildung 25 zeigt die absoluten CO₂-Emissionen der einzelnen Sektoren in Millionen Tonnen sowie deren relativen Anteil am CO₂-Ausstoß für das Jahr 1990. Der Anteil des Verkehrssektors beläuft sich auf 161 Mt und hatte damit einen Anteil von 16% an den Gesamtemissionen von CO₂ in Deutschland. Die Gesamtemissionen über alle Sektoren in Deutschland betragen in diesem Jahr 989 Mt CO₂. Folgende Abbildung 26 zeigt die absoluten CO₂-Emissionen der einzelnen Sektoren in Millionen Tonnen sowie den relativen Anteil der einzelnen Sektoren für das Jahr 2018. Während die Gesamtemissionen auf 704 Mt CO₂ gesunken sind und sich damit der Gesamtausstoß im Jahr 2018 gegenüber 1990 um fast 30% verringert hat, ist der *relative* Anteil

¹⁰⁷ Bründlinger, Thomas, et al. "dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050." Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), ewi Energy Research & Scenarios GmbH: Berlin/Köln, Germany (2018), S. 18-19.

¹⁰⁸ Eigene Darstellung.

des Verkehrssektors am Ausstoß von 16% auf 23% gestiegen. Das entspricht einer Steigerung des relativen Anteils im Verkehrssektor von 43%.

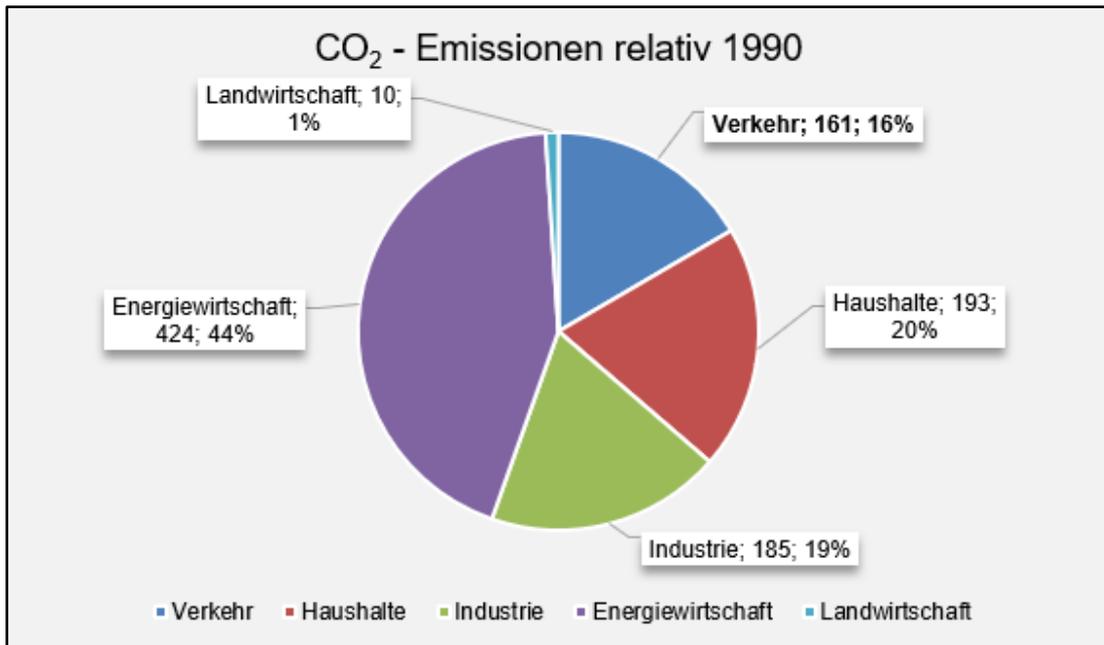


Abbildung 25: CO₂ Emissionen nach Sektoren 1990 in Millionen Tonnen.¹⁰⁹

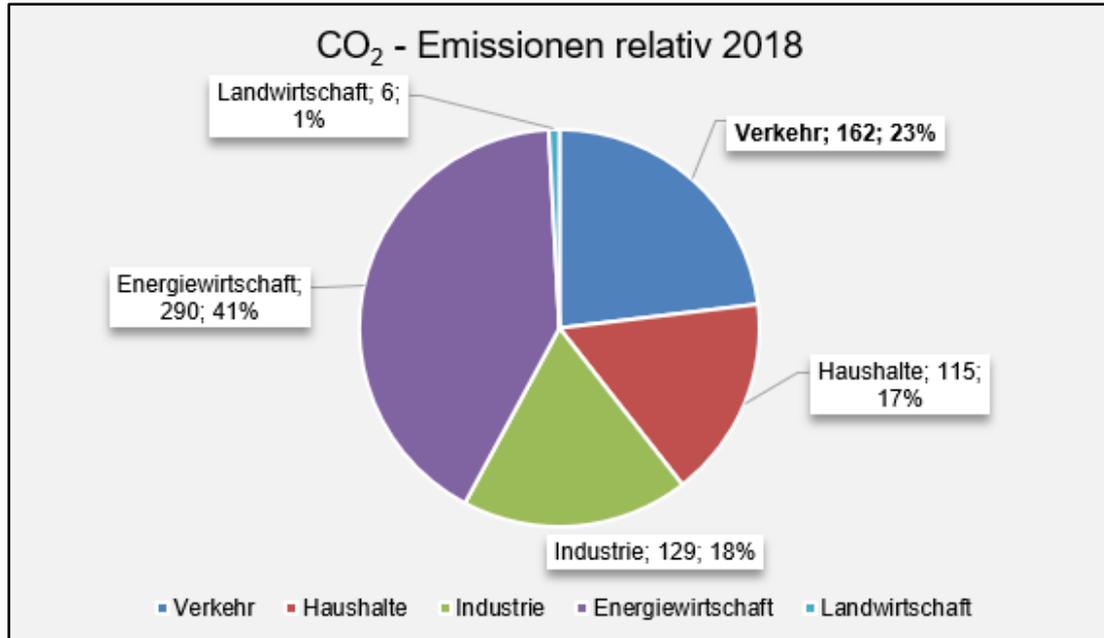


Abbildung 26: CO₂ Emissionen nach Sektoren 2018 in Millionen Tonnen.¹¹⁰

¹⁰⁹ Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019a.

¹¹⁰ Eigene Darstellung. Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019a.

Die grafische Aufbereitung der Zahlen veranschaulicht sehr deutlich den dringenden Handlungsbedarf, die der Zustand im Straßenverkehrssektor erfordert und gleichzeitig das große Treibhausgasminderungspotenzial, das in diesem Sektor realisiert werden kann.

Während die anderen Sektoren bereits einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung geleistet haben, steht der Verkehrssektor nach wie vor unter Zugzwang, Veränderungen einzuleiten. Im Folgenden soll im Referenzszenario ein Überblick des Status Quo beim Einsatz von Wasserstoff in allen relevanten Bereichen gegeben werden.

6.2 Status Quo & Referenzsituation

6.2.1 Wasserstoff im Straßenverkehr – Deutschland 2020

Derzeit ist der Einsatz von Wasserstoff und grünem Wasserstoff im Besonderen im Straßenverkehr noch recht limitiert. Im Folgenden soll ein Überblick über den aktuellen Stand in Deutschland gegeben werden. Insbesondere sollen die unterschiedlichen Antriebssysteme (Verbrenner, Elektromobilität, Brennstoffzelle), die auf deutschen Straßen im Einsatz sind miteinander verglichen werden, um einen Eindruck der derzeitigen Relevanz von Brennstoffzellenfahrzeugen im deutschen Straßenverkehr zu geben.

6.2.2 Fahrzeuge

Der Pkw Bestand in Deutschland beläuft sich im Jahr 2020 auf ca. 47 Millionen Fahrzeuge. Lediglich 172.800 Pkws fahren batterieelektrisch. Sehr gering ist der Bestand an Brennstoffzellen-Pkws. Dieser beträgt im Jahr 2020 gerade einmal 768 Pkws.¹¹¹ Der aktuelle Strategiefokus der deutschen Automobilhersteller im Pkw-Bereich liegt auf der Entwicklung und Produktion von batterieelektrischen Fahrzeugen. Da die Entwicklung und Hochskalierung einer Technologie zu Kapazitätsbeschränkungen und Werksauslastungen führt, ist auf Seiten der Hersteller die Bereitschaft zur gleichzeitigen Bereitstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, batterieelektrischen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Brennstoffzellen nicht stark ausgeprägt.¹¹² Gleichwohl ist die Technologie grundsätzlich marktreif. Beispielsweise hat der Daimler Konzern mit dem GLC F-Cell ein Vorserienmodell in den Markt gebracht (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Betankung eines GLC F-CELL.¹¹³

¹¹¹ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2020.

¹¹² Vgl. Tjarks, 2020.

¹¹³ Vgl. Mercedes Benz, 2020.

Zwei unmittelbare Vorteile von Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen ist zum einen die deutlich kürzere Betankungszeit von Wasserstoff (ca. drei Minuten) gegenüber der Ladezeit eines Elektroautos mit Batterie, die zwischen vier und zehn Stunden im normalen Lademodus und 30 Minuten im Schnelllademodus beträgt.¹¹⁴ Außerdem weisen die meisten Brennstoffzellenfahrzeuge deutlich größere Reichweiten als batterieelektrische Fahrzeuge auf. Während die meisten batterieelektrischen Fahrzeuge im Alltagsbetrieb auf Reichweiten von ca. 200km Reichweite kommen, reicht der Tank für einen größeren Brennstoffzellen-Pkw ca. 500km weit.¹¹⁵

Nachfrageseitig besteht grundsätzlich ein Interesse am Einsatz von Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie. Laut Auskunft der NOW GmbH, die als Tochtergesellschaft der Bundesregierung Förderprogramme im Bereich alternative Brennstoffe koordiniert, melden insbesondere kommunale Verkehrsbetreiber Interesse an Brennstoffzellen-Fahrzeugen wie Busse oder Kehrmaschinen für die Straßenreinigung an. Oftmals kommen solche Anschaffungen nicht zu Stande, weil die Wartezeiten für die entsprechenden Fahrzeuge zu lange sind. Damit ergibt sich für Deutschland aktuell der Gesamteindruck, dass die mengenmäßige Erhöhung der Brennstoffzellen-Fahrzeuge derzeit eher angebotsseitig als nachfrageseitig limitiert ist. Weiter fortgeschritten in der Fahrzeugbereitstellung und einer ersten Marktdurchdringung sind bei der Brennstoffzellentechnologie asiatische Länder wie Korea und Japan. Insbesondere die beiden Automobilbauer Toyota (Japan) und Hyundai (Korea) haben einige serienreife Fahrzeuge in ihrem Portfolio.¹¹⁶

Der deutsche Automobilbauer Daimler dagegen konzentriert sich strategisch derzeit auf die Entwicklung und Produktion von Lkws mit Brennstoffzellentechnologie. Zusammen mit Volvo soll beim Einsatz von Brennstoffzellen in Lkws kooperiert und damit der Wasserstoffeinsatz im Schwerlastverkehr vorangetrieben werden. Der Hersteller setzt hier auf einen gemischten Ansatz. Für kurze Strecken

¹¹⁴ Vgl. NOW GmbH, 2020.

¹¹⁵ Vgl. Ehret, 2018, S. 18–19.

¹¹⁶ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020b.

sollen primär batterieelektrische Lkws zum Einsatz kommen. Je größer die Ladung und je weiter die Strecke desto vorteilhafter erscheint aus technologischer Sicht der Einsatz der Brennstoffzelle. Der Grund liegt darin, dass für die großen Lkws entsprechend schwere Batterien verbaut werden müssten. Die Brennstoffzelle hat hier einen komparativen technologischen Vorteil gegenüber der Batterie. Nicht zu vernachlässigen sind die Synergieeffekte zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen. Sowohl in Pkws als auch in Lkws werden weitgehend die gleichen Komponenten verbaut. Dies stellt ein großes Potenzial dar, da die Erkenntnisse und Erfahrungen, die in der Entwicklung und Konstruktion von Brennstoffzellen gesammelt werden über die verschiedenen Fahrzeugklassen hinweg genutzt, Fixkosten minimiert und Effizienzgewinne realisiert werden können.¹¹⁷

Die folgende Abbildung 28 veranschaulicht schematisch die unterschiedlichen Antriebsmodelle für Pkws: Hybrid-Versionen mit Verbrennungsmotoren, batterieelektrischer Antrieb und Antrieb mit Brennstoffzellentechnologie (Abbildung von links nach rechts).

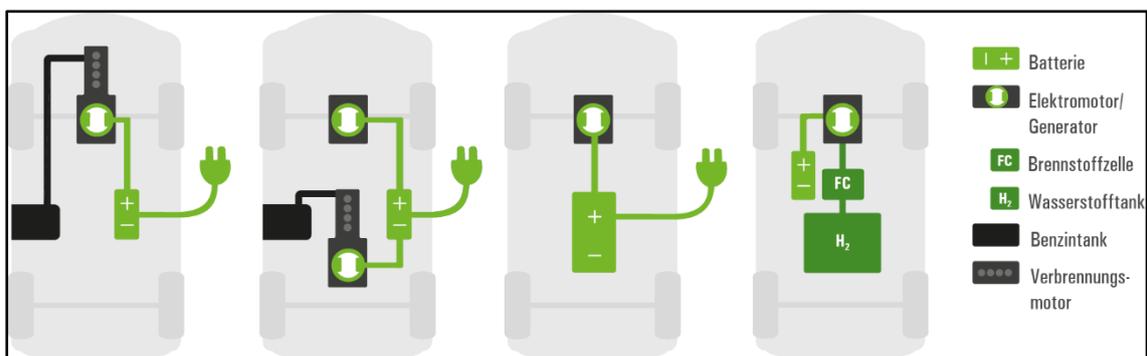


Abbildung 28: Antriebskonzepte PKW.¹¹⁸

¹¹⁷ Vgl. Ehret, 2018, S. 19–20.

¹¹⁸ NOW GmbH, 2020.

6.2.3 Infrastruktur

Wie werden in Deutschland im Jahr 2020 Wasserstoffautos mit dem Kraftstoff versorgt? Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Infrastruktur bei der Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen auf deutschen Straßen gegeben werden.

Für den Aufbau eines Wasserstofftankstellennetzes in Deutschland ist die H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG (kurz: „H2 Mobility“) zuständig.¹¹⁹ Die unterschiedlichen Gesellschafter, die hinter der H2 Mobility stehen bringen ihre individuelle Expertise ein, um den Start des Wasserstofftankstellennetzes in Deutschland voranzutreiben. Die folgende Abbildung 29 zeigt die H2 Mobility und ihre Gesellschafter.

Gesellschaft	Anteilseigner
H2 Mobility	Total (Mineralölkonzern)
	Shell (Mineralölkonzern)
	OMW (Mineralölkonzern)
	Linde (Gaskonzern)
	Air Liquide (Gaskonzern)
	Daimler (Automobilbauer)

Abbildung 29: Gesellschafterstruktur H2 Mobility.¹²⁰

Die Gesellschaft hat sich zum Ziel gesetzt eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland aufzubauen. Die erste Phase des Aufbaus umfasste vor allem 7 von der Gesellschaft priorisierte Ballungszentren:

- Hamburg
- Berlin
- Rhein-Ruhr
- Frankfurt
- Nürnberg
- Stuttgart
- München

¹¹⁹ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

¹²⁰ Eigene Darstellung.

In diesen Ballungszentren erfolgte der primäre Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes. Aktuell sind in Deutschland 87 Wasserstofftankstellen in Betrieb. Weitere acht Tankstellen befinden sich im Probetrieb. Zehn potenzielle Standorte befinden sich in der Genehmigungs- bzw. Planungsphase.¹²¹ Zum Vergleich: die Anzahl der konventionellen Tankstellen in Deutschland beträgt 14.118.¹²²

Die folgende Abbildung 30 gibt einen Überblick über die aktuelle Verteilung des Wasserstofftankstellennetzes. Die grün dargestellten Punkte sind Tankstellen, die sich bereits in Betrieb befinden, die blau gefärbten Punkte stellen Standorte dar, die sich in der Genehmigungs-, in der Planphase oder im Probetrieb befinden.

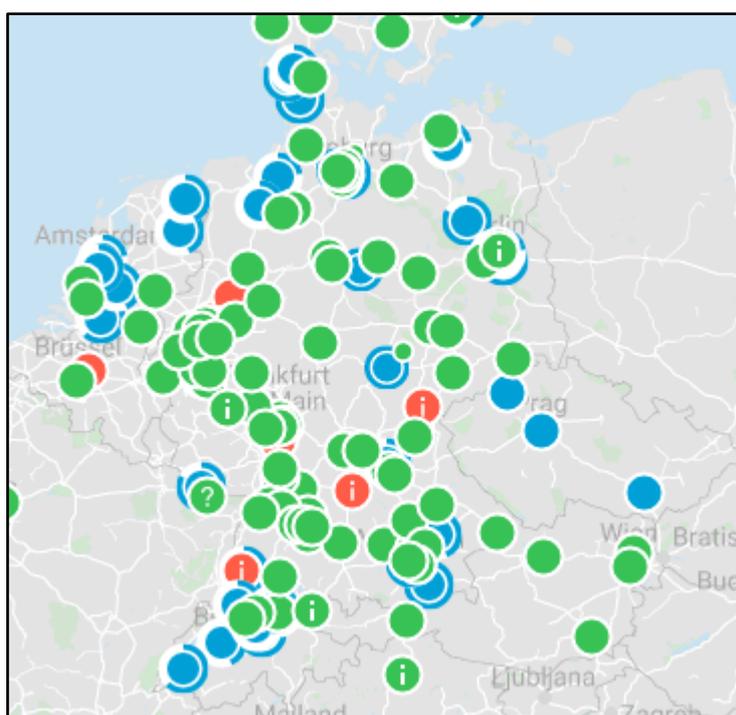


Abbildung 30: Wasserstofftankstellennetz.¹²³

Die Gesellschafter der H2 Mobility erfüllen für die Realisierung des Projekts unterschiedliche Aufgaben. Die beiden Gaskonzerne Air Liquide und Linde beliefern die Tankstellen mit dem Wasserstoff. Der Transport wird aktuell größtenteils per

¹²¹ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

¹²² Vgl. ADAC, 2019.

¹²³ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

Lkw organisiert. Dies wird auf kurze Sicht auch der primäre Transportweg bleiben. Vereinzelt gibt es jedoch schon heute Wasserstofftankstellen, die per Pipeline versorgt werden. Ein Beispiel ist die im Juni 2019 eröffnete Tankstelle an der Oerschbachstraße im Süden von Düsseldorf, die an eine Pipeline von Air Liquide angeschlossen ist.¹²⁴

Die Mineralölkonzerne und Tankstellenbetreiber Shell, Total und OMV bringen in die Unternehmung ihre Expertise zur Betankungstechnik und Erfahrung für den Betrieb von Tankstellen mit ein. Weiterhin wird bei der Planung einer Wasserstofftankstelle diese an eine bereits existierende konventionelle Tankstelle der drei Konzerne angeschlossen.

Nachdem der erste Ausbau in den genannten Ballungszentren weitgehend abgeschlossen ist, soll in der nächsten Phase ab 2021 der weitere Ausbau primär dort erfolgen, wo sich aufgrund örtlich starker Nachfrage nach Brennstoffzellenfahrzeugen ein entsprechender Bedarf ergibt. Zu diesem Zweck können lokal Gruppen von Nutzern die Errichtung einer Wasserstofftankstelle bei der H2 Mobility beantragen.¹²⁵

Mit diesem ersten Ausbau eines Wasserstofftankstellennetzes in Deutschland ist die Gesellschaft in eine unternehmerische Vorleistung gegangen, um eine grundlegende Infrastruktur zu etablieren, die die deutschlandweite, flächendeckende Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen überhaupt ermöglicht.

Gleichzeitig muss angemerkt werden, dass diese Pilotprojekte stark von staatlicher Seite gefördert wurden und werden. Laut Auskunft der H2 Mobility kostet der Bau einer Wasserstofftankstelle ca. 1,2 Millionen Euro. Davon werden ca. 50% vom Staat gefördert. Für den Betrieb der Tankstelle gibt es jedoch keine Förderung. Es handelt sich also um Investitionskostenzuschüsse zur Marktaktivierung und nicht um Betriebskostenzuschüsse.

6.2.4 Förderung

Wie wird in Deutschland im Jahr 2020 Technologie im Bereich Brennstoffzelle, Mobilität und Wasserstoff gefördert? In diesem Abschnitt soll ein kurzer Überblick

¹²⁴ Vgl. Stadt Düsseldorf, 2019.

¹²⁵ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

über die relevanten Förderprogramme und Strukturen gegeben werden, die den Ausbau des Einsatzes von Wasserstoff im Straßenverkehrssektor unterstützen. Das nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie („NIP“) ist das größte Förderinstrument für den Einsatz von Wasserstoff im (Straßen-)Verkehrssektor.¹²⁶ Es wurde 2008 gegründet und förderte Forschung und Entwicklung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen mit einem Volumen von insgesamt 700 Millionen Euro im Zeitraum von 2008 - 2016.¹²⁷ Diese erste Phase primär den Aufbau von Wertschöpfungsketten, Forschung und Entwicklung zur Marktvorbereitung von Technologien, sowie das Anstreben einer Technologieführerschaft zum Ziel.

Für die zweite Phase des Förderprogramms das sogenannte NIP II, ist ein Fördervolumen von 2016 - 2026 von insgesamt 1,4 Mrd. Euro vorgesehen. Von diesen Mitteln sollen ca. 40% für Maßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung und ca. 60% für Maßnahmen zur Marktaktivierung verwendet werden. Markante Projekte für marktaktivierende Maßnahmen sind beispielsweise die oben genannte Förderung für die Errichtung von Wasserstofftankstellen oder die Beschaffung von Brennstoffzellenfahrzeugen. Bei diesen marktaktivierenden Förderungen wird die Anschaffung finanziell unterstützt. Eine Förderung der laufenden Kosten ist hier jedoch nicht vorgesehen. Das NIP II hat damit einen Fokus auf Investitionskostenförderung statt Betriebskostenförderung und damit das Ziel einer Marktaktivierung der vorhandenen Technologien.¹²⁸ Damit verfolgte die erste Phase des NIP (2007 - 2016) vor allem das Ziel einer Entwicklung von marktfähigen Produkten und Technologien. Im NIP II (2016 - 2026) soll es vor allem darum gehen diese Ergebnisse in großer Zahl in den Markt zu bringen. Nicht zuletzt verfolgt das NIP II im Einklang mit der nationalen Wasserstoffstrategie den Ansatz, durch die Marktaktivierung von Brennstoffzellenfahrzeugen gerade den Bedarf nach grünem Wasserstoff zu erzeugen. *Den Bedarf an* und die *Produktion von* grünem Wasserstoff gemeinsam zu denken ist also die Leitstrategie der Förderung von Wasserstoff im Verkehrssektor in Deutschland.¹²⁹

¹²⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016.

¹²⁷ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016, S. 3.

¹²⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016, S. 17.

¹²⁹ Vgl. Tjarks, 2020.

Im Zuge der Einführung des NIP I im Jahr 2008 wurde die NOW GmbH als 100%ige Tochtergesellschaft der Bundesregierung gegründet und mit der Umsetzung des Förderprogramms beauftragt. Heute koordiniert sie in diesem Zusammenhang generell die Umsetzung von Fördermaßnahmen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzelle und berät die Bundesregierung in diesen Belangen.¹³⁰ Die NOW GmbH ist somit ein wichtiger Akteur für die Verbreitung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im Straßenverkehr in Deutschland.

6.2.5 Produktion

Wie sieht aktuell die Herkunft und Produktion des für den Straßenverkehrssektor verwendeten Wasserstoffs aus? Was sind typische Herstellungsmethoden? Wie viel grünen Wasserstoff im Verkehrssektor gibt es im Jahr 2020 in Deutschland? Dieser Abschnitt soll dazu einen Überblick verschaffen.

Wie im Abschnitt Infrastruktur beschrieben wurde, ist für die Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen von der H2 Mobility ein erstes Wasserstofftankstellennetz in Deutschland geschaffen worden. Der Anteil an grünem Wasserstoff ist derzeit noch gering. Grund dafür sind unter anderem auch erhebliche Abgaben und Entgelte, wie beispielsweise die EEG-Umlage¹³¹, die den grünen Wasserstoff aus dem Elektrolyseverfahren noch zu teuer machen.¹³²

Die H2 Mobility bezieht für ihr Tankstellennetz ca. 28% grünen Wasserstoff, von diesem wiederum stammt der größte Anteil aus Biomethan/Biomethanol. Es handelt sich also überwiegend um grünen Wasserstoff aus Biomasse. Dieser ist zwar CO₂-neutral jedoch im Gegensatz zu grünem Wasserstoff aus dem Elektrolyseverfahren nicht CO₂-frei. Bei der Herstellung des Wasserstoffs wird zuvor gebundenes Kohlendioxid frei, daher wird er als CO₂-neutral bezeichnet: Es wird genau so viel CO₂ freigesetzt wie zuvor der Atmosphäre entzogen wurde. Tatsächlich werden aktuell nur 2% des Gesamtbedarfs der H2 Mobility an Wasserstoff durch grünen Wasserstoff aus dem Elektrolyseverfahren gedeckt. Die H2 Mobility strebt

¹³⁰ Vgl. Tjarks, 2020.

¹³¹ In Kapitel 6.3, Unterforschungsfrage 3 wird detaillierter auf den Zusammenhang zwischen EEG-Umlage und Produktionskosten für grünen Wasserstoff eingegangen.

¹³² Mehr zur Relevanz und dem Potenzial, Regulierungen umzugestalten umso grünen Wasserstoff wettbewerbsfähiger zu machen wird in Szenario 1 diskutiert.

an, diesen Anteil Schritt für Schritt zu steigern. 30% des verwendeten Wasserstoffs stammt aus der chemischen Industrie, wo dieser als Nebenprodukt anfällt und sonst verbrannt würde bzw. ungenutzt bliebe. Der größte Teil des verwendeten Wasserstoffs stammt aus dem in *Kapitel 2.2.1.* beschriebenen Dampfreformierungsverfahren auf Basis von Erdgas. Ca. 42% des Gesamtbedarfs der H2 Mobility werden damit gedeckt. Damit sind die beiden Gesellschafter und Gasproduzenten Linde und Air Liquide wesentliche Produzenten des verwendeten Wasserstoffs. Allerdings spart auch der aus Erdgas gewonnene Wasserstoff gegenüber konventionellen Kraftstoffen ca. ein Drittel CO₂ ein.¹³³ Folgende Abbildung 31 veranschaulicht den Wasserstoffmix für das von der H2 Mobility betriebene deutsche Tankstellennetz.

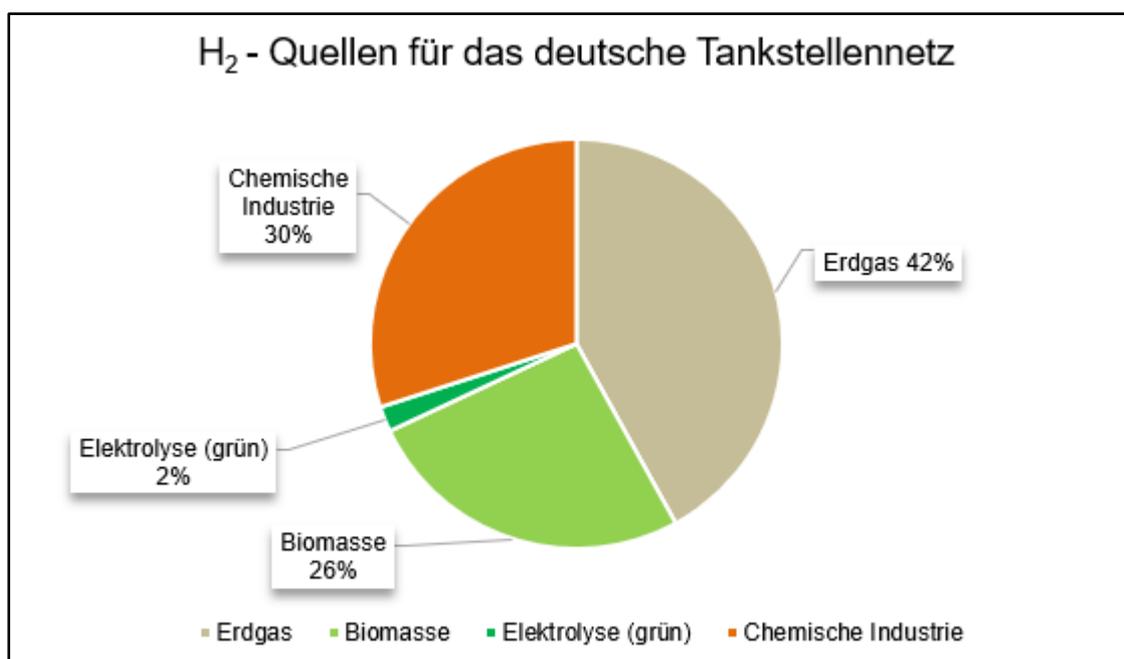


Abbildung 31: H₂-Mix im Straßenverkehr 2020 in Prozent.¹³⁴

6.2.6 Fazit Status quo

Wir haben nun einen Überblick über die aktuelle Situation in Deutschland bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff im Straßenverkehr inklusive der Betrachtung von Fahrzeugaufkommen, Brennstoffzellentechnologie, Tankinfrastruktur und

¹³³ Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

¹³⁴ Eigene Darstellung. Vgl. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, 2020a.

Herkunft des verwendeten Wasserstoffs erhalten. Grundsätzlich sind alle verwendeten Technologien marktreif, allerdings ist es bislang noch zu keinem breiten Markthochlauf und damit zu einer mengenmäßig relevanten Nutzung von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle gekommen.

6.3 Szenario 1 – Konservativer Entwicklungspfad

Wie einleitend in *Kapitel 6.1* beschrieben soll in Szenario 1 ein konservatives Szenario bis 2050 entworfen werden. Das Szenario 1 orientiert sich, wie eingangs erläutert an dem 80%-Reduktionsziel (siehe Abbildung 27).

Nachdem ein Überblick über den Status Quo und damit die aktuelle Ausgangslage gegeben wurde, soll nun anhand der Unterforschungsfragen durchdacht werden, welche Rahmenbedingungen und Entwicklungen für einen großflächigen Einsatz von grünem Wasserstoff im Straßenverkehrssektor erfüllt sein müssen.

Laut dena-Leitstudie ist davon auszugehen, dass ein Technologiemix, der neben der Energieversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien auch die Verwendung von grünem Wasserstoff bzw. aus diesem in weiteren Produktionsschritten gewonnenen sogenannten Green Power Fuels mit einschließt, die Energiewende in Deutschland und damit das Reduktionsziel von 80% (Szenario1) bzw. 95% CO₂-Minderung (Szenario 2) effizienter erreicht als eine reine Elektrifizierung aller Sektoren mit grünem Strom.¹³⁵ Folglich steht damit auch der Straßenverkehrssektor in der Handlungspflicht. Wie in *Kapitel 1* beschrieben wird auch von der Bundesregierung in der Nationalen Wasserstoffstrategie die Bedeutung dieses Energieträgers anerkannt.¹³⁶ Wir werden bei der Untersuchung von Unterforschungsfrage 4 (Erneuerbare Energien) sehen, welche Bedeutung Wasserstoff für die Sektorkopplung zwischen Energie- und Verkehrssektor hat.

¹³⁵ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 22.

¹³⁶ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 2.

6.3.1 Unterforschungsfrage 1

Inwiefern könnte grüner Wasserstoff innerhalb des Straßenverkehrs sinnvoll genutzt werden und welche Technologien wären dafür notwendig?

Grundsätzlich haben wir bei der Beschreibung des Status Quo gesehen, dass es durchaus heute schon marktreife Technologien für den Einsatz von grünem Wasserstoff in Deutschland gibt. Wie in der dena-Leitstudie deutlich aufgezeigt, ist für die Erreichung der Klimaschutzziele bereits bis 2030 ein flächendeckender Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen erforderlich.¹³⁷

Es wird also deutlich, dass es bei der Beantwortung dieser Unterforschungsfrage vielmehr um die *flächemäßige* Verbreitung und einen signifikanten Markthochlauf der bereits entwickelten Technologien handelt. Insbesondere unter Förderung durch das NIP I (2008-2016) sind bereits enorme Anstrengungen in die Entwicklung von Brennstoffzellen geflossen.

Auf Seiten der Fahrzeuge geht es vor allem darum, die Stückzahl massiv auszubauen, da durch hohe Produktionszahlen eine Kostendegression bei der Herstellung von Brennstoffzellen erreicht werden kann. Insofern ist es ein guter Ansatz der Bundesregierung in der Wasserstoffstrategie, die Investitionskostenzuschüsse, also Förderungen für die Anschaffung von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle im Rahmen des NIP II, zu gewähren. Das Anschieben des Marktes ist somit höher zu priorisieren als die Entwicklung neuer Technologien.

Das wichtigste Instrument ist also nicht primär die Förderung von Forschung und Entwicklung, sondern das Schaffen von Rahmenbedingungen und Anreizen durch den Staat für eine Etablierung der Technologie im Markt.

Einen großen Beitrag kann auf kurze Sicht der Schwerlastverkehr spielen. Wir haben oben gesehen, dass sich beispielsweise Daimler in diesem Bereich aktuell stark aufstellt. Auch hier kann eine staatliche Änderung der Rahmenbedingungen zusätzliche Anreize für die Verbreitung der Technologie schaffen, z.B. durch eine Mautbefreiung von CO₂-freien Lkws.¹³⁸ Eine Mautbefreiung für CO₂-freie Lkws

¹³⁷ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 38.

¹³⁸ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 21.

wäre eine sehr marktnahe, anreizkompatible und gerechte Förderung von Brennstoffzellen-Lkws, die natürlich von einer Erhöhung des Anteils an grünem Wasserstoff bei der Versorgung durch die Wasserstofftankstellen begleitet werden muss, um einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten zu können.

Nachfrage nach Brennstoffzellen Fahrzeugen kann auch durch kommunale Verkehrsbetriebe mit Unterstützung durch die Investitionskostenförderung des NIP II generiert werden. So besteht durchaus Interesse an der Anschaffung von Fahrzeugen, um so beispielsweise saubere Bus-Flotten oder auch kommunale Nutzfahrzeuge aufzubauen.¹³⁹ Beispielhaft dafür ist die Stadt Waiblingen, die sich eine Kehmaschine mit Brennstoffzellenantrieb anschafft (siehe Abbildung 32).



Abbildung 32: Kehmaschine mit Brennstoffzelle.¹⁴⁰

Wesentliche Technologieentwicklungen, die im Rahmen der Forschung und Entwicklung für die Brennstoffzelle im Pkw-Bereich gemacht wurden, sind zu einem sehr großen Teil in größerem Maßstab auch im Schwerlastverkehr nutzbar. Die genannten Maßnahmen sind ein wesentlicher Faktor, um die Nachfrage nach Fahrzeugen im Schwerlastverkehr mit Brennstoffzellentechnologie voranzutreiben und damit eine Marktdurchdringung zu erreichen.

¹³⁹ Vgl. Tjarks, 2020.

¹⁴⁰ Vgl. Stuttgarter Zeitung, 2020.

Für den Pkw Bereich kommt die Prognose der dena-Leitstudie auf eine Anzahl von 6,7 – 12,1 Millionen Pkws mit Brennstoffzelle für das Jahr 2050.¹⁴¹ Dieser massive Anstieg kann nur durch eine starke Kostendegression der Brennstoffzellenfahrzeuge erreicht werden. Im Gutachterbericht der dena-Leitstudie wird von einer Kostenreduktion für Brennstoffzellen Pkws von 30% bis 2030 und 42% bis 2050 gegenüber dem Stand von 2015 ausgegangen.¹⁴² Folgende Abbildung 33 veranschaulicht diese Kostendegression grafisch.

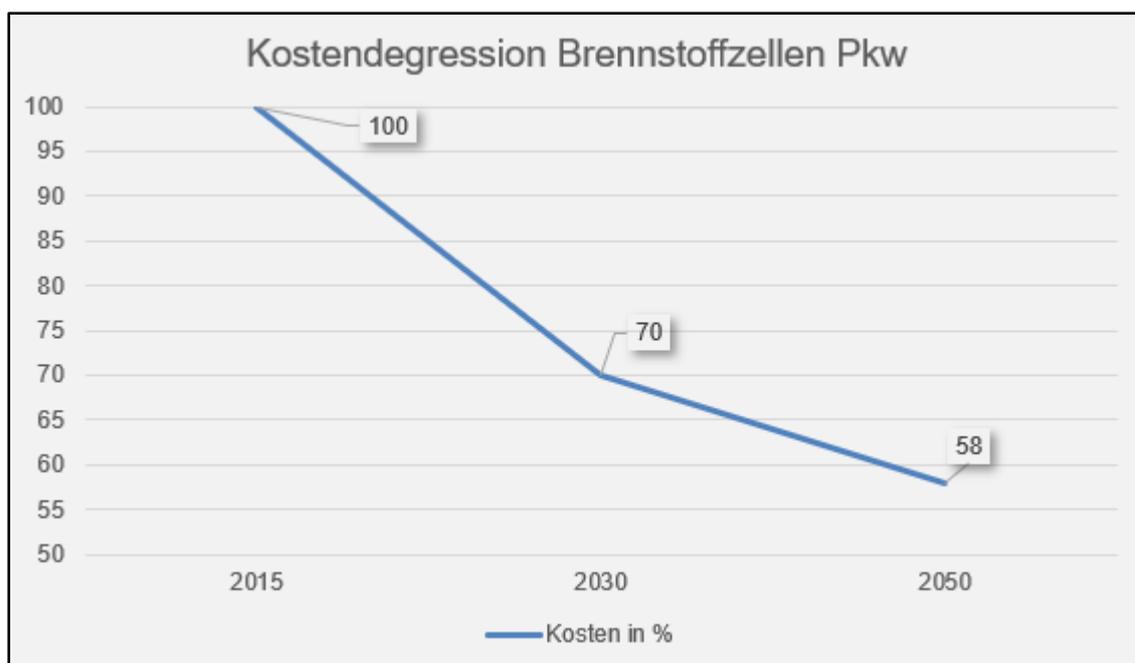


Abbildung 33: Kostendegression von H₂-Pkw in Prozent.¹⁴³

Zusammenfassend lassen sich für die Unterforschungsfrage 1 folgende Erkenntnisse erzielen: Die Technologie der Brennstoffzelle ist marktreif. Für eine Marktdurchdringung ist eine Investitionskostenförderung die sinnvollste Maßnahme. Durch eine Erhöhung der Stückzahlen lässt sich eine Kostendegression bei der Produktion erzielen und damit die Wettbewerbsfähigkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen erreichen. Im Folgenden wird aufgezeigt werden, dass komplementär zu dieser Entwicklung Anstrengungen in der Produktion und Bereitstellung des

¹⁴¹ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 11–12.

¹⁴² Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 73.

¹⁴³ Eigene Darstellung. Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b.

grünen Wasserstoffs notwendig sein werden, um die prognostizierten Stückzahlen zu erreichen.

6.3.2 Unterforschungsfrage 2

In welchem Umfang müsste grüner Wasserstoff in Deutschland zur Verfügung stehen, um diese Anwendungen zu bedienen?

Aus den prognostizierten Stückzahlen von Unterforschungsfrage 1 ergeben sich die entsprechenden Bedarfe an grünem Wasserstoff für die Betankung der Brennstoffzellenfahrzeuge. Für 2050 geht der Gutachterbericht der dena-Leitstudie von 92-120 TWh aus.¹⁴⁴ Zum Vergleich: Gemäß der nationalen Wasserstoffstrategie soll die Elektrolysekapazität in Deutschland bis 2030 auf eine Leistung von 5 GW ausgebaut werden, was einer Wasserstoffproduktion von 14 TWh entspricht.¹⁴⁵ Wenn wir vom Mittelpunkt der Bandbreite für das Jahr 2050 ausgehen (100 TWh) bedeutet das, dass bis zum Jahr 2050 sieben Mal so viel Elektrolysekapazität im Vergleich zu der für das Jahr 2030 geplanten Kapazität aufgebaut werden muss. Die weiteren Abschnitte werden zeigen, dass, um diese Bedarfe an grünem Wasserstoff zu decken, erhebliche Anstrengungen in der industriellen Produktion von Wasserstoff, beim Ausbau der erneuerbaren Energien, dem Setzen der politischen Rahmenbedingungen und zusätzlich auch ein Import von grünem Wasserstoff notwendig werden wird. Wie in Abbildung 31 gezeigt, ist der Anteil an grünem Wasserstoff im Wasserstoffmix aktuell gering und der Anteil an grünem Wasserstoff aus dem Elektrolyseverfahren im speziellen sehr gering. Die derzeit vorhandenen Kapazitäten von 10 MW¹⁴⁶ für synthetische Energieträger aus Strom bedürfen weiterhin eines starken Ausbaus.

Eine zweite Quelle für den zukünftigen Wasserstoffbedarf in Deutschland stellt das Fraunhofer Institut in einer eigenen Studie zur Verfügung. Zusätzlich zu dem oben erwähnten, auf den Pkw-Sektor bezogenen Bedarf wird hier auch der Schwerlastverkehr mitberücksichtigt.

¹⁴⁴ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 11–12.

¹⁴⁵ Vgl. Bundesregierung (2020), Nationale Wasserstoffstrategie, S. 5.

¹⁴⁶ Bründlinger, Thomas, et al. "dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050." Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), ewi Energy Research & Scenarios gGmbH: Berlin/Köln, Germany (2018), Teil B Gutachterbericht, S. 30.

Die folgende Abbildung 34, fasst noch einmal die Bedarfe für Pkw nach den Leitstudie und der Fraunhofer Studie wie oben beschrieben und zitiert, sowie für den Lkw-Sektor nach der Fraunhofer-Studie zusammen.¹⁴⁷ Zum Vergleich wird die geplante Elektrolysekapazität der Bundesregierung, wie sie in der nationalen Wasserstoffstrategie vorgestellt wurde, mit aufgenommen. Interessant ist dass, wenn zwei Drittel der Kapazität für den Verkehrssektor verwendet würde die geplanten Kapazitäten an grünem Wasserstoff für den Verkehrssektor im Jahr 2030 ausreichend wären. Man sieht jedoch auch die Notwendigkeit, in den Folgejahren bis 2050 den Ausbau überproportional zu steigern.

Fahrzeugklassen (nach Fraunhofer)	Wasserstoff Bedarf Deutschland 2030	Wasserstoff Bedarf Deutschland 2050
Pkw	1 – 7 TWh (Ø 3 TWh)	70 – 130 TWh (Ø 80 TWh)
Lkw	0 – 2 TWh (Ø 1 TWh)	130 – 160 TWh (Ø 140 TWh)
Gesamt	1 – 9 TWh (Ø 4 TWh)	200 – 290 TWh (Ø 220 TWh)
Fahrzeugklasse (nach dena Leitstudie)		
Pkw	n/a	92-120 TWh
Vergleich Kapazitäten Planung		
	Bis 2030	Bis 2035-2040
Geplante Elektrolyse- kapazität Bundesre- gierung (Nationale Wasser- stoffstrategie)	14 TWh	28 TWh

Abbildung 34: Bedarf- und Kapazitätsprognosen für grünen Wasserstoff in Terawattstunden.¹⁴⁸

¹⁴⁷ C. Hebling et al. (2019) Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, S. 27.

¹⁴⁸ Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft e.V., 2020.; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a; Bründlinger und et. al, 2018a.

6.3.3 Unterforschungsfrage 3

Wie könnte die Herstellung von grünem Wasserstoff im industriellen Maßstab aussehen?

Die bisherige Diskussion zeigt, dass es einen konsequenten industriellen Ausbau der Produktion von grünem Wasserstoff braucht, um die zukünftigen Bedarfe zu decken. Die dena-Leitstudie geht für 2050 von einer Produktion synthetischer Kraftstoffe im Elektrolyseverfahren auf Basis erneuerbarer Energien von 130 – 164 TWh aus.¹⁴⁹ Anzumerken ist, dass diese Prognose von einer Verwendung des Wasserstoffs bzw. der aus dem Wasserstoff generierten synthetischen Kraftstoffe im Verkehrs- *und* Industriesektor ausgegangen wird. Selbst wenn man die komplette Produktion für den Verkehrssektor im Jahr 2050 verwenden würde, würde es entsprechend der prognostizierten Bedarfe der dena-Leitstudie und der Fraunhofer-Studie gerade für den Pkw-Verkehr reichen. Der Schwerlastverkehr wäre mit dieser Produktion nicht zusätzlich zu versorgen (siehe Abbildung 34).

Wie schon bei der Skalierung der Fahrzeuge mit Brennstoffzelle gezeigt wurde, ist auch bei der Produktion von grünem Wasserstoff in industriellem Maßstab die Technologie nur ein Faktor. Wichtig für eine großflächige Produktion von grünem Wasserstoff sind vor allem effektive staatliche Rahmenbedingungen. So sollte insbesondere die Verwendung von grünem Wasserstoff für die Erreichung von sektorspezifischen CO₂-Quoten auch in Vorprozessen positiv berücksichtigt werden. Dies wird als ein wesentlicher Anreiz für die Produktion von grünem Wasserstoff gesehen, da hierdurch seine Attraktivität in der Verwendung und damit dessen *Nachfrage* gesteigert werden kann.¹⁵⁰

Aber auch *angebotsseitig* spielen bei der Produktion des grünen Wasserstoffs selbst staatliche Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit und damit für eine relevante Marktdurchdringung. Ein wesentlicher Kostenfaktor beim Betrieb von Elektrolyseanlagen für die Produktion von Wasserstoff sind die Stromkosten. Paradoxerweise führt hier eine staatliche Re-

¹⁴⁹ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 240.

¹⁵⁰ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 31.

gulation, nämlich die EEG-Umlage, die eingeführt wurde, um den Ausbau erneuerbarer Energien durch garantierte Erlöse für beispielsweise Betreiber von Windkraftanlagen anzureizen dazu, dass der Strom teurer wird und damit auch der Betrieb der Elektrolyseanlagen. Dass dies ein ungewünschter negativer Nebeneffekt ist wurde bereits vom nationalen Wasserstoffrat in seiner Stellungnahme vom 12.10.2020 erkannt und die Abschaffung der EEG-Umlage für den Betrieb von Elektrolyseanlagen gefordert.¹⁵¹ Die Abschaffung wurde entsprechend am 02.12.2020 vom Bundeskabinett in ordentlicher Sitzung beschlossen.¹⁵²

Diese beiden Beispiele zeigen die Relevanz staatlicher Anreize durch das geschickte Setzen von Rahmenbedingungen und die Gestaltung des Abgabensystems für eine industrielle Produktion von grünem Wasserstoff. Die Befreiung von Umlagen ist ein wesentlicher Faktor, damit der im Elektrolyseverfahren gewonnene grüne Wasserstoff wettbewerbsfähig wird. Ein weiterer wichtiger Faktor sind wie bei der Herstellung von Brennstoffzellen-Pkws die positiven Skaleneffekte, also eine Kostendegression durch eine hohe Stückzahl an Elektrolyseanlagen. Ein positiv verstärkender Faktor können hier Wasserstoffanwendungen in der Industrie werden.¹⁵³ Wenn in diesem Sektor der Bedarf an grünem Wasserstoff ebenfalls steigt wird dies eine größere, industrielle und damit effizientere, kostengünstigere Produktion von grünem Wasserstoff befördern. Auch die NOW GmbH kommt in einer eigenen Studie zu der Einschätzung, dass nur mit entsprechenden Bedarfen aus der Industrie eine ausreichend große Produktion von grünem Wasserstoff möglich ist, um diese Kostendegressionseffekte nutzen zu können und damit eine effiziente und kostengünstige Produktion von grünem Wasserstoff zu ermöglichen. Konkret geht sie von einer notwendig planbaren Elektrolyseleistung von 20-50 MW pro Jahr und Hersteller aus.¹⁵⁴

¹⁵¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a.

¹⁵² Vgl. Börse Stuttgart, 2020.

¹⁵³ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 46.

¹⁵⁴ Vgl. Smolinka et al., 2018, S. 36.

Eine genaue Kostenabschätzung für die industrielle Produktion von grünem Wasserstoff im Speziellen ist wie für allgemeine Investitionen in der Industrie mit der dena-Leitstudie nicht zu leisten.¹⁵⁵

Fazit dieses Abschnittes ist, dass insbesondere Maßnahmen im Bereich Abgaben auf Strom und Schaffung von Nachfrage die Schlüsselemente sind, um eine industrielle Produktion von grünem Wasserstoff in Deutschland zu realisieren. Förderungen zur Marktaktivierung sind demnach Förderungen im Bereich Forschung und Entwicklung vorzuziehen.

Abbildung 35 aus der Studie der NOW-GmbH veranschaulicht den erforderlichen Zubau an Elektrolyseleistung grafisch.

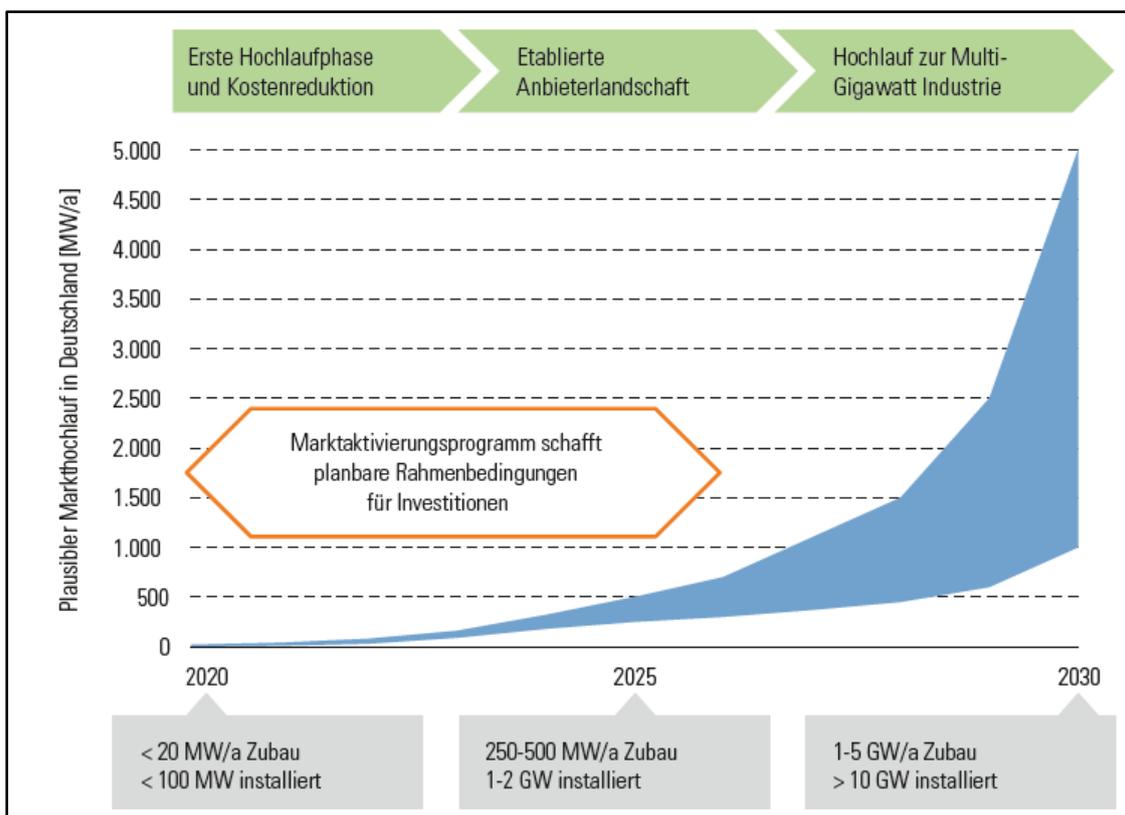


Abbildung 35: Markthochlauf für die industrielle Produktion von H₂.¹⁵⁶

¹⁵⁵ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 15.

¹⁵⁶ Smolinka et al., 2018, S. 32.

6.3.4 Unterforschungsfrage 4

Welche Entwicklungen im Rahmen der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland müssten vorangetrieben werden?

Die Entwicklungen im Rahmen der erneuerbaren Stromerzeugung entscheiden über den Erfolg der Energiewende als Ganzes und über den erfolgreichen Einsatz von grünem Wasserstoff im Straßenverkehr im Speziellen. Es liegt auf der Hand, dass, wenn neben dem Bedarf an grünem Strom für die übrigen Sektoren ein zusätzlicher Bedarf durch den Einsatz von grünem Wasserstoff im Straßenverkehrssektor hinzukommt, erhebliche Anstrengungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien geleistet werden müssen, um diese Bedarfe zu decken. In Unterforschungsfrage 5 wird erläutert werden, dass Deutschland auch im Jahr 2050 trotz ausgebauter Kapazitäten in den erneuerbaren Energien auf Energieimporte aus dem Ausland angewiesen sein wird.

Das Ausbaupotenzial der beiden erneuerbaren Energieträger Wasserkraft und Biomasse ist gemäß dena-Leitstudie sehr eingeschränkt.¹⁵⁷ Wichtige Impulse zum Ausbau müssen also bei der Windkraft und der Photovoltaik erfolgen. Bei Windkraftanlagen an Land („Onshore-Wind“) rechnet die dena-Leitstudie mit einem Nettozubau von 3,7 – 4,0 GW pro Jahr im Zeitraum 2015 - 2050. Für die Photovoltaik geht sie von einer Entwicklung von 2,2 – 3,6 GW pro Jahr für denselben Zeitraum aus. Für Windkraftanlagen auf dem Meer („Offshore-Wind“) geht die dena-Leitstudie lediglich von einem Ausbau auf 15 GW bis zum Jahr 2030 aus.

Ein entscheidender Faktor für die Entwicklung der erneuerbaren Energien ist die Überzeugung lokaler Bürger, damit geplante Windkraftanlagen auch tatsächlich realisiert werden können. Auch hier zeigt sich, dass es neben der technologischen Komponente wesentliche weitere Faktoren wie das Einbinden der Zivilgesellschaft zu beachten gilt. Nur wenn hier eine breite Akzeptanz auch auf lokaler

¹⁵⁷ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 27.

Ebene hergestellt werden kann, ist es möglich, Windkraftanlagen in ausreichender Menge zu errichten. Folgende Abbildung 36 bildet den prognostizierten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland für das Szenario 1 ab.¹⁵⁸

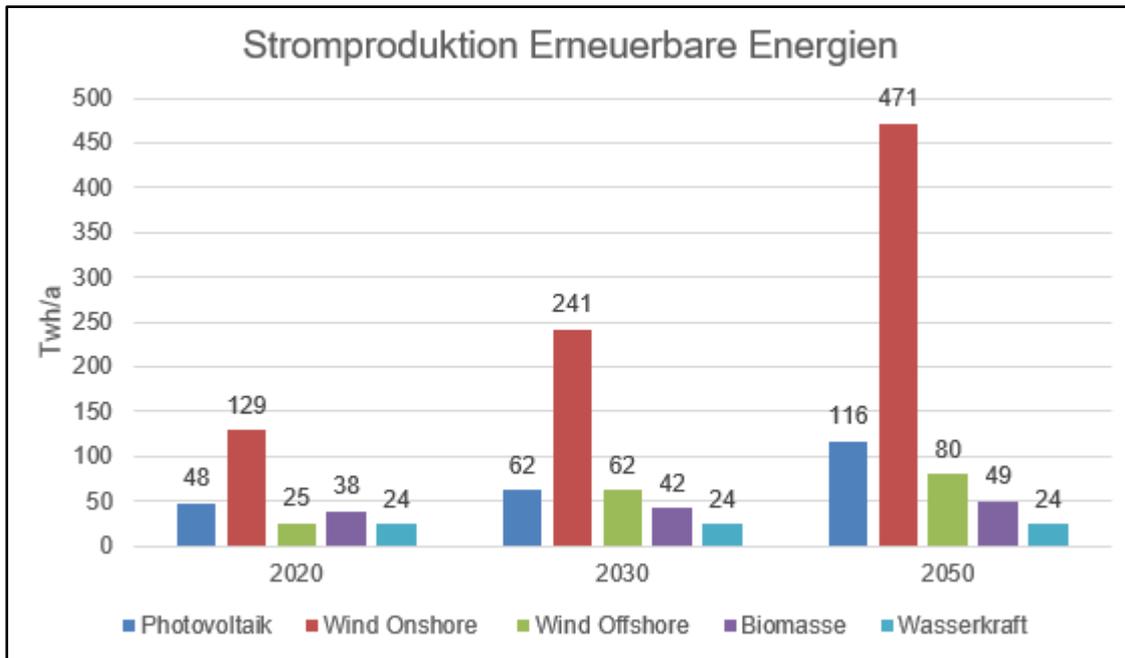


Abbildung 36: Erzeugung Erneuerbare Energien.¹⁵⁹

Es wird deutlich wie entscheidend die Verfügbarkeit von geeigneten Standplätzen (Onshore), also der Windkraftanlagen an Land ist. Dies hat auch die Bundesregierung erkannt und entsprechende Maßnahmen in dem vom BMWi vorgelegten "Aktionsprogramm zur Stärkung der Windenergie an Land" umgesetzt. Wichtige Maßnahmen, die zum Sommer 2020 umgesetzt wurden, waren unter anderem eine "Bund-Länder-Vereinbarung zum Abbau von Genehmigungshemmnissen" sowie die Veröffentlichung der Abstandsregelungen für Windkraftanlagen im Gebäudeenergiegesetz. Eine weitere wichtige Maßnahme ist die stärkere finanzielle Beteiligung der Kommunen und Bürger beim Ausbau der Windkraftanlagen.¹⁶⁰ Nur wenn diese und andere Maßnahmen erfolgreich sind ist es möglich, die benötigten großen Kapazitäten zur Energieerzeugung an Land aufzubauen.

¹⁵⁸ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 279.

¹⁵⁹ Eigene Darstellung. Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a.

¹⁶⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020b.

Durch den massiven Ausbau der erneuerbaren Energien kommt es zu stärkeren Schwankungen in der Stromproduktion. Dies erfordert parallel zum Ausbau der erneuerbaren Energien zusätzlich ausgleichende Maßnahmen, um bei einer sogenannten Dunkelflaute, also bei wenig verfügbarem Licht und Wind, eine ausreichende Energieversorgung sicherzustellen. Dieser Umstand spricht für die Produktion von grünem Wasserstoff, seiner Verwendung als Energieträger und damit auch seinem Einsatz im Straßenverkehr.

Das hängt damit zusammen, dass in Zeiten von Überschusskapazitäten nicht genutzte Energie direkt für die Elektrolyse von Wasserstoff verwendet werden kann und damit gespeichert werden kann. Wasserstoff wirkt damit wie ein Puffer, der die natürlichen Schwankungen bei der Stromproduktion ausgleichen kann. Die Energieversorgung kann damit verstetigt werden. In diesem Sinne ist der Einsatz von grünem Wasserstoff nicht nur für den Verkehrssektor an sich positiv, sondern hat zusätzlich den positiven ausgleichenden Effekt für alle anderen Sektoren in denen Energie benötigt wird. Deswegen sollten Entwicklungen in den erneuerbaren Energien immer zusammen mit der Produktion von grünem Wasserstoff gedacht werden, da er das System insgesamt stabiler macht.

6.3.5 Unterforschungsfrage 5

Inwiefern könnte der Import von grünem Wasserstoff nötig werden?

Auch in Zukunft wird Deutschland trotz des massiven Ausbaus der erneuerbaren Energien im Land auf Energieimporte aus dem Ausland angewiesen sein. Dies schließt auch den Import von grünem Wasserstoff mit ein.

Dies hat auch die Bundesregierung in ihrer nationalen Wasserstoffstrategie adressiert. So sollen "internationale Kooperationen und Partnerschaften" in Zusammenhang mit grünem Wasserstoff entwickelt werden.¹⁶¹ Dazu zählt die verstärkte Kooperation auf EU-Ebene und die Energiepartnerschaften mit Drittstaaten. Deutsche Technologie kann in diese Partnerländer exportiert werden und vor Ort die Produktion von grünem Wasserstoff ermöglichen, der in Deutschland ge-

¹⁶¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a, S. 27.

braucht wird. Für die Partnerländer wiederum eröffnen sich so Chancen zum Aufbau neuer Wertschöpfungsketten. Aktive Entwicklungshilfe und Verbreitung deutscher Technologie ist somit eine wesentliche Maßnahme, um die Energieimporte Deutschlands in der Zukunft sicher zu stellen und gleichzeitig in den Partnerländern nachhaltige Exportmöglichkeiten zu schaffen. Dies verdeutlicht den "Win-Win"-Effekt und die positiven Zusatzeffekte eines internationalen Handels mit grünem Wasserstoff.

Auch die dena-Leitstudie geht für das Jahr 2050 von einem großen Bedarf an Importen aus Nordafrika aus.¹⁶² Strategisch und wissenschaftlich wird somit eine Energieautarkie Deutschlands auch mit ausgebauten erneuerbaren Energien nicht als sinnvolles Ziel angesehen. Deutschland wird auch in der Zukunft ein Energieimporteur bleiben.

6.3.6 Unterforschungsfrage 6

Welche Infrastrukturen in Bezug auf den Transport von Wasserstoff wären notwendig?

Wie wir im Referenzszenario in *Kapitel 6.2* gesehen haben, ist der Status Quo des Wasserstofftransports in Deutschland im Jahr 2020 der Lkw. Dies wird auch mittelfristig so bleiben. Die Versorgung per Pipeline ist wie das Düsseldorfer Beispiel zeigt derzeit die Ausnahme. Allerdings wird, wenn Produktion, Import und Verbrauch von grünem Wasserstoff in dem diskutierten Umfang steigen sollen, die Versorgung per Pipeline auf lange Sicht notwendig werden.

Perspektivisch eröffnet sich die Chance, das bestehende Erdgasnetz für den Transport des grünen Wasserstoffs zu nutzen. Ein wesentlicher Vorteil ist offenkundig der geringe Bedarf an neuen Investitionen und das Wegfallen anderer Hürden für einen Ausbau von Netzen wie es sich beispielsweise beim Widerstand der Bevölkerung beim Ausbau von Stromtrassen zeigt.

Wie die H2 Mobility für den Betrieb von Tankstellen hat sich für den Aufbau eines Wasserstoffnetzes in Deutschland eine Kooperation aus verschiedenen Unter-

¹⁶² Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 45.

nehmen mit Projektpartnern wie Fernleitungsnetzbetreibern, Erdgasnetzbetreibern, Mineralölkonzernen und der chemischen Industrie zu einer Initiative zusammengeschlossen, der GET H2.¹⁶³

Ziel der Initiative ist wie oben beschrieben, der Aufbau eines deutschlandweiten Wasserstoffnetzes auf Basis bestehender Erdgasnetze. Auch in diesem Aspekt einer Wasserstoffwirtschaft zeigt sich der große Einfluss des regulatorischen Rahmens für eine erfolgreiche Umsetzung. So ist für eine Einspeisung des Wasserstoffs in das bestehende Erdgasnetz eine Reformierung der einschlägigen Regulierungen erforderlich. Dazu zählt insbesondere das Energiewirtschaftsgesetz („EnWG“). Dieses erlaubt den Netzbetreibern derzeit keine Einspeisung reinen Wasserstoffs in die Erdgasnetze.¹⁶⁴ Konkret ist also vom Gesetzgeber eine Zugangs- und Entgeltregulierung für den Transport von Wasserstoff zu schaffen. Nur wenn diese regulatorischen Rahmenbedingungen erfüllt sind herrscht die Investitions- und Planungssicherheit, die die Etablierung eines deutschlandweiten Wasserstoffnetzes ermöglicht.

Die Vision der Initiative ist das deutschlandweite Netz wie in der folgenden Abbildung 37 dargestellt. Eine flächendeckende Infrastruktur für den Transport von grünem Wasserstoff in Deutschland lässt sich also vergleichsweise effizient organisieren. Wichtig ist, dass der Gesetzgeber auch in diesem Punkt wie auch bei der Regulierung der Wasserstoffproduktion die notwendigen Voraussetzungen schafft. Auch die dena-Leitstudie befürwortet eine Anpassung der Regulierungen, um den Umbau der bestehenden Gasnetze für den Wasserstofftransport zu ermöglichen.¹⁶⁵

¹⁶³ Vgl. Die Initiative – GET H2, 2020a.

¹⁶⁴ Vgl. Die Initiative – GET H2, 2020b.

¹⁶⁵ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 37.

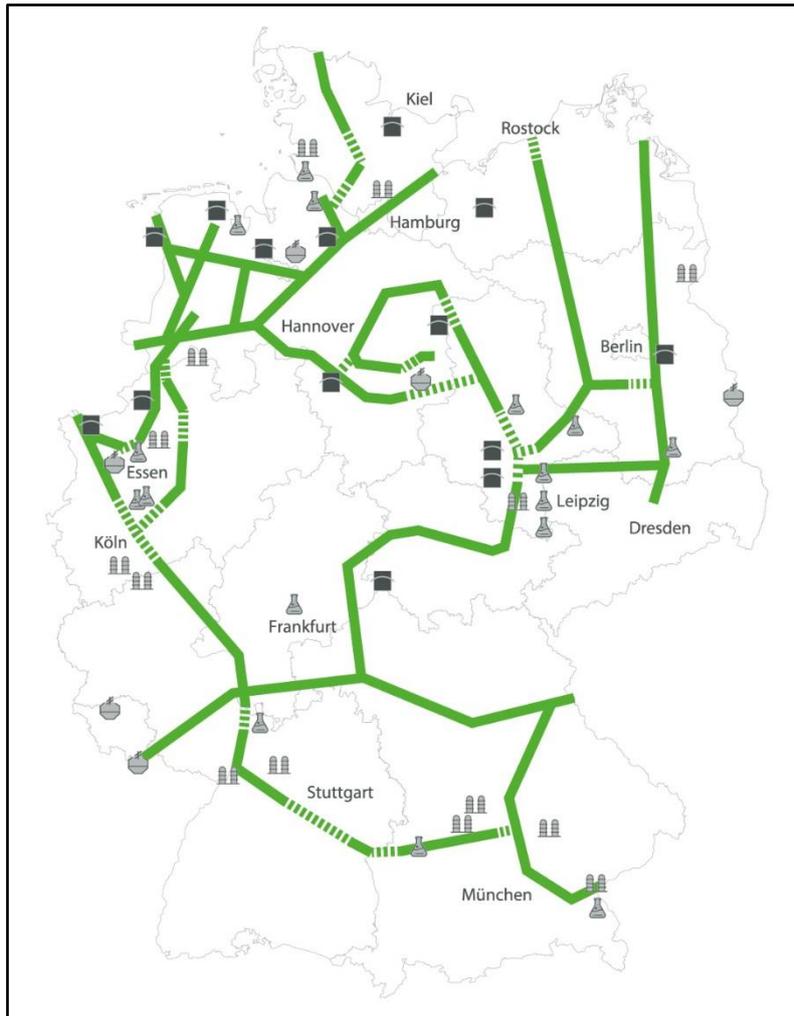


Abbildung 37: Vision eines Wasserstoffnetzes.¹⁶⁶

Der Vorteil bestehende Netze zu nutzen verdeutlicht auch der Exkurs der dena-Leitstudie zu batterieelektrisch betriebenen sogenannten Oberleitungs-Hybrid LKWs.¹⁶⁷ Hierfür wäre ein enormer Investitionsumfang für den Aufbau von flächendeckenden Oberleitungen zu leisten. Beim Aufbau eines solchen zweiten Netzes entstünde somit ein sehr großer weiterer Fixkostenblock, für dessen Instandhaltung laufende Folgekosten anfallen würden.

¹⁶⁶ Vgl. FNB Gas e.V., 2020.

¹⁶⁷ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 41–42.

Dieses Gedankenexperiment unterstreicht den Effizienzvorteil der Nutzung und Umwidmung bestehender Transportsysteme für die Weiterleitung von grünem Wasserstoff und damit dessen Nutzung auch im Schwerlastverkehr.¹⁶⁸

6.3.7 Unterforschungsfrage 7

Welches Treibhausgasminderungspotenzial ergibt sich aus der Nutzung des grünen Wasserstoffs im Straßenverkehr und wie kann es ermittelt werden?

Um das Treibhausgasminderungspotenzial des Einsatzes von grünem Wasserstoff zu bestimmen sind zunächst einige vereinfachende Annahmen zu treffen. Für dieses Gedankenexperiment wird die Methode der abnehmenden Abstraktion angewandt, d.h. zunächst wird sich dem Sachverhalt abstrakt und einfach angenähert, um die Grundproblematik zu verstehen und dann werden die Annahmen aufgeweicht werden, um so realistischer zu werden.

- **Annahme 1:** Der verwendete Wasserstoff ist 100% grün, d.h. die Nutzung ist komplett CO₂-frei.
- **Annahme 2:** Der Pkw und Lkw Bestand im Jahr 2050 entspricht dem von 2020.
- **Annahme 3:** Vereinfachend nehmen wir den gleichen Anteil an Brennstoffzellenfahrzeugen für den Pkw- und den Lkw-Bereich an.

Der prognostizierte Bestand an Brennstoffzellenfahrzeugen für das Jahr 2050 beträgt gemäß der Prognose der dena-Leitstudie 12,1 Millionen Pkws¹⁶⁹, was einem Anteil von 26% bei einem Pkw Gesamtbestand von 47 Millionen Fahrzeugen¹⁷⁰ entspricht. Wichtig ist hierbei, dass dieser Anteil sowohl für Szenario 1 als auch Szenario 2 gilt, d.h. in der dena-Leitstudie ändert sich das Treibhausgasminderungspotenzial des Verkehrssektors zwischen dem 80% und dem 95% Szenario *nicht*, sondern die zusätzliche Einsparung an CO₂ wird über die anderen Sektoren abgedeckt.

¹⁶⁸ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018a, S. 41–42.

¹⁶⁹ Vgl. Bründlinger und et. al, 2018b, S. 12.

¹⁷⁰ Vgl. Abschnitt 3.2 für den Pkw Bestand in Deutschland im Jahr 2020.

Annahmegemäß entspricht auch der Anteil der anderen Fahrzeugklassen und damit auch der Lkw, die mit Brennstoffzelle fahren ebenfalls 26%. Da im Jahr 2020 der Anteil an CO₂-freien Fahrzeugen marginal gering ist unterstelle ich vereinfachend, dass sich der Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge (BZF) eins zu eins in eine CO₂ Reduktion überträgt, dass also keines der (grünen) batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge des Jahres 2020 durch ein Brennstoffzellenfahrzeug ersetzt wird. Die aktuellsten Daten für die CO₂-Emissionen des deutschen Straßenverkehrssektors sind aus dem Jahre 2018. Wie in Abbildung 26 dargestellt beträgt dieser Ausstoß in 2018 162 Millionen Tonnen CO₂.

Damit ergibt sich rechnerisch ein Treibhausgasminderungspotenzial (THGMP) für das Jahr 2050 durch den Einsatz von grünem Wasserstoff im Verkehrssektor von:

$$THGMP = CO_2\text{-Emission absolut (2018)} * \text{Anteil BFZ}$$

$$THGMP = 162 \text{ Mt CO}_2 * 0,26 = 42,12 \text{ Mt CO}_2$$

Das Treibhausgasminderungspotenzial beträgt also 42,12 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr für das Jahr 2050 unter den getroffenen Annahmen und dem gemäß dena-Leitstudie prognostizierten Anteil an Brennstoffzellenfahrzeugen. Das gesamte Emissionsvolumen in 2018 betrug 704 Mt CO₂. Das errechnete Treibhausgasminderungspotenzial durch den Einsatz von grünem Wasserstoff im Straßenverkehr könnte also ca. 17% der Gesamtemissionen des Jahres 2018 für Deutschland reduzieren.

Die errechnete Menge hängt davon ab in wie weit die getroffenen Annahmen eintreten. Würde etwa der Anteil der BZF für den Schwerlastverkehr höher ausfallen als der Anteil im Pkw Bereich, könnte auch ein höheres THGMP realisierbar sein. Gleiches gilt für die Wasserstoffherkunft, falls nicht die gesamte Produktion grün erfolgt, reduziert sich das THGMP entsprechend. Eine weitere Einflussgröße ist der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge. Würde dieser höher ausfallen, so wäre der Anteil des THGMP, das durch die BZF erzielt wird, geringer und der durch die batterieelektrischen Fahrzeuge, vorausgesetzt der Strom ist grün, entsprechend höher.

Nichtsdestotrotz lässt sich mit der Rechnung zeigen, dass für die Energiewende als Ganzes der Beitrag von Wasserstoffnutzung im Straßenverkehr mit potenziell 17% Reduktionspotenzial einen wesentlichen Beitrag leisten kann.

6.4 Szenario 2 – Optimistischer Entwicklungspfad

Wie eingangs beschrieben, orientiert sich das konservative Szenario 1 am 80%-Szenario der dena-Leitstudie. Eine quantitative Aussage kann nur bedingt und, wie wir in Unterforschungsfrage 7 gesehen haben, teilweise nicht unterscheidbar für beide Szenarien getroffen werden, weil der prognostizierte Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge in der dena-Leitstudie für das 80% und das 95% Szenario gleich ist. Auf der qualitativen Ebene lässt sich festhalten, dass, wenn in allen Bereichen der diskutierten Unterforschungsfragen erhebliche Anstrengungen geleistet werden, potenziell auch ein höheres THGMP wie errechnet möglich ist. Wir nehmen dementsprechend an, dass das THGMP für das konservative Szenario gilt, für weitergehende Reduktionsziele wird keine quantitative Aussage getroffen.

6.5 Fazit Fallstudie

Was ist die Kernbotschaft der durchgeführten Fallstudie?

Wir haben im Rahmen des Einsatzes von grünem Wasserstoff im Straßenverkehr über die Technologie der Fahrzeuge, die Produktion des grünen Wasserstoffs, die benötigte Tank- und Transportinfrastruktur und auch die staatlichen Rahmenbedingungen gesprochen. Es wird deutlich, dass sowohl bei den Fahrzeugen als auch bei der Produktion via Elektrolyse und sogar bei der Transportinfrastruktur via Pipeline die Technologie marktreif ist. Wichtig ist und so wird es auch in der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung adressiert, der konsequente Markthochlauf der bestehenden Technologien. Um dies zu erreichen, sind insbesondere Investitionskostenförderungen aber auch eine sinnvolle Ausgestaltung der staatlichen Rahmenbedingungen entscheidend. Befreiung der EEG-Umlage für den Betrieb von Elektrolyseanlagen, Reformierung des EnWG für die Einspeisung des Wasserstoffs in das Erdgasnetz und weitere Regulierungen sind notwendig, damit sich die Wasserstofftechnologie im Markt etablieren

kann. Ein weiterer wichtiger Effekt ist die Kostendegression sowohl bei den Elektrolyseanlagen als auch bei der Produktion der Brennstoffzellenfahrzeuge. Dafür sind die genannten Investitionskostenförderungen das geeignete Mittel, weil sie die Marktdurchdringung in einen Bereich schieben kann, in dem sich die Technologie selbst trägt.

Damit sind die Kernbotschaften der Fallstudie die folgenden Punkte:

- Die Technologie bei der H₂-Produktion und den verwendeten Brennstoffzellenfahrzeugen ist grundsätzlich marktreif
→ Investitionskostenförderung statt Betriebskostenförderung
- Eine Marktdurchdringung der Technologie (Elektrolyse und Brennstoffzelle) verstärkt positiv die Kostendegression und damit wiederum wechselseitig die Marktdurchdringung
→ Stichwort Investitionskostenförderung
- Regulierungen des Erdgasnetzes und der Stromabgaben spielen eine wichtige Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffwirtschaft

7 Zusammenfassung und Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit recherchierten und analysierten Daten haben gezeigt, dass die Dekarbonisierung des Verkehrssektors der Schlüssel zur Erfüllung nationaler sowie internationaler Emissionsreduktionsziele ist. Besonders der Straßenverkehrssektor spielt hierbei eine zentrale Rolle. Da die Reduktion von Treibhausgasemissionen nur sektorübergreifend gelingen kann, kommt grünem Wasserstoff in einem grünen Energiesystem eine besondere Bedeutung zu.

Damit grüner Wasserstoff als zukünftiger Energieträger im deutschen Straßenverkehr sein Potential zur Minderung von Treibhausgasemissionen heben kann, werden in den zukünftigen Jahren und Jahrzehnten große Kraftanstrengungen notwendig sein. Die erarbeiteten Daten haben gezeigt, dass die technologischen Voraussetzungen dafür größtenteils vorhanden sind. Besonders deutsche Unternehmen haben vielfältiges Knowhow im Bereich der Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren. Darüber hinaus verfügen deutsche Unternehmen über die maschinenbaulichen und verfahrenstechnischen Voraussetzungen, zur Realisierung von Anwendungen in größeren Skalen. Neben der Weiterentwicklung der Technologien wird der Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur für Wasserstoff elementar sein. Die Weiterführung und der Ausbau zielgerichteter Investitions- und Förderprogramme ist in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Für den Erfolg von wasserstoffbetriebenen Straßenfahrzeugen ist die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zentral. Bei zunehmendem Ausbau von Elektrolysekapazitäten werden unterschiedliche Sektoren um dessen Anwendung konkurrieren (Straßenverkehr, Flugverkehr, Stahlindustrie usw.). Der beherzte Ausbau von erneuerbaren Energien und der Aufbau von Importstrukturen für erneuerbare Energieträger wird daher unerlässlich sein.

8 Literatur

- ADAC, 2019. *So viele Tankstellen gibt es in Deutschland* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>
- ADOLF ET AL., 2007. *Shell Wasserstoffstudie: Energie der Zukunft. Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2* [online]. Hamburg [Zugriff am: 6. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf
- AMMOSE, H. und M. HOPPE, 2006. *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften. Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens* [online] [Zugriff am: 11. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivw/ressourcen/dateien/diskuss/2006_2_diskussbtr_iwv.pdf?lang=de
- BAUMGARTH, C., M. EISEND und H. EVANSCHITZKY, Hg., 2009. *Empirische Mastertechniken. Eine anwendungsorientierte Einführung für die Marketing- und Managementforschung* [online]. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-8349-1572-6. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8278-0>
- BEHR, A., D.W. AGAR, J. JÖRISSEN und A.J. VORHOLT, 2016. *Einführung in die Technische Chemie. 2. Auflage*. Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662528556.
- BEITZ, W. und K.-H. KÜTTNER, Hg., 1981. *Taschenbuch für den Maschinenbau* [online]. 14., vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Dubbel. ISBN 978-3-662-29710-0. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-29710-0>
- BÖRSE STUTTGART, 2020. *Kabinett billigt EEG-Befreiung für grünen Wasserstoff* [online] [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.boerse-stuttgart.de/de-de/nachrichten/uebersicht/dow-jones-news/2020/12/2/kabinett-billigt-eeg-befreiung-fuer-gruenen-wasserstoff/>
- BRÜCKNER, H., 1952. *Gastafeln*. Berlin, Boston: de Gruyter. ISBN 9783486778939.
- BRÜNDLINGER, T. und ET. AL, 2018a. *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena)*. Berlin.
- BRÜNDLINGER, T. und ET. AL, 2018b. *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH)*. Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2020. *Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre* [online] [Zugriff am: 17. April 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT, 2016. *Klimaschutzplan 2050* [online]. *Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung* [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT, 2017a. *Der Klimaschutzplan 2050* [online]. *Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie* [Zugriff am: 18. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT, 2017b. *Die Klimakonferenz in Paris* [online] [Zugriff am: 18. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/#c8535>

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT, 2019. *Klimaschutz in Zahlen* [online]. *Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik* [Zugriff am: 20. März 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2016. *Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 - 2026 – von der Marktvorbereitung zu wettbewerbsfähigen Produkten* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/nip-regierungsprogramm.pdf?__blob=publicationFile

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2018. *Energie auf neuen Wegen* [online]. *Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung* [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/energie-auf-neuen-wegen.pdf?__blob=publicationFile

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019. *Verkehr in Zahlen* [online] [Zugriff am: 22. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-xls.html>

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2019. *Dialogprozess Gas 2030* [online]. *Erste Bilanz* [Zugriff am: 17. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/dialogprozess-gas-2030-erste-bilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2019a. *Energiedaten* [online]. *Gesamtausgabe* [Zugriff am: 20. März 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=40

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2019b. *Zahlen und Fakten Energiedaten* [online]. *Nationale und Internationale Entwicklung* [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.html>

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2020a. *EEG-Stellungnahme Nationaler Wasserstoffrat* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/eeg-stellungnahme-nationaler-wasserstoffrat.html>

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2020b. *Umsetzungsstand Aktionsprogramm Wind an Land vorgelegt – 12 von 18 Maßnahmen auf das Gleis gesetzt* [online] [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: [Umsetzungsstand Aktionsprogramm Wind an Land vorgelegt – 12 von 18 Maßnahmen auf das Gleis gesetzt](#)

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2020c. *Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende* [online] [Zugriff am: 2. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, Hg., 2019c. *Dialogprozess Gas 2030. Erste Bilanz* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/dialogprozess-gas-2030-erste-bilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, Hg., 2020a. *Die Nationale Wasserstoffstrategie* [online] [Zugriff am: 17. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=14

CHEMIE.DE, 2020. *Energiedichte* [online] [Zugriff am: 3. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Energiedichte.html>

CHMIELEWICZ, K., 1994. *Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaft*. 3., unveränd. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. Sammlung Poeschel. 92. ISBN 9783791091976.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, 2017. *HYDROSOL_Plant: Wasserstoff aus Sonnenlicht* [online]. *Forscherguppe stellt aktuell größte Testanlage zur solarthermischen Wasserspaltung vor*. 10. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2017/20171129_hydrosol-plant-wasserstoff-aus-sonnenlicht_25217.html

DIE INITIATIVE – GET H2, 2020a. *Get H2* [online] [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.get-h2.de/>

DIE INITIATIVE – GET H2, 2020b. *Get H2* [online] [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.get-h2.de/forderungen/>

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 5485:1986-08, *Benennungsgrundsätze für physikalische Größen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 228:2017, *Kraftstoffe - Unverbleite Kraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren*: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 16. April 2020]. Verfügbar unter: <https://www.perinorm-com.thi.idm.oclc.org/document.aspx?hitnr=0&q=AC:DE30072638>

DOS SANTOS, D., 2019. *BioTechH2-Projekt erzeugt Wasserstoff aus Biomasse* [online]. 8. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.euwid-energie.de/biotech2-projekt-erzeugt-wasserstoff-aus-biomasse/>

EHRET, O., 2018. *Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: https://www.emobilserver.de/images/PDFs/NOW-wasserstoff-und-brennstoffzellen_dossier.pdf

E-MOBIL GMBH, Hg., 2012. *Energieträger der Zukunft. Potentiale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg* [online] [Zugriff am: 6. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Studien/Systemanalyse/Wasserstoff-Studie_2012.pdf

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019. *The European Green Deal* [online] [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf

FNB GAS E.V., 2020. *Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz (H2-Netz)* [online] [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/fernleitungsnetzbetreiber-veroeffentlichen-karte-fuer-visionaeres-wasserstoffnetz-h2-netz/>

FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE, Hg., 2004. *Wasserstoff und Brennstoffzellen. Energieforschung im Verbund* [online] [Zugriff am: 16. April 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004.pdf>

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH, 2018. *Reversible Brennstoffzelle bricht Wirkungsgrad-Rekord* [online] [Zugriff am: 2. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2018/2018-12-18-brennstoffzelle-wirkungsgrad-weltrekord.html>

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT E.V., 2020. *Kompetenz für das Wasserstoffzeitalter* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/ueber-fraunhofer/wissenschaftspolitik/Positionen/Kompetenzbrosch%C3%BCre_Kompetenzen%20f%C3%BCr%20das%20Wasserstoff-Zeitalter_Fraunhofer-Gesellschaft.pdf

GETOFF, N., 1977. *Wasserstoff als Energieträger. Herstellung, Lagerung, Transport*. Vienna: Springer Vienna. ISBN 9783709176955.

GÖBELBECKER, J., 2019. *Fahren die besseren E-Autos mit Brennstoffzelle?* [online]. Diskussion um alternative Antriebe. 6. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.produktion.de/trends-innovationen/fahren-die-besseren-e-autos-mit-brennstoffzelle-285.html>

H2 MOBILITY DEUTSCHLAND GMBH & CO. KG, 2020a. *H2 mobility* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://h2.live/>

H2 MOBILITY DEUTSCHLAND GMBH & CO. KG, 2020b. *Wasserstoffautos Alle Modelle im Überblick* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://h2.live/wasserstoffautos>

HOLLADAY, J.D., J. HU, D.L. KING und Y. WANG, 2009. An overview of hydrogen production technologies [online]. *Catalysis Today*, (4), 244-260. ISSN 09205861. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cattod.2008.08.039

HOLLEMAN, A.F., E. WIBERG und N. WIBERG, 1985. *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 91. - 100., verb. u. stark erw. Aufl. Berlin: de Gruyter. ISBN 3110075113.

IEA, 2019. *The Future of Hydrogen* [online] [Zugriff am: 28. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IN4CLIMATE.NRW GMBH, 2020. *REFHYNE* [online]. Verfügbar unter: <https://www.in4climate.nrw/best-practice/projekte/2019/refhyne/>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Hg., 2019. *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities* [online] [Zugriff am: 6. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

ITM POWER, 2020. *REFHYNE* [online]. *The REFHYNE project is at the forefront of the effort to supply Clean Refinery Hydrogen for Europe* [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.itm-power.com/refhyne>

KARLICZEK, A., 3. November 2019. Afrikanischer Wasserstoff ist der Stoff der Zukunft [online]. *Handelsblatt* [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-afrikanischer-wasserstoff-ist-der-stoff-der-zukunft/25179890.html?ticket=ST-328933-ig-PPsFGgLPTJVXRJcclZ-ap1>

KLELL, M., H. EICHLSEDER und A. TRATTNER, 2018. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658204464.

KOCH, M. und K. STRATMANN, 2019. Peter Altmaier: "Ich will, dass das Wasserstoffthema fliegt" [online]. *Handelsblatt* [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/wirtschaftsminister-im-interview-peter-altmaier-ich-will-dass-das-wasserstoff-thema-fliegt/25288368.html>

KÖHLER, U., 2014. *Einführung in die Verkehrsplanung. Grundlagen, Modellbildung, Verkehrsprognose, Verkehrsnetze*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 978-3816790419.

KOTHARI, R., D. BUDDHI und R.L. SAWHNEY, 2008. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods [online]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(2), 553-563. ISSN 13640321. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rser.2006.07.012

KRAFTFAHRT-BUNDESAMT, 2020. *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2020 nach Bundesländern und Fahrzeugklassen absolut* [online]. 13. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/fz_b_fzkl_aufb_archiv/2020/2020_b_fzkl_eckdaten_pkw_dusl.html?nn=2601598

LINDE GAS GMBH, 2013. *Rechnen Sie mit Wasserstoff* [online]. *Die Datentabelle*. 16. April 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.linde-gas.at/de/legacy/attachment?files=tcm:0550-169419;tcm:550-169419;tcm:50-169419>

MAHLER AGS GMBH, 2019. *Wasserstofferzeugung mittels Dampfreformierung (Mahler AGS GmbH)* [online] [Zugriff am: 6. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=JAPN13ECraQ>

MAHLER AGS GMBH, 2020. *Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff mittels Dampfreformierung* [online]. *HYDROFORM-C*. 6. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.mahler-ags.com/de/wasserstoff/hydroform-c/>

MAPIO.NET, 2020. *Kraftwerk am Großen Assuan Damm* [online] [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://mapio.net/pic/p-740905/>

MAUS, W., Hg., 2019. *Zukünftige Kraftstoffe. Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel* [online]. Berlin: Springer Berlin. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-662-58006-6. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>

MERCEDES BENZ, 2020. *Mercedes-Benz GLC F-CELL* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://h2.live/wasserstoffautos/mercedes-benz-glc-f-cell>

NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT, 2019. *Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor* [online]. *Arbeitsgruppe 1, Klimaschutz im Verkehr* [Zugriff am: 19. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>

NEUMANN, B., 2007. *Herstellung von Wasserstoff* [online] [Zugriff am: 6. Juli 2020]. Verfügbar unter: <file://eu.boehringer.com/users/bib/users1/millerfl/Documents/MA/Literatur/Uni%20HH%20Herstellung%20H2%20gute%20Bilder.pdf>

NITSCH, J., 2016. „Power to Gas“ - *Die Bedeutung speicherbarer Energieträger für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende* [online] [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2016/Folien/160316Energiewende.pdf

NOW GMBH, 2020. *Grafik Antriebskonzepte Pkw* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wissensfinder/?_sft_medium=infografik-bilder&_sft_sektor=mobilitaet&_sft_anwendungsbereich=pkW&_sft_tech_kraft=wasserstoff

PASCHOTTA, R., 2020. *Energiedichte* [online] [Zugriff am: 3. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/energiedichte.html>

PESCHKA, W., 1984. *Flüssiger Wasserstoff als Energieträger. Technologie und Anwendungen*. Vienna: Springer. Innovative Energietechnik. ISBN 9783709187494.

QUASCHNING, V., 2013. *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation*. 8. Auflage. München: Hanser. ISBN 9783446435261.

REIF, K., Hg., 2014. *Ottomotor-Management. Steuerung, Regelung und Überwachung*. 4., vollst. neubearb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Bosch Fachinformation Automobil. ISBN 9783834821027.

RUNDFUNK BERLIN-BRANDENBURG, 2020. *Erster Öffi-Bus wird auf Wasserstoffantrieb umgerüstet* [online] [Zugriff am: 2. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.rbb24.de/studiofrankfurt/panorama/2020/12/wasserstoff-odertal-bus-nahverkehr-tourismus-umweltministerium-uckermark.html>

SCHILLER, G., 2012. *Überblick über die Verfahren der Wasserelektrolyse und Forschungsergebnisse sowie Forschungsbedarf bei der alkalischen Elektrolyse* [online]. Institut für Technische Thermodynamik [Zugriff am: 10. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://elib.dlr.de/75764/1/Wasserelektrolyse_Ulmer_Gespräch_3.5.2012_GS.pdf

SMOLINKA T, GÜNTHER M. und GARCHE J., 2011. *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien* [online]. Kurzfassung NOW-Elektrolysestudie [Zugriff am: 27. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf>

SMOLINKA T. Wasserstoff aus Elektrolyse – ein technologischer Vergleich der alkalischen und PEM--Wasserelektrolyse [online]. In: *Workshop Wasserstoff aus erneuerbaren Energien*, S. 67-81 [Zugriff am: 27. Dezember 2020]. Verfügbar unter: https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2007/ws2007_07.pdf

SMOLINKA, T., E.T. OJONG und J. GARCHE, Hg., 2015. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* [online]: Elsevier. ISBN 9780444626165 [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444626165000085>

SMOLINKA, T., N. WIEBE, P. STERCHELE und A. PALZER, 2018. *Studie IndWEDe* [online]. *Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme* [Zugriff am: 31. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2019/06/NOW-Elektrolysestudie-2018.pdf>

SPEKTRUM, 1998a. *Lexikon der Chemie* [online]. *Partialdruck*. 10. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/partialdruck/6739>

SPEKTRUM, 1998b. *Lexikon der Physik* [online]. *Dissoziation*. 10. Juli 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dissoziation/3205>

STADT DÜSSELDORF, 2019. *Neue Wasserstofftankstelle* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.duesseldorf.de/wirtschaftsfoerderung/newsletter/newsletter-detailseite/newsdetail/18062019-neue-wasserstofftankstelle.html>

STEINMÜLLER ET AL., 2014. *Power to Gas – eine Systemanalyse. Markt- und Technologiescouting und -analyse* [online]. Linz [Zugriff am: 10. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/PtG/Endbericht_-_Power_to_Gas_-_eine_Systemanalyse_-_2014.pdf

STUTTGARTER ZEITUNG, 2020. *Saubere Straßen mit sauberer Technik* [online] [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.waiblingen-schafft-wasserstoff-kehrmaschine-an-saubere-strassen-mit-sauberer-technik.0bdb8be-ddea-4959-938c-3647dc23f0c3.html?reduced=true>

TJARKS, G., 2020. NOW-Webinar: Maßnahmen der nationalen Wasserstoffstrategie (17.06.2020). Webinar [Zugriff am: 30. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/veranstaltungen/now-webinar-massnahmen-der-nationalen-wasserstoffstrategie/>

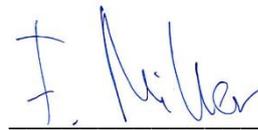
UMWELTBUNDESAMT, 2020a. *Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs* [online] [Zugriff am: 20. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#endenergieverbrauch-steigt-seit-2010-wieder-an>

- UMWELTBUNDESAMT, 2020b. *Treibhausgasminderungsziele Deutschlands* [online] [Zugriff am: 18. März 2020]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>
- VEREINTE NATIONEN, 2015. *7. d Paris Agreement* [online] [Zugriff am: 18. März 2020]. Verfügbar unter: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- YIN, R.K., 2003. *Case study research. Design and methods* [online]. 3. ed. Thousand Oaks, Calif.: SAGE. Applied social research methods series. 5. ISBN 0-7619-2552-X. Verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0658/2002152696-d.html>
- YIN, R.K., 2014. *Case study research. Design and methods*. 5. edition. Los Angeles: SAGE. ISBN 978-1-4522-4256-9.
- ZECH ET AL., K., 2013. *Hy-Now. Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse* [online] [Zugriff am: 8. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_19.pdf
- ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG BADEN-WÜRTTEMBERG, 2013. *Elektrolyse Basics III* [online]. *Funktionsprinzip der Elektrolyse* [Zugriff am: 17. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Elektrolyse_Basics_III.pdf

Ehrenwörtliche Erklärung zur Masterarbeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Mittelbiberach, 03.01.2021
(Ort und Datum)



(Unterschrift)