

Hochschule Ruhr West

Studiengang: Energie- und Wassermanagement (B.A.)

Studienort: Mülheim an der Ruhr

Bachelorarbeit im So 22

Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland –
Bedarf und Verfügbarkeiten von Importen aus dem
Ausland

Eingereicht bei: Prof. Dr. Carsten Sander

Zweitprüferin: Prof. Dr. Lilia Pasch

Abgabedatum: 27.06.2022

Name: Dominik Steinkusz

Matrikelnummer: 10007769

Adresse: An der Egge 15, 58762 Altena

Fachsemester: 7

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung.....	1
1.1 Relevanz und Problemstellung.....	1
1.2 Forschungsfrage	2
1.3 Vorgehensweise	2
2. Grundlagen des Energieträgers Wasserstoff.....	4
2.1 Zahlen und Fakten zu Wasserstoff	4
2.2 Herstellungsoptionen	6
2.3 Transport- und Speichermöglichkeiten	11
2.4 Anwendungsbereiche.....	13
2.4.1 Industrie	13
2.4.2 Verkehr und synthetische Kraftstoffe	15
2.4.3 Wärmemarkt.....	18
3. Ableitung des Importbedarfs für Wasserstoff in Deutschland auf Basis ausgewählter Studien.....	20
3.1 Nationale Wasserstoffstrategie 2020.....	20
3.2 Boston Consulting Group 2021.....	21
3.3 Agora Energiewende 2021.....	24
3.4 Fraunhofer ISE 2021	26
3.6 Dena Leitstudie 2021	32
3.7 Zusammenfassung der Studien – Der resultierende Importbedarf.....	36
4. Deckung des Importbedarfs durch verfügbare Importe	40

4.1 Potenzial der vielversprechendsten Importregionen und -länder.....	40
4.2 Vorgehen zur Herleitung der Verfügbarkeit von Wasserstoff.....	46
4.3 Erzeugungspotentiale der möglichen Lieferanten und denkbare Importe nach Deutschland	49
4.4 Vergleich der Transportmöglichkeiten nach Deutschland	55
4.4.1 European Hydrogen Backbone (EHB) – Initiative per Pipeline	55
4.4.2 Schifftransport – Relevanz des Rotterdamer Hafens für Europa und Deutschland	61
4.5 Zusammenfassung der möglichen Wasserstoffimporte nach Deutschland – Abgleich von Angebot und Nachfrage	63
5. Handlungsempfehlungen	70
6. Fazit	73
Literaturverzeichnis	75
Anhang	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eigenschaften des H ₂	4
Abbildung 2: Herstellung des grauen Wasserstoffes	7
Abbildung 3: Herstellung des blauen Wasserstoffes	7
Abbildung 4: Herstellung des türkisenen Wasserstoffes.....	8
Abbildung 5: Herstellung des grünen Wasserstoffes	9
Abbildung 6: Verfahren zur Wasserstoffgewinnung und Herstellkosten	10
Abbildung 7: Wasserstoff-Transportoptionen	11
Abbildung 8: Transportoptionen für H ₂	13
Abbildung 9: CO ₂ -Einsparpotenzial in der Stahlindustrie	14
Abbildung 10: Power-to-X-Technologien.....	16
Abbildung 11: Antriebsart je nach Fahrzeug.....	17
Abbildung 12: Heizungsbestand in Deutschland	18
Abbildung 13: Wasserstoff und PtL-Nachfrage nach Sektoren und Anwendungen	22
Abbildung 14: Wasserstofferzeugung und -nutzung	24
Abbildung 15: H ₂ - und PtL-Nachfrage für die Jahre 2030 und 2045	26
Abbildung 16: Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff	27
Abbildung 17: Bereitstellung und Verwendung von Flüssigkraftstoff in TWh	31
Abbildung 18: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten.....	33
Abbildung 19: Angebotspotenzial und Herkunft von Wasserstoff und Folgeprodukten.....	35
Abbildung 20: Wasserstoffnachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland.....	36
Abbildung 21: PtL-Nachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland	37
Abbildung 22: H ₂ - und PtL-Nachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland ..	38
Abbildung 23: Bandbreite der H ₂ - und PtL-Nachfrage, des -angebots und des Importbedarfs	39
Abbildung 24: Geeignete Herkunftsländer von grünem Wasserstoff (Perspektive 2030).....	41
Abbildung 25: Geeignete Herkunftsländer von grünem Wasserstoff (Perspektive 2050).....	42
Abbildung 26: Weltweite Bevölkerungsdichte.....	43
Abbildung 27: Mögliche internationale Kooperationsziele von grünem Wasserstoff für Deutschland von 2030 bis 2050	44
Abbildung 28: MENA-Region	45
Abbildung 29: Herleitung des prognostizierten Angebotspotenzials für Wasserstoff (Perspektive 2030)	48

Abbildung 30: Herleitung des prognostizierten Angebotspotenzials für Wasserstoff (Perspektive 2045)	48
Abbildung 31: Prognostiziertes Angebotspotenzial für Wasserstoff (Perspektive 2030)	50
Abbildung 32: Prognostiziertes Angebotspotenzial für Wasserstoff (Perspektive 2045)	51
Abbildung 33: Potenzial für blauen und türkisen Wasserstoff (Perspektive 2045).....	52
Abbildung 34: Die ECOWAS-Staaten.....	53
Abbildung 35: Herkunft von Wasserstoff und PtL (Perspektive 2045).....	54
Abbildung 36: Russische Gasexporte nach Abnehmerländer (2020)	57
Abbildung 37: Europäisches Wasserstoffnetz (Perspektive 2030).....	58
Abbildung 38: Europäisches Wasserstoffnetz (Perspektive 2040).....	60
Abbildung 39: Route von Rotterdam nach Nordrhein-Westfalen	62
Abbildung 40: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Pessimistisches Szenario - Perspektive 2030).....	65
Abbildung 41: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Base Case Szenario - Perspektive 2030)	65
Abbildung 42: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Optimistisches Szenario - Perspektive 2030)	66
Abbildung 43: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Pessimistisches Szenario - Perspektive 2045).....	67
Abbildung 44: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Base Case Szenario - Perspektive 2045)	68
Abbildung 45: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Optimistisches Szenario - Perspektive 2045)	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dichte und volumetrische Energiedichte von Wasserstoff bei verschiedenen Druckstufen	5
Tabelle 2: Excel-Tabelle des aggregierten Angebots.....	49
Tabelle 3: Excel-Tabelle der aggregierten Nachfrage, des aggregierten Angebots und des aggregierten Importbedarfs.....	64

Abkürzungsverzeichnis

BCG	Boston Consulting Group
BDI	Bundverband der deutschen Industrie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EE	Erneuerbare Energien
EHB	European Hydrogen Backbone
H ₂	Wasserstoff
i.H.v.	in Höhe von
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
PtL	Power-to-Liquid
TWh	Terawattstunden

1. Einleitung

1.1 Relevanz und Problemstellung

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“¹ Dieses Zitat ist eine Aussage des französischen Autors Jules Verne, welche er in seinem Buch „Die geheimnisvolle Insel“ im Jahr 1874 niedergeschrieben hat. Bereits in dieser Zeit entstand der Gedanke, Wasserstoff (H₂) als Energieträger zu nutzen.

Deutschland und Europa planen die Energieversorgung von fossilen auf erneuerbare Energieträger umzustellen, um das Ziel des Pariser Klimaabkommens zu erreichen. Dieses politische Ziel erfordert eine vollständige Reduzierung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, die bis 2050 einen grundlegenden Wandel erwarten. Dabei gilt Wasserstoff als Energieträger der Zukunft, um die langfristigen Klimaziele zu erreichen, welcher den energieintensiven Sektoren zur CO₂-Neutralität verhelfen kann.²

Um den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu beschleunigen, soll sowohl die verabschiedete nationale Wasserstoffstrategie (NWS) in Deutschland als auch die beschlossene EU-Wasserstoffstrategie dem klimafreundlichen Wasserstoff zum Durchbruch verhelfen.

Die Problematik besteht für Deutschland darin, dass die erneuerbaren Kapazitäten, welche für die Herstellung des klimafreundlichen Wasserstoffes nötig sind, nicht vollumfänglich ausreichen, um die inländische Wasserstoffnachfrage decken zu können. Für die Herstellung von Wasserstoff wird nämlich eine erhebliche Menge elektrische Energie erfordert. Dementsprechend ist die Bundesregierung langfristig auf ausländische Importe angewiesen, um die Wasserstoffnachfrage zu decken.

¹ DVS (o.J.).

² Vgl. BDI (2021a).

1.2 Forschungsfrage

Die vorliegende Bachelorarbeit analysiert den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, in denen verschiedene Studien ausgewertet werden, welche die Wasserstoffnachfrage zwischen 2025 bis 2050 prognostizieren.

Die relevanten Forschungsfragen lauten:

- Wie viel Wasserstoff wird in den nächsten Jahren nachgefragt und wer sind die größten Wasserstoffabnehmer?
- Wie viel Wasserstoff kann Deutschland inländisch produzieren?
- Wie viel Wasserstoff muss aus dem Ausland importiert werden?
- Wer sind die vielversprechendsten Wasserstoffimporteure für Deutschland?
- Wie viel Wasserstoff und in welcher Form können die jeweiligen Importeure Wasserstoff nach Deutschland transportieren?

Die Analyse beruht lediglich auf Prognosen von Experten, die herausstellen, wie die künftigen Entwicklungen der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland unter diversen Rahmenbedingungen verlaufen kann. Demnach können nur Tendenzen abgeleitet werden, um den zukünftigen Bedarf von Wasserstoff abzuschätzen. Zudem werden Bandbreiten genutzt, um sowohl das Minimum als auch das Maximum der Nachfrage, des Angebots und des Importbedarfs zu veranschaulichen.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst werden in Kapitel zwei die Grundlagen des Wasserstoffes vermittelt, mit denen der Leser Auskunft über den Energieträger erlangt. Dabei werden Daten und Fakten über Wasserstoff präsentiert, welche diesen als Schlüssel zum Erreichen der Klimaziele auszeichnet. Danach werden dem Leser vier Optionen aufgezeigt, auf welche Weise Wasserstoff hergestellt werden kann und welche Emissionen nach Art der Herstellung im Gesamtprozess ausgestoßen werden. Im Anschluss werden die vielfältigen Transport- und Speichermöglichkeiten dargestellt, um Wasserstoff vom Erzeuger bis zum Verbraucher zu befördern. Schließlich erfährt der Leser die diversen Anwendungsbereiche des klimafreundlichen Wasserstoffes.

In Kapitel drei wird Angebot und Nachfrage von Wasserstoff gegenübergestellt, um die Importlücke in den kommenden Jahren ermitteln zu können. Dabei werden verschiedene Studien ausgewertet, die zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Hierbei wird auch die NWS erklärt, welches als Fundament für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland gilt. Nachdem die vorliegenden Studien ausgewertet worden sind, erhält der Leser eine visualisierte Gesamtübersicht über den Wasserstoff- und Power-to-Liquid (PtL)-Bedarf.

In Kapitel vier werden die vielversprechendsten Importeure für Deutschland diskutiert, welche bereits 2030 und 2045 Deutschland mit Wasserstoff versorgen können. Im Anschluss erhält der Leser konkrete Wasserstoff Importzahlen, welche aufzeigen sollen, welche Menge an Wasserstoff aus den verschiedenen Regionen und Ländern nach Deutschland kommen kann. Hierbei wird auf eine kürzlich veröffentlichte Studie zurückgegriffen, welche die Herleitung der Verfügbarkeit von Wasserstoff realitätsnah abbildet. Abschließend wird in Kapitel vier ein Abgleich zwischen dem Importangebot und der deutschen Nachfrage erstellt, um herauszufinden, ob diese gedeckt werden kann. Hierbei wird zwischen drei Szenarien unterschieden, die in einem Schalendiagramm veranschaulicht werden.

In Kapitel fünf wird eine Handlungsempfehlung für Deutschland ausgesprochen, welche den Einstieg des Hochlaufes der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland vereinfachen soll.

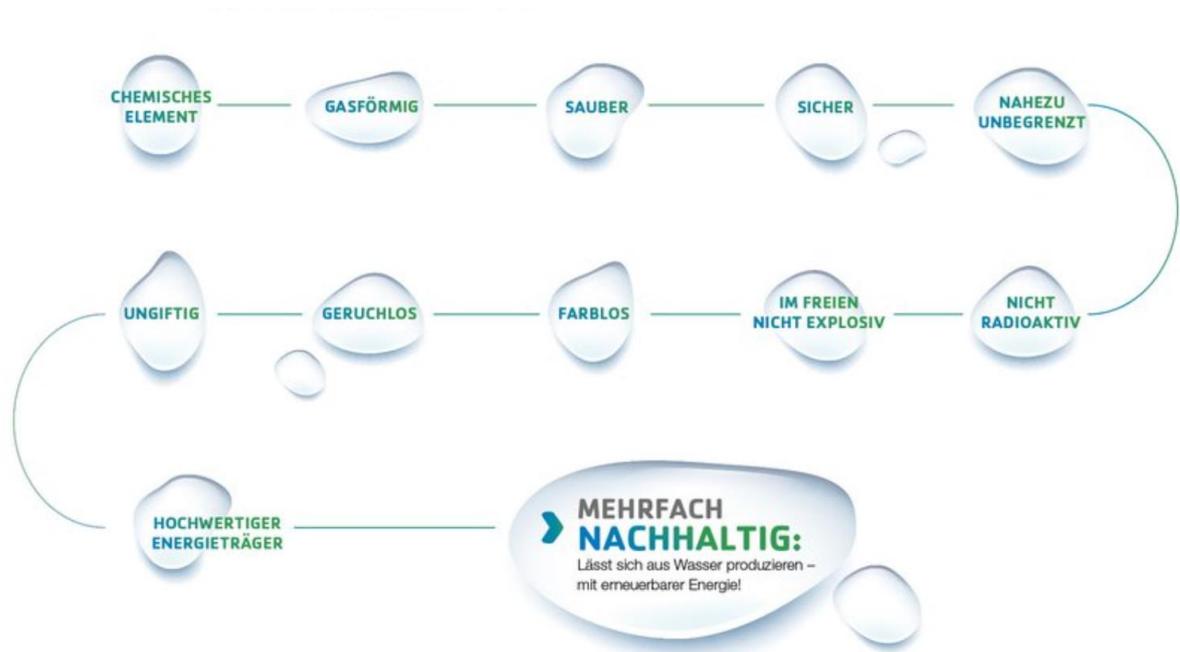
Zum Schluss soll ein Fazit die gewonnen Erkenntnisse zusammenfassen.

2. Grundlagen des Energieträgers Wasserstoff

2.1 Zahlen und Fakten zu Wasserstoff

Wasserstoff wurde im Jahr 1766 durch den britischen Chemiker Henry Cavendish während eines Experiments entdeckt, welcher dem Wasserstoff den Namen brennfähige Luft gegeben hat.³ Der lateinische Begriff für Wasserstoff lautet Hydrogenium und bedeutet übersetzt Wassererzeuger. Wasserstoff befindet sich im Periodensystem an erster Stelle und hat die Ordnungszahl 1. Es trägt das chemische Symbol H und ist das häufigste vorkommende Element im Universum. Ferner ist Wasserstoff auch das leichteste Element, welches rund 14,5-mal leichter als Luft ist.⁴

Abbildung 1: Eigenschaften des H₂



Quelle: Wasserstoffproduktion Ostschweiz AG (o.J.).

Im Normalzustand ist Wasserstoff ein gasförmiges, farb- und geruchloses Gas, welches auf der Erde hauptsächlich in gebundener Form, wie zum Beispiel in Wasser vorkommt. Da die Erde von mehr als zwei Drittel mit Wasser bedeckt ist, kommt Wasserstoff nahezu in unendlichen Mengen vor. Die chemische Formel von molekularem Wasserstoff lautet H₂. Um

³ Vgl. VDI (o.J.).

⁴ Vgl. DIHK (2020).

diese Mengen nutzen zu können, muss Wasserstoff in seine Bestandteile Wasser und Sauerstoff gespalten werden. Beim Einsatz vom klimaneutralen Wasserstoff entsteht lediglich Wasserdampf und somit keine direkten CO₂-Emissionen. Genauer wird im Kapitel 2.2 Herstellungsoptionen erläutert.

Außerdem ist Wasserstoff für die Speicherbarkeit des Gases und für die hohe Energiedichte bekannt, welches einen Heizwert von 33,33 kWh/kg aufweist. Im Vergleich zu den fossilen Energieträgern wie Methan (13,9 kWh/kg), Benzin (12,0 kWh/kg), Diesel (11,9 kWh/kg) und Rohöl (11,6 kWh/kg) hat Wasserstoff den höchsten Energiegehalt.⁵

Nach Tabelle 1 ist es auffällig, dass sich die Dichte und die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff erhöhen, wenn Wasserstoff unter hohem Druck gespeichert wird.

Tabelle 1: Dichte und volumetrische Energiedichte von Wasserstoff bei verschiedenen Druckstufen

Druck (bar)	Dichte (kg/m³)	Volumetrische Energiedichte (kWh/m³)
1	0,1	3
50	4	133
100	8	266
200	15	500
300	21	699
350	24	799
500	31	1.032
700	41	1.332

Quelle: Rheingas (o.J.).

Je stärker Wasserstoff komprimiert wird, desto mehr Energie lässt sich in einem Behälter speichern. Während gasförmiger Wasserstoff unter Standardbedingungen (1,013 bar und 0°C) eine Dichte von 0,0899 Gramm pro Liter bzw. 0,0899 Kilogramm pro Kubikmeter aufweist, hat flüssiger Wasserstoff eine Dichte von 70,79 Gramm pro Liter bzw. 70,79 Kilogramm pro

⁵ Vgl. Zukunft Gas e.V. (o.J.).

Kubikmeter.⁶ Dies bedeutet, dass sich die volumetrische Energiedichte des flüssigen Wasserstoffes, um fast das 800-fache erhöht. Somit kann viel mehr Wasserstoff in einem Tank oder Behälter gespeichert und kann besser über weite Strecken transportiert werden. Während der Schmelzpunkt⁷ von Wasserstoff bei -259,19 °C liegt, beträgt der Siedepunkt⁸ von Wasserstoff -252,76 °C.⁹

2.2 Herstellungsoptionen

Wasserstoff ist im Gegensatz zu fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl oder Erdgas ein Sekundärenergieträger, weil zur Herstellung zunächst Primärenergie aufgewendet werden muss.¹⁰ Hierfür gibt es verschiedene Verfahren Wasserstoff zu erzeugen, welche diversen Farben zugeordnet werden. Je nach Erzeugungsart und Farbkategorie kann der Wasserstoff unterschiedlich viel Emissionen verursachen. In dieser Bachelorarbeit werden lediglich die Farben grau, blau, türkis und grün berücksichtigt und erklärt, da diese im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland am meisten verwendet werden.

Der größte Teil der deutschen Wasserstoffproduktion erfolgt durch fossile Energieträger wie Kohle oder Erdgas, welche ca. 55 TWh Wasserstoff produzieren.¹¹ Dieses Verfahren wird als grauer Wasserstoff kategorisiert, da mittels der Dampfreformierung der kohlenstoffhaltige Brennstoff unter Einfluss von Wasserdampf und Wärme in Wasserstoff und CO₂ umgewandelt wird. Hierbei gelangt das CO₂ direkt in die Atmosphäre und es entstehen rund 10 Millionen Tonnen CO₂ bei der Erzeugung einer Tonne Wasserstoff.¹²

⁶ Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2017), S. 6.

⁷ Schmelzpunkt = Temperatur, bei dem der Wasserstoff vom flüssigen in den festen Zustand übergeht.

⁸ Siedepunkt = Temperatur, bei dem der Wasserstoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht.

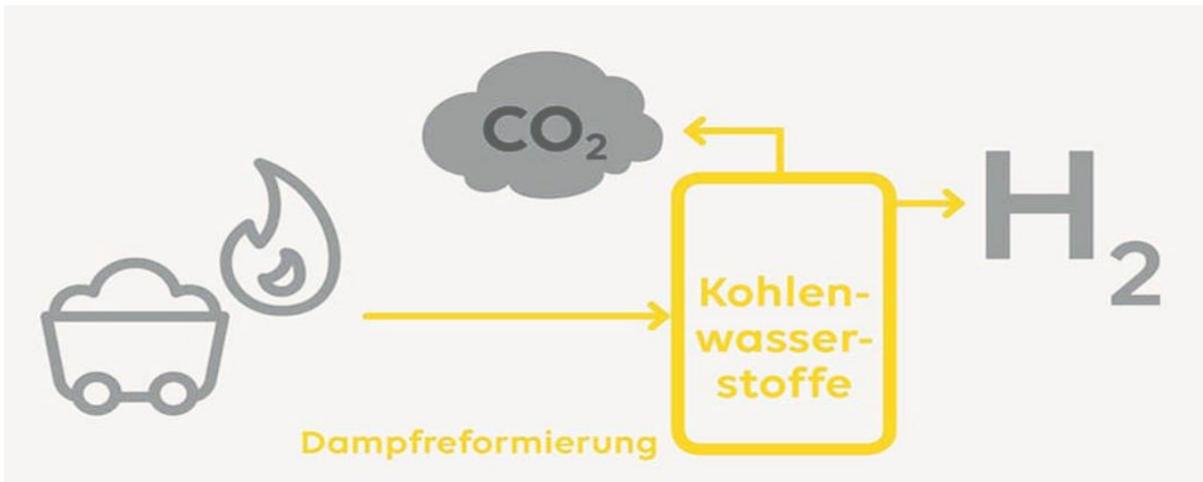
⁹ Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2017), S. 5f.

¹⁰ Vgl. UBA (2022).

¹¹ Vgl. BMWi (2020), S. 8.

¹² Vgl. DIHK (2020), S.6f.

Abbildung 2: Herstellung des grauen Wasserstoffes



Quelle: EWE AG (o.J.).

Demzufolge ist der graue Wasserstoff nicht klimaneutral und wird langfristig im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland keinen Stellenwert einnehmen.

Das Verfahren des blauen Wasserstoffes hingegen entsteht wie der graue Wasserstoff durch die Dampfreformierung von Erdgas, bei dem das CO_2 im Produktionsprozess nicht in die Atmosphäre gelangt, sondern im Untergrund gespeichert wird.¹³

Abbildung 3: Herstellung des blauen Wasserstoffes



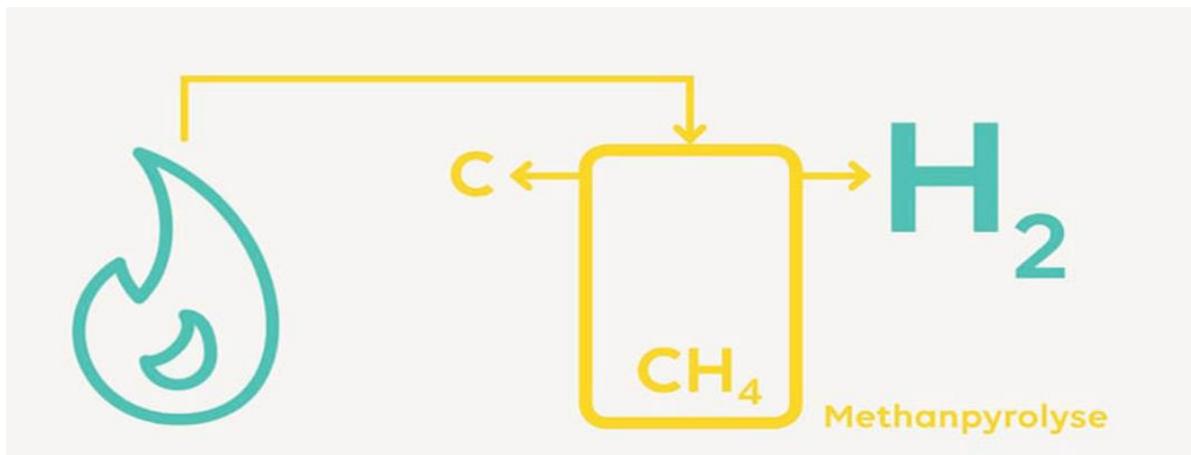
Quelle: EWE AG (o.J.).

¹³ Vgl. BMWi (2020), S. 31.

Hierbei wird vom sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS) bzw. CO₂-Abscheidung und -Speicherung gesprochen, welcher das CO₂ in ehemaligen Erdgas- oder Erdöllagerstätten speichern kann. Sofern das CO₂ nicht in die Atmosphäre gelangt, ist dieses Verfahren klimaneutral. Dennoch sind die langfristigen Folgen der Speicherung des blauen Wasserstoffes im Untergrund noch unklar „und durch Leckagen kann es dennoch zu negativen Umwelt- und Klimaeinflüssen kommen.“¹⁴

Der türkise Wasserstoff wird durch die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Bei dieser thermischen Reaktion wird Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten, da unter Ausschluss von Sauerstoff kein CO₂ entstehen kann. Für die Spaltung von Methan sind sogenannten Hochtemperaturreaktoren verantwortlich, bei dem das Verfahren als emissionsfrei gilt, wenn diese mittels erneuerbarer Energien betrieben werden und der feste Kohlenstoff gelagert und nicht verbrannt wird.¹⁵

Abbildung 4: Herstellung des türkisen Wasserstoffes



Quelle: EWE AG (o.J.).

Dennoch ist türkiser Wasserstoff im Gesamtprozess nicht emissionsfrei, da bei der Förderung und beim Transport von Erdgas Emissionen entstehen. Der Hauptbestandteil des Erdgases ist Methan, welcher 25-mal so schädlich wie CO₂ wirkt.¹⁶

¹⁴ Vgl. EWE (o.J.).

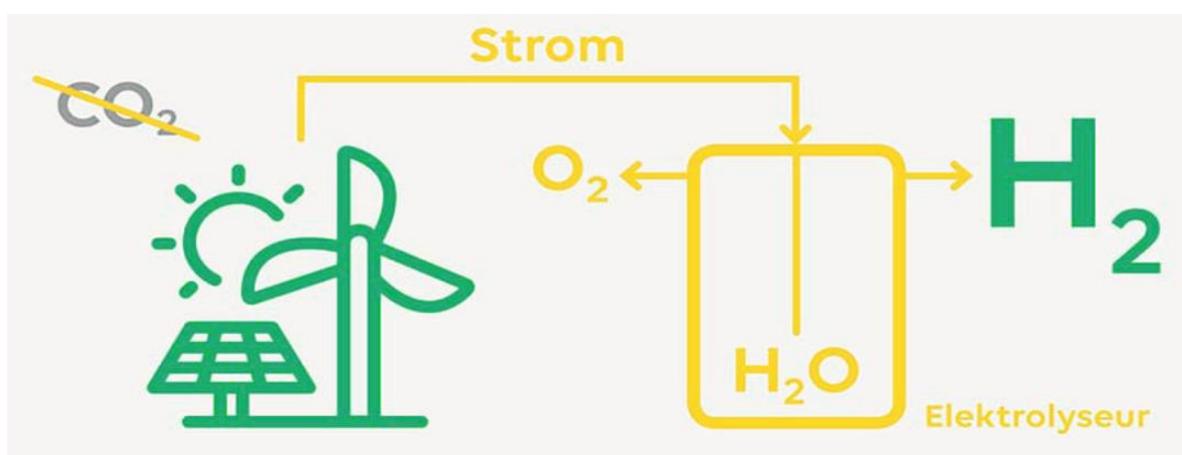
¹⁵ Vgl. BMWi (2020), S. 31.

¹⁶ Vgl. UBA (2021a).

Der klimafreundlichste Wasserstoff ist der grüne Wasserstoff, welcher ausschließlich von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie etwa Sonnen-, Wasser- oder Windenergie in sogenannten Elektrolyseuren hergestellt wird. Mittels der Wasserelektrolyse wird Wasser unter Stromeinsatz in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten und ist laut NWS ein klimaneutrales Verfahren.¹⁷

Bei einem Wirkungsgrad von 70% benötigen Elektrolyseure für 1 Kilogramm Wasserstoff (33,33 kWh) rund 50 kWh erneuerbare Energie.¹⁸

Abbildung 5: Herstellung des grünen Wasserstoffes



Quelle: EWE AG (o.J.).

Hierbei ist es wichtig anzumerken, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien kontinuierlich wachsen muss, um große Mengen des klimafreundlichen Wasserstoffes herzustellen.

Ziel der Bundesregierung ist es internationaler Vorreiter in der Entwicklung von Wasserstofftechnologien zu werden, in der der grüne Wasserstoff eine wichtige Rolle spielen wird.¹⁹ Aufgrund des hohen Strombedarfs für die Wasserstoffgewinnung wird es kurz- bis mittelfristig nicht möglich sein, lediglich grünen Wasserstoff herzustellen und zu verwenden.

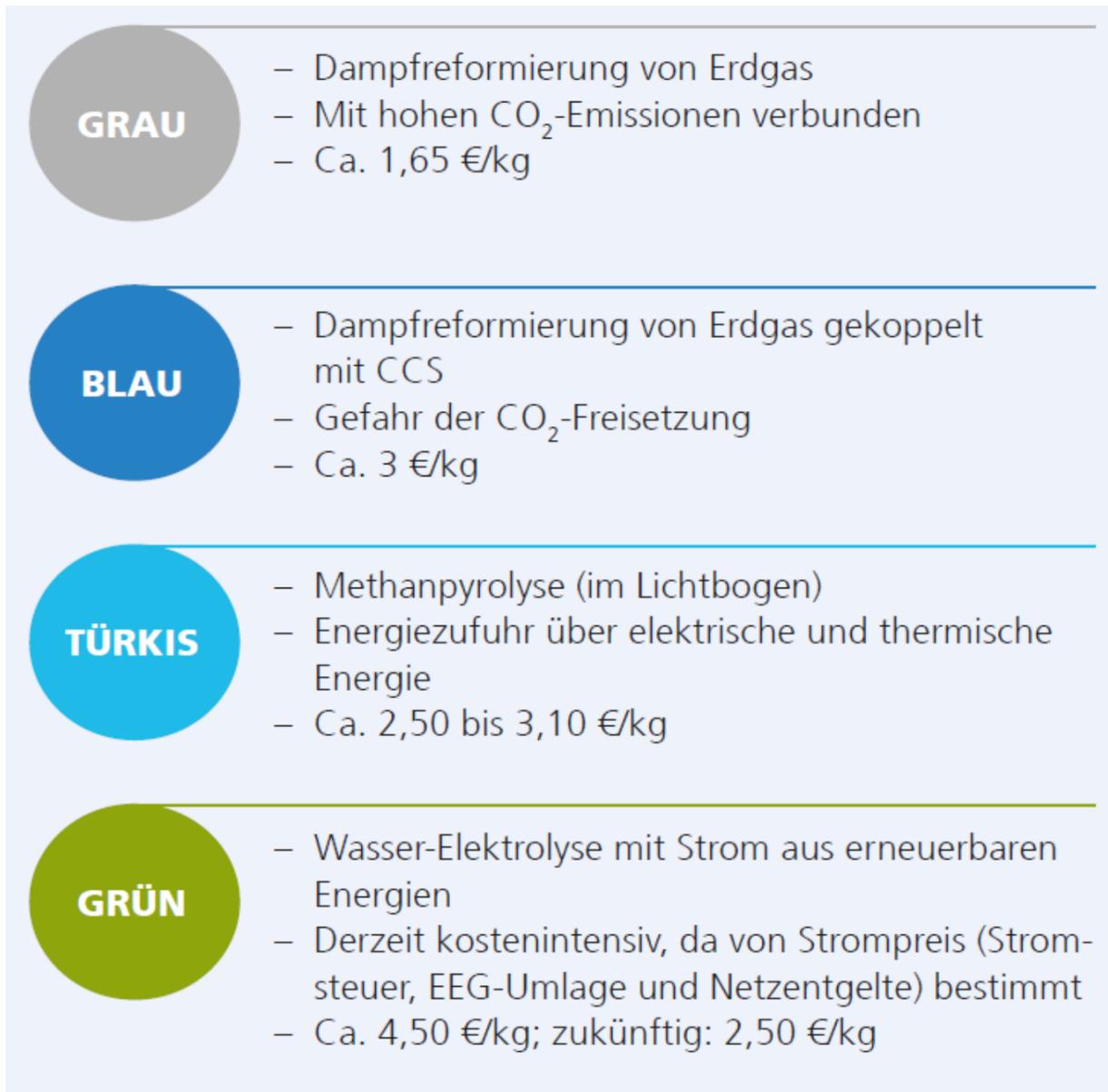
Im Anschluss wird in der unteren Abbildung die Wasserstoffpreise für den grauen, blauen, türkisen und grünen Wasserstoff visualisiert. Das Fraunhofer IKTS hat die folgenden Preisdimensionen für die verschiedenen Wasserstoffkategorien in Abbildung 6 zusammengefasst:

¹⁷ Vgl. BMWi (2020), S. 31.

¹⁸ Vgl. BMBF (2022a).

¹⁹ Vgl. BMWi (2020), S.8f.

Abbildung 6: Verfahren zur Wasserstoffgewinnung und Herstellkosten



Quelle: Fraunhofer IKTS (o.J.a).

Während der graue Wasserstoff am günstigsten herzustellen ist, kostet der grüne Wasserstoff kurz- bis mittelfristig fast dreimal so viel wie der graue. In Zukunft werden sich die grünen Wasserstoffpreise voraussichtlich reduzieren, da die Strompreise für erneuerbaren Strom aufgrund der höheren Verfügbarkeit sinken werden und es effizientere Elektrolyseanlagen geben wird. Weiterhin werden die Produktionskosten dieser Technologie aufgrund der hohen Nachfrage sinken.

2.3 Transport- und Speichermöglichkeiten

Neben der Herstellung ist auch der wirtschaftliche und der sichere Transport von Wasserstoff ein wichtiger Bestandteil der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland. Es gibt verschiedene Ansätze, Wasserstoff vom Herstellungsort bis zum Endkunden zu liefern.

Pipelines bzw. Rohrleitungen stellen eine Möglichkeit dar, Wasserstoff gasförmig zu transportieren. Dabei kann zunächst das bestehende Erdgasleitungsnetz verwendet werden, in dem Wasserstoff beigemischt wird, „ehe die bestehenden Erdgasleitungen in weiteren Schritten ausschließlich für den Wasserstofftransport genutzt werden.“²⁰ Nach Angaben des deutschen Vereines des Gas- und Wasserfaches (DVGW) Regelwerks G260 ist es derzeit nur möglich bis zu 10 Volumenprozent Wasserstoff im Gasnetz beizumischen. Das Regelwerk wird zukünftig weiterentwickelt und wird nach Angaben des DVGW zunächst auf 20 Volumenprozent bis hin zu 50 Volumenprozent Wasserstoffanteil erhöht werden.²¹ Darüber hinaus betreibt die Industriegase-Konzern Air Liquide Deutschland GmbH das größte reine Wasserstoffnetz im Ruhrgebiet und Deutschlands, welches sich über eine Länge von 240 Kilometern erstreckt und Industriekunden mit Wasserstoff versorgt.²²

Zudem kann Wasserstoff gasförmig oder in flüssiger Form in einzelnen Speicherflaschen per LKW oder Eisenbahn vom Produzenten zum Verbraucher transportiert werden.

Abbildung 7: Wasserstoff-Transportoptionen



Quelle: Shell Deutschland Oil GmbH (2017).

Dabei wird der gasförmige Wasserstoff „bei 200-700 bar in Druckbehältern oder in flüssiger Form bei -253°C in Kryostaten gespeichert. Der hohe Druck oder die niedrige Temperatur sind notwendig, um eine möglichst hohe Energiedichte zu erhalten“²³, welches aus der

²⁰ Neuman & Esser Group (o.J.).

²¹ Vgl. Deutscher Bundestag (2019), S.8.

²² Vgl. Air Liquide GmbH (o.J.).

²³ AGBF Bund (2008).

Tabelle 1 in Kapitel 2.1 zu entnehmen ist. Während der Transport von gasförmigem Wasserstoff eine Kapazität von 1000 kg bei bis zu 500 bar Nenndruck besitzt, kann flüssiger Wasserstoff eine Kapazität von ca. 4000 kg bei einem Druck zwischen 1-4 bar aufweisen.

Da bisher kaum spezielle Wasserstoffleitungen vorhanden sind und der Transport durch die Erdgas-Pipelines nur eingeschränkt möglich ist, bietet klimaneutraler Ammoniak kurz- bis mittelfristig die Option, Wasserstoff per Schiff besser transportfähiger zu machen. Ammoniak ist eine chemisch gasförmige Verbindung aus Stickstoff und Wasserstoff, welche in den vergangenen Jahrzehnten hauptsächlich zur Herstellung von Düngemittel genutzt wurde. Heutzutage wird zur Produktion von synthetischem Ammoniak das Haber-Bosch-Verfahren angewendet, bei dem Stickstoff und Wasserstoff mittels eines Katalysators unter hohem Druck und Temperatur zu Ammoniak umgesetzt wird. Ein großer Nachteil des Ammoniaks ist es, dass dieser nach dem Transport wieder in seine Einzelteile Wasserstoff und Stickstoff umgewandelt werden muss, welches mit hohen Energieverlusten verbunden ist.²⁴

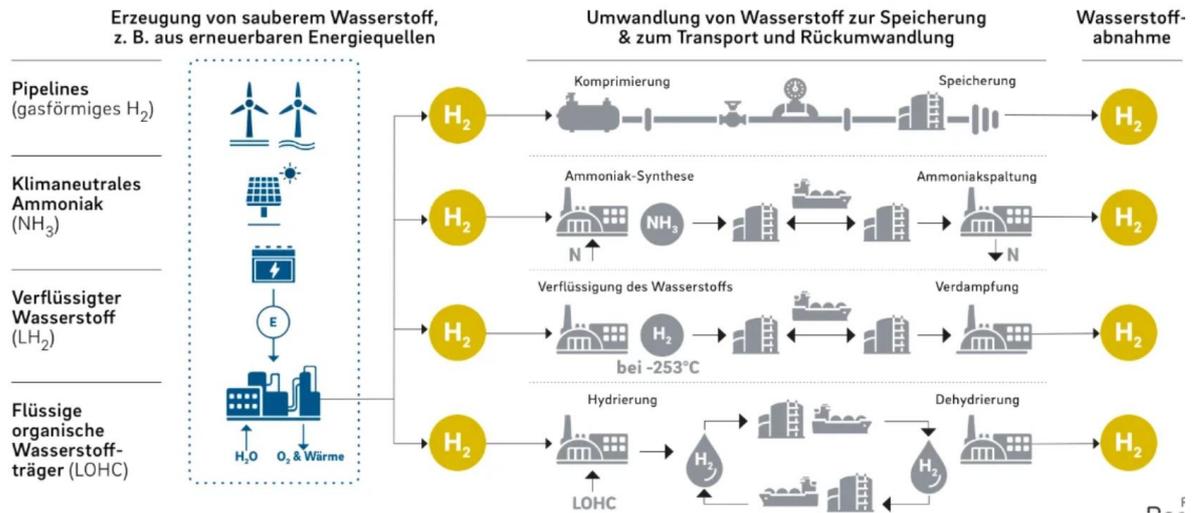
Eine weitere Variante Wasserstoff zu speichern ist die LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers), welcher einen chemischen Energiespeicher für Wasserstoff darstellt.

Nachdem Wasserstoff im Elektrolyseur hergestellt worden ist, wird dieser in einen Reaktor, den sogenannten Hydrierer gepumpt. Dabei wird der Wasserstoff in einer katalytischen Reaktion mit einer organischen Flüssigkeit in Kontakt gebracht. Auf der Oberfläche des Katalysators wird Wasserstoff fest an die Flüssigkeit gebunden, welche im Nachhinein zum Wasserstoffträger wird. In diesem Prozess wird der Wasserstoff flüssig gemacht, ohne ihn unter erheblichen Energieaufwand abzukühlen. Anschließend kann der Wasserstoffträger in einem Behälter so lange gespeichert werden, bis es zum Verbraucher transportiert wird.²⁵ Letztlich können die möglichen Transport- und Speicheroptionen in der unteren Abbildung von Roland Berger zusammenfassend visualisiert werden.

²⁴ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2021).

²⁵ Vgl. Deutscher Bundestag (2020), S. 1f.

Abbildung 8: Transportoptionen für H₂



Quelle: Roland Berger (2021).

2.4 Anwendungsbereiche

Um das Ziel der Klimaneutralität in Deutschland zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen um 65% bis zum Jahr 2030, um 88% im Jahr 2040 und um 100% im Jahr 2045 gegenüber 1990 gesenkt werden.²⁶ Wasserstoff gilt als der Energieträger der Zukunft, um die folgenden Sektoren Industrie, Verkehr und Wärme zu dekarbonisieren.

2.4.1 Industrie

Bis 2030 setzt sich die Bundesregierung das Klimaziel die Emissionen in der Industrie im Vergleich zu 1990 von 284 Millionen Tonnen CO₂ auf höchstens 118 Millionen Tonnen CO₂ zu reduzieren, welches eine Treibhausgas-Reduktion von ca. 58% erfordert.²⁷ Neben der konventionellen Energieerzeugung gilt die Industrie als zweitgrößter Treibhausgas-Verursacher in Deutschland²⁸, welcher in der Anfangszeit des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland der größte Wasserstoffnachfrager sein wird, da grüner Wasserstoff die fossilen Energieträger wie Mineralöl, Erdgas oder Kohle langfristig ersetzen kann. Der klimafreundliche Wasserstoff wird als Rohstoff für industrielle Prozesse und Produkte dienen, welcher dem Industriesektor zur CO₂-Neutralität verhelfen kann, da sich

²⁶ Vgl. Breg (2021).

²⁷ Vgl. BMUV (2021), S.33.

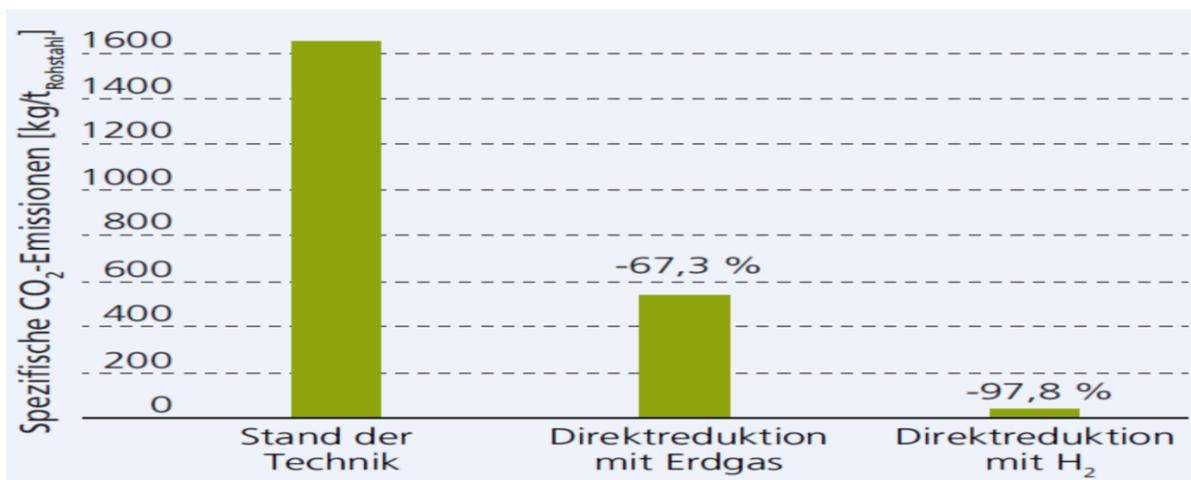
²⁸ Vgl. UBA (2021b).

einige industrialisierte Anwendungen schwer bzw. gar nicht mit Strom elektrifizieren lassen, wie beispielsweise die Stahlerzeugung oder Ammoniakproduktion.²⁹

Die Branche mit dem größten Anteil an Treibhausgasemissionen in der Industrie ist die Stahlindustrie mit 30%, welche ca. 6% der Gesamtemissionen in Deutschland ausmacht.³⁰

Die traditionellen Hochöfen, die mit Koks betrieben werden, sollen durch Direktreduktionsanlagen ersetzt werden, die Wasserstoff als Reduktionsmittel nutzen. Hierbei wird vom grünen Stahl gesprochen, wenn während des Schmelz- und Weiterverarbeitungsprozesses von Stahl keine CO₂-Emissionen ausgestoßen werden. In der unteren Abbildung 9 können somit bis zu 97,8% CO₂-Emissionen in der Stahlindustrie eingespart werden, wenn statt Hochöfen mit Koks Direktreduktionsanlagen grüner Wasserstoff verwendet werden kann.

Abbildung 9: CO₂-Einsparpotenzial in der Stahlindustrie



Quelle: Fraunhofer IKTS (o.J.b).

Dazu veröffentlichte die Bundesregierung im Jahre 2020 das Handlungskonzept Stahl, welches als Grundstein für den Einstieg in die Transformation fungieren soll.³¹

Weiterhin kann Wasserstoff in der Metallverarbeitung, Zement-, Glas- und Keramikindustrie sowie in der Chemieindustrie langfristig eine wichtige Rolle einnehmen, um die Ziele der Klimaneutralität zu erreichen.

²⁹ Vgl. BDEW (o.J.).

³⁰ Vgl. BMWK (2021).

³¹ Vgl. BMWK (2020).

2.4.2 Verkehr und synthetische Kraftstoffe

Bis 2030 setzt sich die Bundesregierung das Klimaziel die Emissionen im Verkehr im Vergleich zu 1990 von 164 Millionen Tonnen CO₂ auf höchstens 85 Millionen Tonnen CO₂ zu reduzieren, welches eine Treibhausgas-Reduktion von ca. 48% erfordert.³² Grüner Wasserstoff stellt eine Möglichkeit dar, den Verkehrssektor langfristig zu dekarbonisieren, welcher nicht nur in gewöhnlichen Autos, sondern auch „im ÖPNV (Busse, Züge), im Straßenschwerlastverkehr (Lkw) oder in der Logistik (Gabelstapler, Flurförderzeuge) (...)“³³ eingesetzt werden kann.

Dieser kann in Brennstoffzellen als Antrieb für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge genutzt werden, welcher auch als Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle bezeichnet wird, da ein kontinuierlicher zugeführter Brennstoff (Wasserstoff) mit einem Oxidationsmittel (Sauerstoff) reagiert. Die gespeicherte Energie im Wasserstoff kann in der elektrochemischen Reaktion als Strom freigegeben werden, womit ein Elektromotor angetrieben werden kann. Die Reaktion wird auch als kalte Verbrennung bezeichnet, da keine zusätzliche Energie von außen benötigt wird. Beim Fahren eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeugs entstehen keine schädlichen CO₂-Emissionen aus dem Auspuff, sondern lediglich etwas Wasserdampf. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle liegt bei mehr als 60% und ist demnach gegenüber dem Wirkungsgrad eines Benzinmotors i.H.v. 25-35% besonders effizient.³⁴ Aufgrund der schnellen Tankzeit und der hohen Reichweite stellen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge eine gute Alternative zu Elektrofahrzeugen dar.³⁵

Darüber hinaus können Fahrzeuge auch mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden. Mit Hilfe von Power-to-X-Technologien lassen sich synthetische Energieträger (Power Fuels) und chemische Grundstoffe durch Strom aus erneuerbaren Energien herstellen.³⁶ Demnach können diese Technologien nach Verwendungszweck (Power to Chemicals) bzw. nach Energieform (Power to Gas, Power to Liquid, Power to Heat, Power to Mobility) differenziert werden. In der unteren Abbildung 10 sind die verschiedenen Prozesse der Power-to-X-Technologien zu erkennen. In der Bachelorarbeit wird sich lediglich auf PtL beschränkt, da die PtL-Nachfrage

³² Vgl. BMUV (2021), S. 36.

³³ BMWK (o.J.).

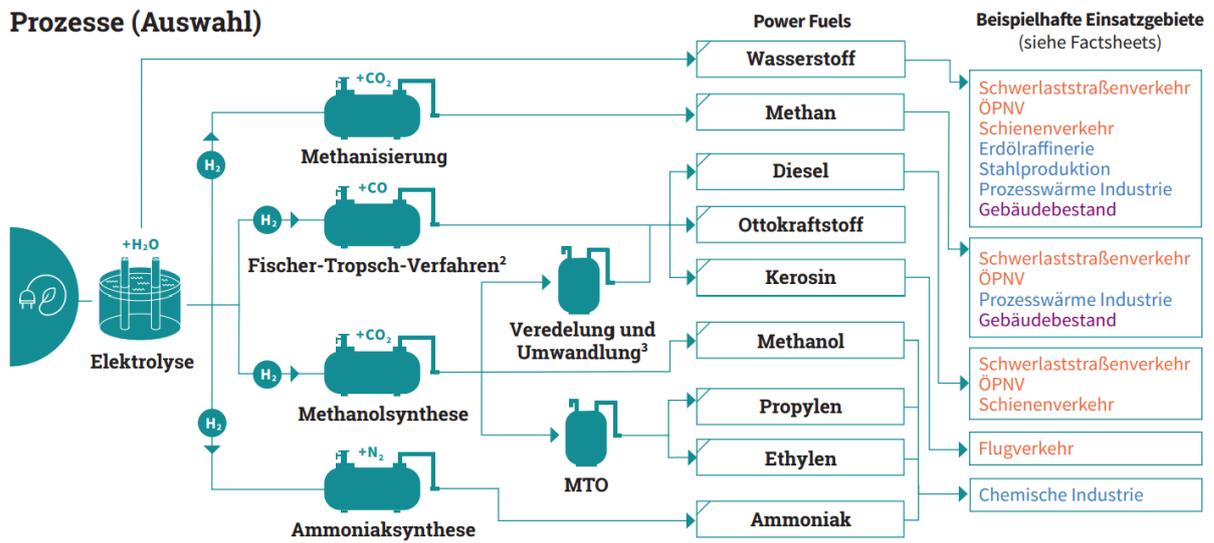
³⁴ Vgl. EnBW (o.J.).

³⁵ Vgl. UBA (2021c).

³⁶ Vgl. Dena (2018), S. 1.

in den zu analysierenden Studien grafisch abgebildet wird und die Wasserstoffnachfrage in Zukunft weiterhin ergänzt.

Abbildung 10: Power-to-X-Technologien



¹ Power to X beinhaltet: Power to Gas (Wasserstoff und synth. Methan), Power to Liquid (synth. Diesel, Ottokraftstoff, Kerosin) und Power to Chemicals (Chemikalien). Power to Heat und Power to Mobility sind hier nicht inkludiert.
² Beinhaltet: Fischer-Tropsch-Synthese, Hydrocracken, Isomerisierung und Destillation. ³ Beinhaltet: DME/OME-Synthese, Olefin-Synthese, Oligomerisierung und Hydrotrating.

Quelle: Dena (2018), S. 1.

Das PtL-Verfahren wird demnach genutzt, um synthetische Kraftstoffe wie Diesel, Benzin oder Kerosin herzustellen, welche den erneuerbaren Strom in flüssige Kraftstoffe umwandelt. Diese Kraftstoffe können hierbei durch die Methanolsynthese oder Fischer-Tropsch-Verfahren produziert werden. „Bei der Methanolsynthese wird in einem ersten Schritt Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid (CO) erzeugt. Das Methanol kann entweder direkt verwendet oder in synthetische Flüssigkraftstoffe (Diesel, Benzin, Kerosin) umgewandelt werden. Bei der Herstellung via Fischer-Tropsch-Synthese wird aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff ein Roh-Flüssigkraftstoff hergestellt, der anschließend raffiniert wird.“³⁷ Dementsprechend können diese Kraftstoffe klimaneutral und ohne Verwendung von fossilen Energieträgern wie z.B. Erdöl hergestellt werden. Darüber hinaus erfordern synthetische Kraftstoffe gegenüber Wasserstoff- oder Elektroantrieben keine Umstellung der Verbraucher, da diese wie gewöhnliche Kraftstoffe in den Verbrennungsmotoren verwendet werden können. Weiterhin kann auch die bestehende

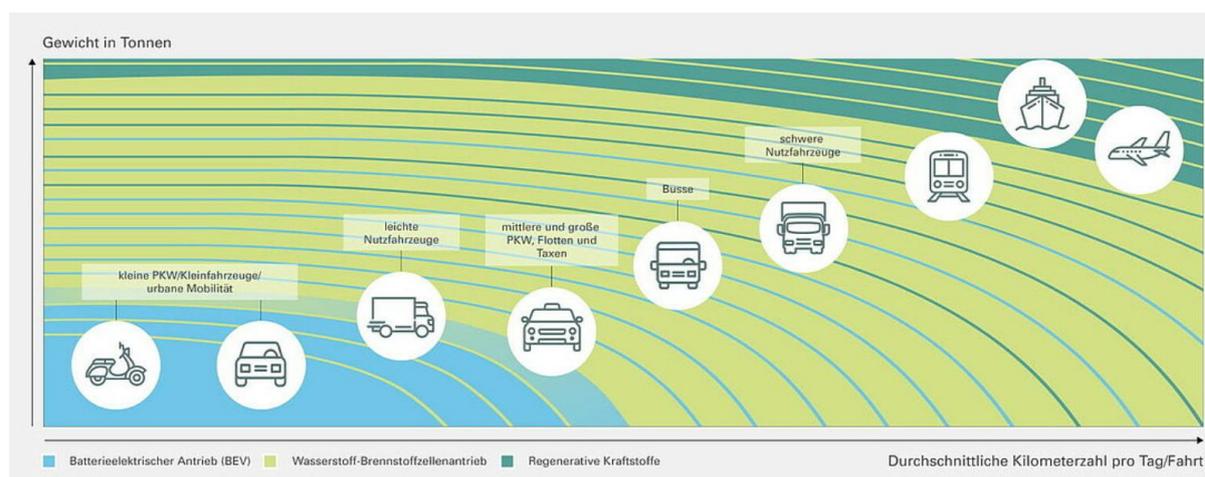
³⁷ Dena (2018), S. 2.

Infrastruktur von Tankstellen und Pipelines zurückgegriffen werden, da synthetische Kraftstoffe langfristig die konventionellen Kraftstoffe substituieren werden.³⁸

Demnach können synthetische Kraftstoffe und brennstoffzellenelektrische Antriebe die Elektromobilität im Verkehrssektor ergänzen.

In der unteren Abbildung 11 beschreibt die E-mobil BW die vielfältigen Antriebsarten, in dem die effizienteste Technologie für die verschiedenen Fahrzeugtypen aufgezeigt werden. Hierbei ist es auffällig, dass sich die Antriebsart mit der Höhe der Reichweite und dem Gewicht des Fahrzeugs verändern. Während sich vor allem Kleinfahrzeuge für einen batterieelektrischen Antrieb eignen, kommen vor allem für Flugzeuge und Schiffe synthetische Kraftstoffe in Frage.

Abbildung 11: Antriebsart je nach Fahrzeug



Quelle: E-mobil BW (o.J.).

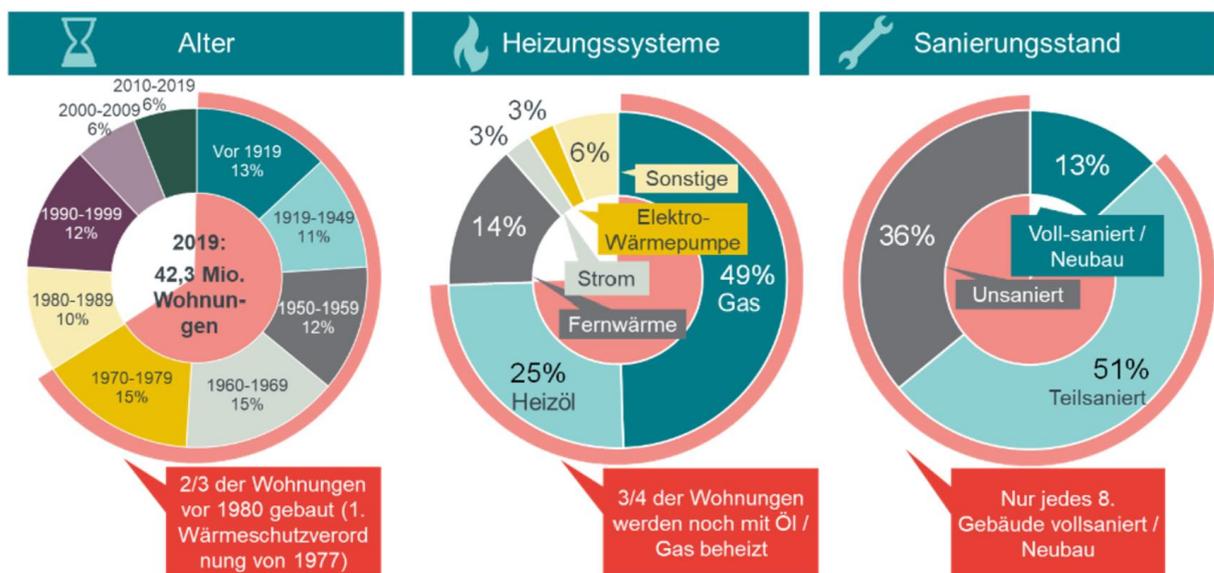
Wasserstoff-Brennzellenantriebe eignen sich eher für schwerere Nutzfahrzeuge wie LKW, Busse, Züge, etc.

³⁸ Vgl. BDI (2021b).

2.4.3 Wärmemarkt

Der Wärmemarkt umfasst die Bereitstellung „von Raumwärme (einschl. Raumkälte), Prozesswärme (einschl. Prozesskälte) und Warmwasser. Dies zeigt gleichzeitig, dass der Wärmemarkt für alle Bereiche unserer Volkswirtschaft – Industrie, Gewerbe und Handel bis hin zum Endverbraucher – von wesentlicher Bedeutung ist.“³⁹ Der Anteil für Wärme am Endenergieverbrauch lag im Jahre 2018 bei insgesamt 55,6%, welcher am meisten in der Raum- und Prozesswärme genutzt wurde.⁴⁰ Im Bereich der Raumwärme werden die deutschen Heizungssysteme mit fossilen Energieträgern betrieben, welche sich aus 25% Heizöl und 49% Erdgas zusammensetzen.

Abbildung 12: Heizungsbestand in Deutschland



Quelle: Stiftung Energie & Klimaschutz (2022).

Ferner wurde die Studie „Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt“ von der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas veröffentlicht, welche dem Wasserstoff in der Wärmewende eine wichtige Rolle zuschreibt. In der Studie wird abgeleitet, dass die Stromerzeugungs- und Transportinfrastruktur nicht auf eine vollumfängliche Elektrifizierung des Wärmesektors ausgelegt ist. Demnach stellt der Einsatz von klimaneutralen Gasen wie

³⁹ BDEW (2015), S.3.

⁴⁰ Vgl. BDEW (2020a), S. 6.

beispielsweise grüner Wasserstoff eine gute Alternative dar, das zukünftige Stromsystem hinsichtlich Stromspitzenlasten zu entlasten.⁴¹

⁴¹ Vgl. Frontier Economics (2021), S. 5ff.

3. Ableitung des Importbedarfs für Wasserstoff in Deutschland auf Basis ausgewählter Studien

Um Tendenzen für die unterschiedlichen Bedarfsprognosen herzuleiten, werden sechs Studien analysiert. Hierbei wird die Wasserstoffnachfrage mit dem Wasserstoffangebot ins Verhältnis gebracht, um die Versorgungslücke an Wasserstoff zu identifizieren. Aus der Differenz zwischen Angebot und Nachfrage kann der Importbedarf für Deutschland abgeschätzt werden. Gleiches wird für die synthetischen Kraftstoffe bzw. PtL getätigt.

Die Studien können mit diversen Szenarien arbeiten, welche mögliche Entwicklungen unter unterschiedliche Annahmen und Unsicherheiten darstellen.

3.1 Nationale Wasserstoffstrategie 2020

Die NWS wurde am 10. Juni 2020 von Bundeswirtschaftsminister Peter Altmaier und seinen Kabinettskollegen eingeführt, mit dem Ziel den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland anzutreiben, um die Pariser Klimaschutzziele sowie die europäische Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Dafür setzt die Bundesrepublik auf klimaneutrale Energieträger wie dekarbonisierten (blauer, türkiser) und erneuerbaren (grüner) Wasserstoff und auf seine Folgeprodukte wie Methanol oder Ammoniak und hat ein Konjunkturpaket i.H.v. neun Milliarden Euro bereitgestellt. Davon werden sieben Milliarden Euro für den inländischen Hochlauf der Wasserstofftechnologien und zusätzliche zwei Milliarden für internationale Kooperationen bereitgestellt.⁴² Obwohl blauer und türkiser Wasserstoff nicht komplett emissionsfrei sind, sollen diese im Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland übergangsweise genutzt werden, um bereits regulatorische Weichen für den grünen Wasserstoff zu stellen.⁴³ Auf Dauer hingegen ist lediglich grüner Wasserstoff nachhaltig und emissionsfrei, welcher als Schlüsselement für das Gelingen der Energiewende beschrieben wird.

Bis 2030 prognostiziert die Bundesregierung einen Wasserstoffbedarf i.H.v. 90-110 TWh, welcher durch eine inländische Produktion von 14 TWh grünen Wasserstoff gedeckt werden kann. Hierbei sollen Erzeugungsanlagen mit einer Gesamtleistung von fünf GW bis 2030 in

⁴² Vgl. BMWi (2020), S.5.

⁴³ Vgl. BMWi (2020), S.5.

Betrieb gestellt werden und bis spätestens 2040 weitere fünf GW dazukommen.⁴⁴ Nach dieser Prognose ist Deutschland bei einem Mittelwert von 100 TWh Wasserstoff, auf 86 TWh Wasserstoff angewiesen. Für die Wasserstoffnachfrage der nächsten Jahre wurden keine eigenen Angaben getätigt.

Die Umsetzung des NWS soll institutionell innerhalb Deutschlands und unter der Eingliederung eines Wasserstoffrates, welcher aus 26 Mitgliedern besteht, die „über Expertisen in den Bereichen Erzeugung, Forschung und Innovation, Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Gebäude/Wärme, Infrastruktur, internationale Partnerschaften sowie Klima und Nachhaltigkeit verfügen (...)“⁴⁵, erfolgen. Schließlich werden 38 Maßnahmen festgehalten, wie die Versorgung mit Wasserstoff zukünftig gesichert werden kann. Die ersten 33 Maßnahmen beziehen sich dabei auf nationale Aktionen, welche die Themen Wasserstoffproduktion, Anwendungsbereichen im Verkehr-, in der Industrie- und im Wärmesektor, Infrastruktur und Versorgung sowie Forschung, Bildung und Innovationen berücksichtigen.⁴⁶ Die restlichen neun Maßnahmen decken den europäischen Handlungsbedarf und den internationalen Wasserstoffmarkt ab und verweisen auf die Wichtigkeit der Bildung von Wasserstoffpartnerschaften.⁴⁷

3.2 Boston Consulting Group 2021

Die Boston Consulting Group (BCG) ist eine Unternehmensberatung, welche das Gutachten „Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ für den Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) im Jahre 2021 erstellt hat. Hierbei wird der prognostizierte Wasserstoffbedarf für die Jahre 2030 und 2045 in Deutschland hergeleitet, bei dem zwischen der H₂- und PtL-Nachfrage differenziert wird.

Für das Jahr 2030 prognostiziert die BCG eine deutsche Wasserstoffnachfrage i.H.v. 43 TWh, welche sich zu 24 TWh für die Industrie, zu 8 TWh der Raffinerien, zu 10 TWh zum Verkehr und zu 1 TWh in Pilotprojekte aufteilen. Vor allem die Stahlproduktion und die Chemieindustrie werden auf den klimafreundlichen Wasserstoff setzen, um die CO₂-Emissionen zu minimieren.

⁴⁴ Vgl. BMWi (2020), S.7.

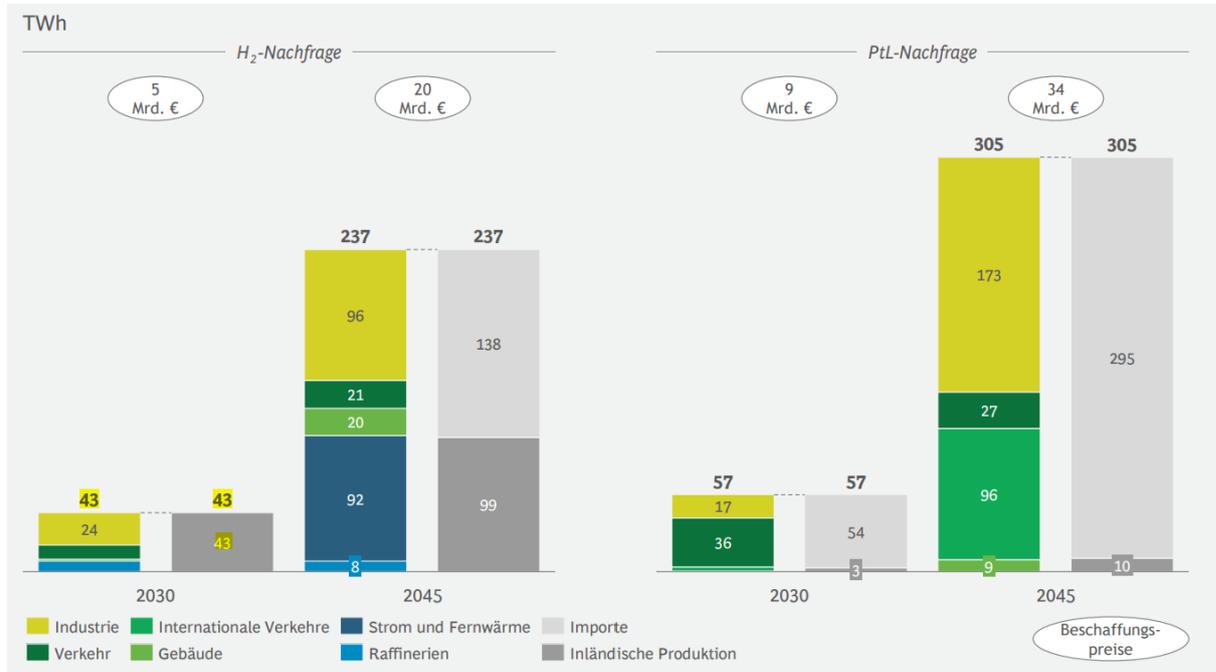
⁴⁵ BMWi (2020), S.17.

⁴⁶ Vgl. BMWi (2020), S. 19ff.

⁴⁷ Vgl. BMWi (2020), S. 29f.

Für die Produktion der 43 TWh grünen Wasserstoffs wird ein Strombedarf von 68 TWh benötigt.⁴⁸ Ein Großteil des Wasserstoffes sollte an den deutschen Küsten hergestellt und zu großen Industriezentren transportiert werden.⁴⁹

Abbildung 13: Wasserstoff und PtL-Nachfrage nach Sektoren und Anwendungen



Quelle: BCG (2021), S.165.

Nach den Angaben der Abbildung 13 kann im Jahre 2030 die nachgefragte Wasserstoffmenge zu 100% durch die inländische Produktion gedeckt werden. Somit wäre die Bundesrepublik für 2030 unabhängig von Importen.

Die geschätzte Wasserstoffnachfrage für 2045 liegt nach der Abbildung 13 bei 237 TWh, welche den größten Bedarfsanteil in der Industrie (96 TWh) und der Strom- und Fernwärme (92 TWh) benötigt. In der Prozessindustrie müssen große Anlagenparks ausgetauscht werden, um die industrielle Wärmeerzeugung bis 2045 klimaneutral zu gestalten.⁵⁰ Um grünen Wasserstoff in Deutschland zu produzieren, wird demnach eine große Menge an Strom benötigt, weshalb die Stromnachfrage bis 2045 stark ansteigen wird. Hinsichtlich der Fernwärme muss auf erneuerbare Energien umgestiegen werden, um langfristig auf fossile

⁴⁸ Vgl. BCG (2021), S.167.

⁴⁹ Vgl. BCG (2021), S.160.

⁵⁰ Vgl. BCG (2021), S. 83.

Brennstoffe zu verzichten. Mittels grünen Wasserstoffes und Kraftwärme-Kopplung-Anlagen kann Fernwärme erzeugt werden.⁵¹

Zusätzlich besteht eine Wasserstoffnachfrage in den Bereichen Verkehr (21 TWh), Gebäude (20 TWh) und Raffinerien (8 TWh). Hierbei wird lediglich von der Produktion vom grünen Wasserstoff gesprochen.

Während die Wasserstoffnachfrage im Jahr 2045 um mehr als das fünffache als im Jahr 2030 steigen soll, erhöht sich die inländische Produktion lediglich um mehr als das Zweifache. Demzufolge resultiert ein Nachfrageüberschuss an Wasserstoff i.H.v. 138 TWh (58%), der durch ausländische Importe gedeckt werden muss.

Auf der rechten Seite der Abbildung 13 ist die PtL-Nachfrage für die Jahre 2030 und 2045 zu erkennen. Im Jahr 2030 wird angenommen, dass der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen 57 TWh beträgt, welche zum Großteil im Verkehrs- (36 TWh) Industriesektor (17 TWh) verwendet wird. Die restlichen 4 TWh werden in Gebäuden (1 TWh) und im internationalen Verkehr für Seeschifffahrt und Flüge (3 TWh) benötigt.

Im gesamten Verkehrssektor besteht somit eine PtL-Nachfrage i.H.v. 39 TWh, welche sich in 35 TWh Straßenverkehr, 1 TWh nationaler Schienen-, Luft- und Seeverkehr und 3 TWh internationaler Luft- und Seeverkehr aufteilen.⁵² Von den 57 TWh lassen sich lediglich 3 TWh in Deutschland produzieren, was dazu führt, dass ein Importbedarf i.H.v. 54 TWh an synthetischen Kraftstoffen entsteht.

Für das Jahr 2045 wird eine PtL-Nachfrage von 305 TWh angenommen, die vor allem dem Industriesektor einen hohen Bedarf i.H.v. 173 TWh zugeschrieben wird. Die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen im internationalen Verkehr erhöht sich gegenüber 2030 enorm, in dem rund 96 TWh nachgefragt werden. Sowohl 10 TWh im nationaler Schienen-, Luft- und Seeverkehr als auch 17 TWh im Straßenverkehr vervollständigen das Verkehrsportfolio im Jahr 2045.⁵³ Dennoch schrumpft die PtL-Nachfrage im nationalen Verkehr von 36 TWh auf 27 TWh.

Synthetische Kraftstoffe werden in Gebäuden hingegen nur eine marginale Rolle mit 9 TWh spielen. Von den nachgefragten 305 TWh, können lediglich 10 TWh im Inland produziert werden. Somit ergibt sich ein Importbedarf i.H.v. 295 TWh für synthetische Kraftstoffe im Jahr 2045.

⁵¹ Vgl. BCG (2021), S. 169.

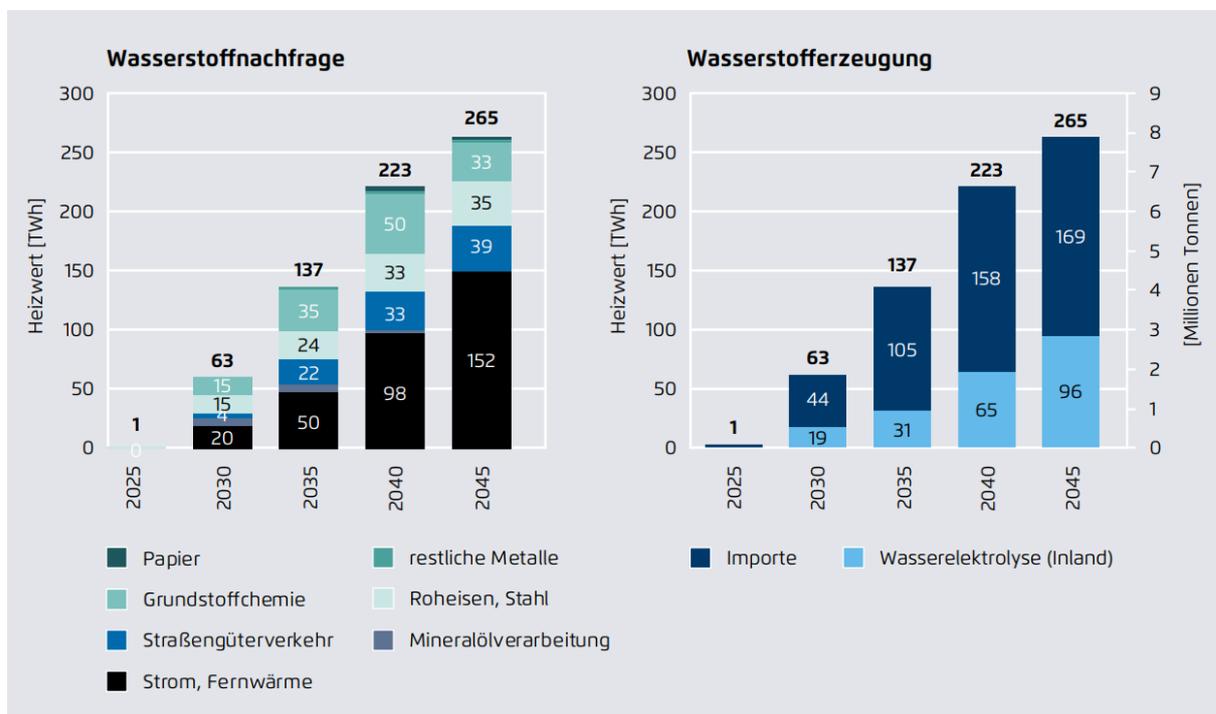
⁵² Vgl. BCG (2021), S. 123.

⁵³ Vgl. BCG (2021), S. 123.

3.3 Agora Energiewende 2021

Das Prognos Öko Institut und das Wuppertalerinstitut erstellten 2021 für die Agora Energiewende die Studie „Klimaneutrales Deutschland“, in dem die Wasserstoffnachfrage und das -angebot für die Jahre 2025 bis 2045 prognostiziert worden sind. Hierbei wird der Bedarf an Wasserstoff in den Sektoren Verkehr, Industrie und Energiewirtschaft (Kraftwerke und Raffinerien) abgedeckt und in der unteren Abbildung 14 visualisiert.

Abbildung 14: Wasserstoffherzeugung und -nutzung



Quelle: Agora (2021), S. 106.

Es ist es auffällig, dass ein klarer Markthochlauf des Wasserstoffes festzustellen ist, welcher eine Wasserstoffnachfrage von 1 TWh im Jahr 2025 bis 265 TWh Wasserstoff im Jahr 2045 erwartet. Im Zeitraum zwischen 2025 und 2045 wird angenommen, dass ein umfassendes Wasserstoff-Pipelinennetz um die energieintensiven Industrien neu errichtet oder auf bestehende Gasverteilernetze umgestellt wird, um diese mit Wasserstoff zu versorgen.⁵⁴

Die größten Anteile an Wasserstoff verzeichnen die Anwendungen Strom und Fernwärme, die 2030 20 TWh, im Jahr 2035 50 TWh, im Jahr 2040 98 TWh und 2045 rund 152 TWh

⁵⁴ Vgl. Agora (2021), S. 104.

Wasserstoff benötigen. Für die Residualstromerzeugung wird Erdgas durch Wasserstoff als wichtigster Energieträger abgelöst, um die Ziele der Klimaneutralität zu erreichen.⁵⁵

Ferner wird der Industrie (Grundstoffchemie und die Roheisen- und Stahlerzeugung) ein großer Nachfrageanteil zugeschrieben, welche „vorwiegend zur Direktreduktion von Eisenerz (...), als Rohstoff in der Grundstoffchemie und zur Erzeugung von Prozessdampf“ dienen soll.⁵⁶ Entlang des Markhochlaufs des Wasserstoffes ist ein kontinuierlicher Zuwachs zu erkennen, der bei der Roheisen- und Stahlherstellung von 15 TWh im Jahr 2030 bis auf 25 TWh im Jahr 2045 steigt. Bis 2040 steigt die Grundstoffchemie von 15 TWh auf 50 TWh stark an, ehe sie im Jahr 2045 um 17 TWh absinkt, da die Dampferzeugung teilweise von Wasserstoff auf Biomasse umgestellt wird.⁵⁷

Neben der Industrie wird im Verkehrssektor ein großer Wasserstoffbedarf herrschen, um Wasserstoff in den Brennstoffzellen von Last- und Sattelzügen sowie in kleineren Mengen in Nutzfahrzeugen zu nutzen.⁵⁸

Weiterhin nimmt der Wasserstoffbedarf im Straßengüterverkehr hinsichtlich des Jahresverlauf von 4 TWh im Jahr 2030 auf 39 TWh im Jahr 2045 zu.

Auf der rechten Seite der Abbildung 14 kann der Anteil der inländischen Wasserstoffherzeugung per Wasserelektrolyse abgelesen werden. Auffällig ist, dass nur ein geringer Anteil in Deutschland produziert werden kann, was dazu führt, dass die Bundesregierung auf ausländische Importe angewiesen sein wird. Weniger als die Hälfte des nachgefragten Wasserstoffes kann im Inland selbst produziert werden, was anhand der Abbildung 14 klar erkenntlich ist. Für die Jahre 2030 können 19 TWh, für 2035 31 TWh für 2040 65 TWh und für das Jahr 2045 96 TWh Wasserstoff inländisch per Elektrolyse hergestellt werden. In der Studie wird lediglich davon ausgegangen, dass grüner Wasserstoff in Deutschland produziert wird. Die blaue und türkise Wasserstoffgewinnung wird zwar in Betracht gezogen, aber hat nach der Studie keine sehenswerte Zukunft. Dennoch scheint es wahrscheinlich, blauen Wasserstoff als Übergangslösung aus Norwegen zu importieren.⁵⁹

Bezüglich der PtL-Nachfrage hat die Agora Energiewende lediglich Daten für die Jahre 2030 und 2045 erhoben. Während die PtL-Nachfrage im Jahr 2030 bei 1 TWh liegt, werden im Jahr

⁵⁵ Vgl. Agora (2021), S. 14.

⁵⁶ Vgl. Agora (2021), S. 23.

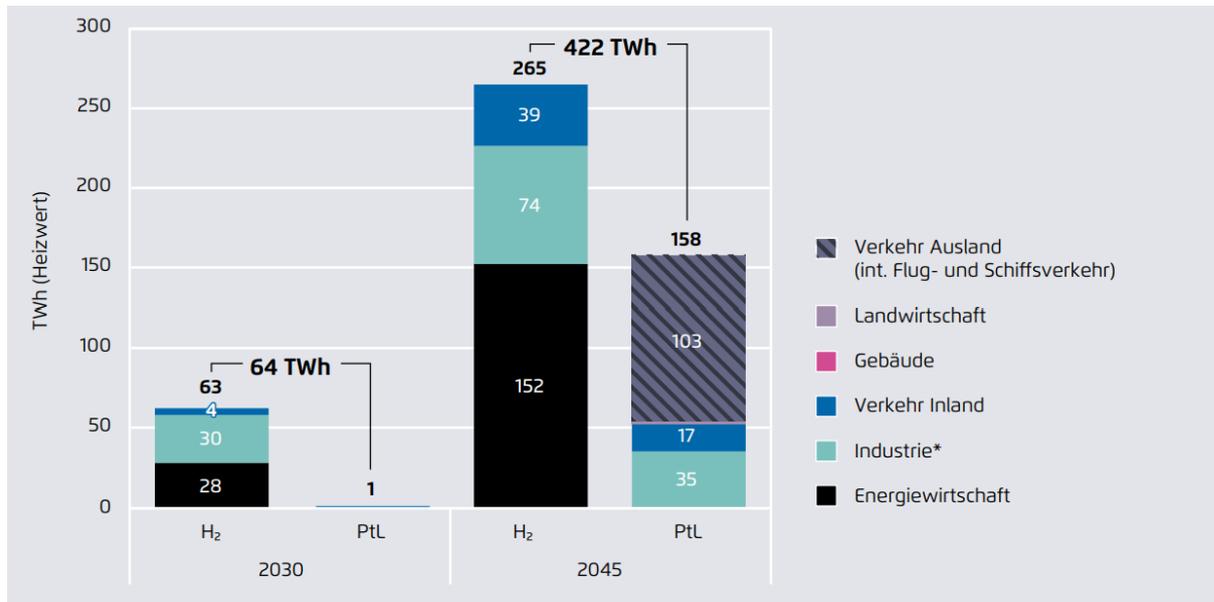
⁵⁷ Vgl. Agora (2021), S. 104.

⁵⁸ Vgl. Agora (2021), S. 24.

⁵⁹ Vgl. Agora (2021), S. 104f.

2045 voraussichtlich 158 TWh benötigt. Den größten Anteil der synthetischen Kraftstoffe wird der internationale Verkehr mit 103 TWh einnehmen, welcher für Flugzeuge und Schiffsfahrten geeignet ist. 17 TWh sind hingegen für den inländischen Verkehr angedacht.

Abbildung 15: H₂- und PtL-Nachfrage für die Jahre 2030 und 2045



Quelle: Agora Energiewende (2021), S. 108.

Weiterhin beträgt die PtL-Nachfrage in der Industrie im Jahr 2045 rund 35 TWh, in dem grünen Naphtha (Rohbenzin) und Methanol als Grundlage für die stoffliche Nutzung eingesetzt wird.⁶⁰ Von der gesamten PtL-Nachfrage im Jahr 2030 und 2045, kann laut dieser Studie keine einzige TWh selbst im Inland hergestellt werden. Demzufolge ergibt sich ein Wasserstoff- und ein PtL-Bedarf für 2045 i.H.v. 422 TWh, bei dem 326 TWh aus dem Ausland importiert werden muss.⁶¹

3.4 Fraunhofer ISE 2021

Das Fraunhofer ISE hat die Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die Deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen“ im Jahr 2021 publiziert, welche vier Szenarien untersuchte. Das Szenario „Suffizienz“ berücksichtigt eine starke Senkung des deutschen Energieverbrauchs durch gesellschaftliche

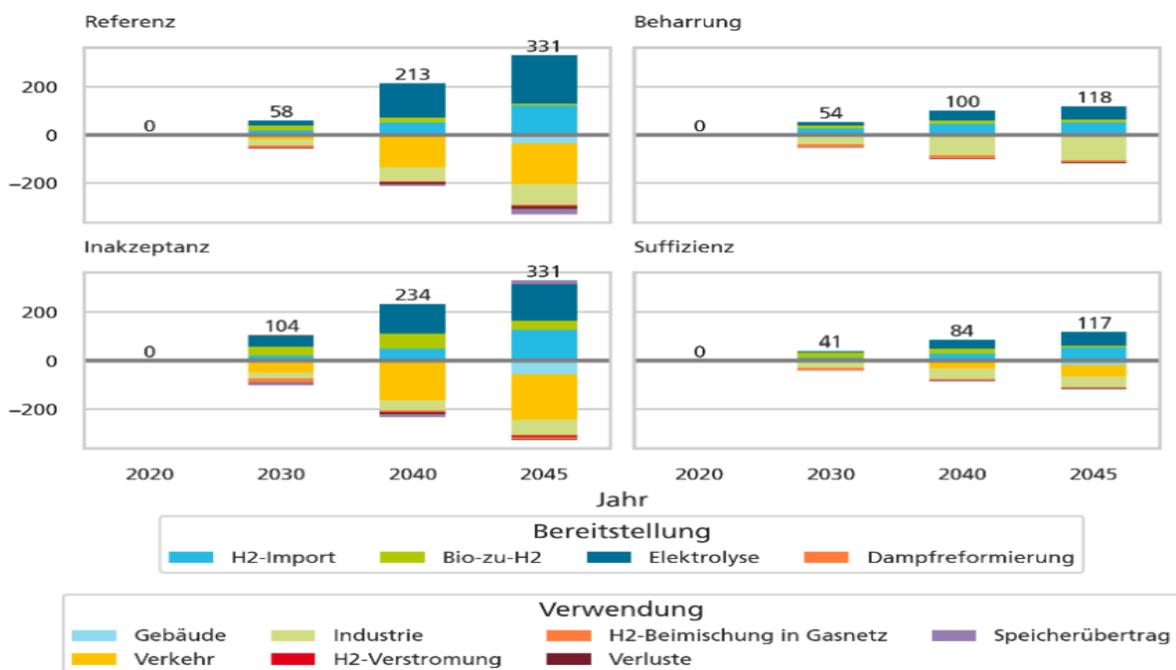
⁶⁰ Vgl. Agora (2021), S. 107.

⁶¹ Vgl. Agora (2021), S. 108.

Verhaltensänderungen, das Szenario „Inakzeptanz“ berücksichtigt den Widerstand gegen den Ausbau großer Infrastrukturmaßnahmen, das Szenario „Beharrung“ setzt weiterhin auf den Betrieb von konventionellen Technologien und das Szenario „Referenz“ nimmt keine zusätzlich fördernden oder erschwerende Entwicklungen an.⁶² Hierbei werden sowohl die Bedarfe an Wasserstoff als auch für die PtL ermittelt.

Im Anhang befindet sich ein Excel-Blatt (Anhang 1), bei dem der Leser die genauen Werte für die Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff und PtL der vier diversen Szenarien wieder finden kann. Während die Bereitstellung bzw. das Angebot des Wasserstoffes sich oberhalb der x-Achse im positiven Bereich befindet, liegen die Werte für die Verwendung bzw. Nachfrage unterhalb der x-Achse im negativen Bereich.

Abbildung 16: Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff



Quelle: ISE (2021), S. 27.

Vier verschiedene Szenarien führen zu verschiedenen Wasserstoffnachfragen im Zeitraum von 2030 bis 2045. Die beiden Szenarien Referenz und Inakzeptanz streben nach einem höheren Wasserstoffbedarf, da der Ausbau der erneuerbaren Energien für heimische Elektrolyseure mehr Flexibilität bringt, Wasserstoff auch im Inland zu produzieren. In den Szenarien Beharrung und Suffizienz hingegen wird eine geringere Nachfrage erwartet, weil

⁶² Vgl. Fraunhofer ISE (2021), S.7

der Verkehrssektor über synthetische flüssige Energieträger dekarbonisiert wird.⁶³ Dementsprechend werden nicht alle vier Szenarien grundlegend analysiert, sondern lediglich die Szenarien Referenz und Beharrung. In allen vier Szenarien wird hauptsächlich grüner Wasserstoff als Grundlage der Studie verwendet. Der biogene Wasserstoff (Bio-zu-H₂) bietet sich lediglich als Übergangslösung an, aber wird nach 2030 nur eine geringe Rolle in der Wasserstoffwirtschaft in dieser Studie haben.⁶⁴

Im Szenario Referenz wird eine Wasserstoffnachfrage von 58,3 TWh erwartet, die sich hinsichtlich der Verwendung in den Sektoren und Anwendungen Verkehr, Industrie und H₂-Beimischung in das Gasnetz aufteilen. Hinsichtlich der Bereitstellung von Wasserstoff werden für das Angebotspotenzial in Deutschland die Wasser-Elektrolyse und die Bio-zu-H₂ in Betracht genommen. Letzteres meint den biogenen Wasserstoff, welcher direkt aus Biomasse gewonnen wird. Im Jahr 2030 können von den nachgefragten 58,3 TWh, 20,3 TWh durch Elektrolyse und 18 TWh durch biogenen Wasserstoff im Inland produziert werden. Hinsichtlich der Verwendung des Wasserstoffes wird angenommen, dass die Industrie mit 24,9 TWh größter Nachfrager sein wird, bei dem der Wasserstoff vor allem in der Stahlerzeugung und in der Prozesswärme bereitgestellt wird.⁶⁵

Der Verkehrssektor verzeichnet einen Bedarf von 19,2 TWh, bei dem der Wasserstoff „in Antriebssystemen mit Brennstoffzellen verwendet“⁶⁶ wird. 11,2 TWh Wasserstoff sollen hingegen ins Gasnetz beigemischt werden. Die Speicherübertragung (1,9 TWh) und die Verluste (1 TWh) von Wasserstoff machen insgesamt 2,9 TWh aus. Aus der Differenz zwischen Angebot und Nachfrage ergibt sich ein Importbedarf i.H.v. 20 TWh für das Jahr 2030.

Für das Jahr 2040 verzeichnet die inländische Wasserstoffproduktion per Elektrolyse einen gewaltigen Anstieg auf 142,5 TWh, welcher dem siebenfachen von vor vor zehn Jahren entspricht. Der biogene Wasserstoff steigt hingegen nur leicht auf 20,7 TWh auf. Insgesamt können 2040 163,3 TWh inländisch produziert werden. Bezüglich der Nachfrage ist es auffällig, dass der Bedarf an Wasserstoff im Verkehrssektor (127,8 TWh) deutlich höher liegt als der vom Industriesektor (57,4 TWh). Ein Grund dafür wurde in der Studie nicht gegeben.

⁶³ Vgl. Fraunhofer ISE (2021), S. 26f.

⁶⁴ Vgl. ISE (2021), S. 27.

⁶⁵ Vgl. ISE (2021), S. 27.

⁶⁶ ISE (2021), S. 27.

Während der Bedarf in den Gebäuden auf 6,8 TWh steigt, sinkt die H₂-Beimischung von 11,2 TWh auf 6,5 TWh.

Da angenommen wird, dass der Bedarf von Wasserstoff zwischen 2030 und 2040 deutlich steigt, erhöht sich demnach auch die Speicherübertragung (7,5 TWh) sowie die Verluste (7,1 TWh.)

Für das Jahr 2045 ergibt sich eine nachgefragte Menge i.H.v. 330,9 TWh, welche sich vor allem im Verkehrs- (172,1 TWh) und Industriesektor (83,8 TWh) widerspiegelt. Innerhalb von fünf Jahren steigt der H₂-Bedarf von Gebäuden deutlich auf 34,5 TWh, während die H₂-Beimischung ins Erdgasnetz immer weiter auf 3,6 TWh schrumpft.

Weiterhin erhöhen sich auch die Werte für die Speicherübertragung (24,2 TWh) und Verluste (10,1 TWh) im Jahr 2045.

Während die inländische Produktion durch die Elektrolyse auf 201,3 TWh ansteigt, fällt die Produktion des biogenen Wasserstoffes auf 6,8 TWh ab, da dieser nur als Übergangslösung angedacht war. Somit entsteht aus Nachfrage und Angebot ein Importbedarf i.H.v. 122,8 TWh für das Jahr 2045.

Im Szenario Suffizienz wird die geringste Menge an Wasserstoff im Jahre 2030 i.H.v. 40,5 TWh erwartet, da der Endenergieverbrauch durch gesellschaftliche Veränderungen sinkt und somit weniger Wasserstoff nachgefragt wird. Der größte Anteil am Wasserstoffverbrauch hat der Industriesektor mit 24,4 TWh, dicht gefolgt von der H₂-Beimischung ins Erdgasnetz i.H.v. 11,3 TWh. Der Verkehrssektor verzeichnet lediglich einen Verbrauch von 4 TWh und die Gebäude 0,4 TWh. Die Herstellung des biogenen Wasserstoffes i.H.v. 21,8 TWh übersteigt das Angebot der Elektrolyse von 6,6 TWh. Demzufolge entsteht ein Importbedarf von 12,1 TWh.

Im Jahr 2040 gewinnt der Verkehrssektor immer mehr an Bedeutung und erfordert 25,2 TWh an Wasserstoff und versechsfacht die Nachfrage gegenüber 2030. Die Industrie verdoppelt fast ihre Nachfrage auf 43,2 TWh und bleibt größter Abnehmer des Wasserstoffes. Die H₂-Beimischung ins Erdgasnetz verliert wie im Szenario Referenz an Bedeutung und kommt auf eine Nachfrage von 6,4 TWh. Der Wasserstoffbedarf in den Gebäuden steigt hingegen von 0,4 auf 7,2 TWh stark an, welcher für Brennstoffzellenheizungen genutzt wird.⁶⁷ Somit entsteht ein Wasserstoffbedarf i.H.v. 84,4 TWh, welche durch 54,9 TWh an deutsches Angebot gedeckt werden kann. Dieser setzt sich erneut aus dem biogenen Wasserstoff,

⁶⁷ Vgl. ISE (2021), S. 27.

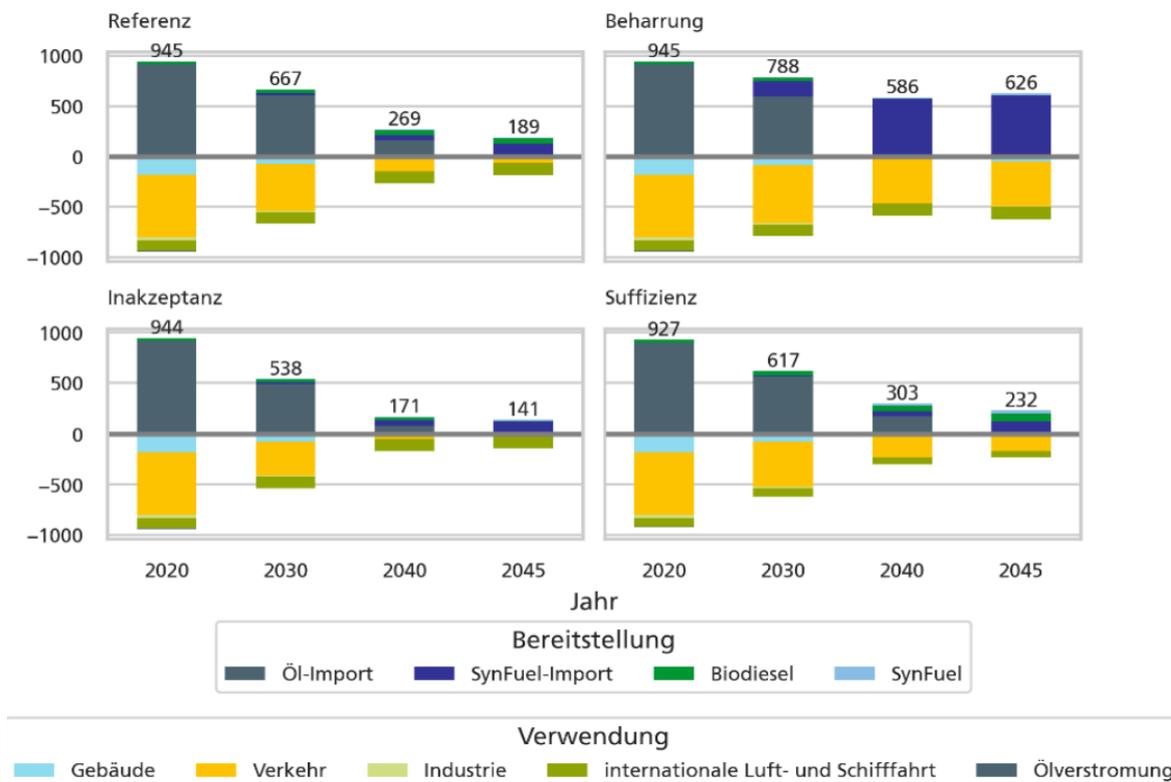
welcher leicht auf 20,4 TWh sinkt, und der Elektrolyse zusammen, der deutlich von 6,6 TWh auf 34,5 TWh ansteigt. Ein Importbedarf i.H.v 29,5 TWh entsteht.

Im Jahr 2045 übersteigt die Nachfrage des Verkehrssektors mit 48 TWh den Industriesektor mit 44,3 TWh, welcher nur leicht gestiegen ist. Während der Gebäudesektor auf 17,5 TWh angestiegen ist, verzeichnet die H₂-Beimischung erneut einen Rückgang auf 3,6 TWh. 116,6 TWh werden demnach im Jahr 2045 von den Sektoren nachgefragt. Hinsichtlich des Angebots fällt die Produktion des biogenen Wasserstoffes auf 9 TWh ab, während die Elektrolyse weiter auf 52,5 TWh steigt. Es resultiert für das Jahr 2045 ein Importbedarf i.H.v. 55 TWh und ist somit deutlicher kleiner als dieser vom Szenario Referenz (122,5 TWh).

Die restlichen Werte für die Speicherübertragung und die Verluste können im Anhang nachgelesen werden.

Hinsichtlich der Bereitstellung und Verwendung von Flüssigkraftstoffen fällt in der unteren Abbildung 17 auf, dass bei allen vier Szenarien die Ölimporte zwischen 2020-2045 stark zurückgehen, um die Ziele der Klimaneutralität zu erreichen. In keinem der vier Szenarien beträgt der Ölimport im Jahre 2045 mind. 1 TWh. Die PtL-Nachfrage ist zwar nicht explizit ausgeschrieben, aber sie lässt sich durch die Addition von SynFuel und Synfuel-Import berechnen. Wie auch hier wird im Anhang eine Excel-Liste (Anhang 2) mit den genauen Werten für die Bereitstellung und für die Verwendung dargestellt.

Abbildung 17: Bereitstellung und Verwendung von Flüssigkraftstoff in TWh



Quelle: Fraunhofer ISE (2021), S. 45.

Der größte Anteil am Import des synthetischen Treibstoffes wird im Szenario Beharrung identifiziert, welcher 2030 150 TWh, 2040 574,5 TWh und 2045 609,5 TWh beträgt. Lediglich ein geringer Teil kann im Inland hergestellt werden, der für die Jahre 2030 4,9 TWh, 2040 11,7 TWh und 2045 15,7 TWh angenommen wird. Der größte Nachfrager ist der Verkehrssektor mit einem Bedarf von 446,2 TWh im Jahr 2045, gefolgt von der internationalen Luft- und Schifffahrt mit 125,9 TWh. Der Anteil des synthetischen Kraftstoffes in Gebäuden beträgt 48 TWh und ist wesentlich besser ausgeprägt als der Industriesektor, welcher nur 5,4 TWh nachfragt. Da im Szenario Beharrung weiter auf konventionelle Technologien wie „an das Festhalten von Verbrennungsmotoren und Gaskesseln“⁶⁸ gesetzt wird, kann das Ziel der Treibhausgasneutralität schwieriger erreicht werden. Dementsprechend sind die Nachfrage und der Import nach synthetischen Kraftstoffen in der Zukunft so hoch.

Im Szenario Inakzeptanz beträgt der Importbedarf für das Jahr 2030 bei 20 TWh, 2040 bei 50 TWh und 2045 bei 125 TWh. Nur ein kleiner Teil davon kann im Inland produziert werden,

⁶⁸ ISE (2021), S. 29.

der die 10 TWh-Marke nicht überschreitet. Es ist auffällig, dass die komplette PtL-Nachfrage lediglich im nationalen und internationalen Verkehr und nicht in der Industrie und in den Gebäuden benötigt wird. Der größte Abnehmer ist hierbei die internationale Luft- und Seeschifffahrt, welche im Jahr 2045 125,9 TWh nachfragt.

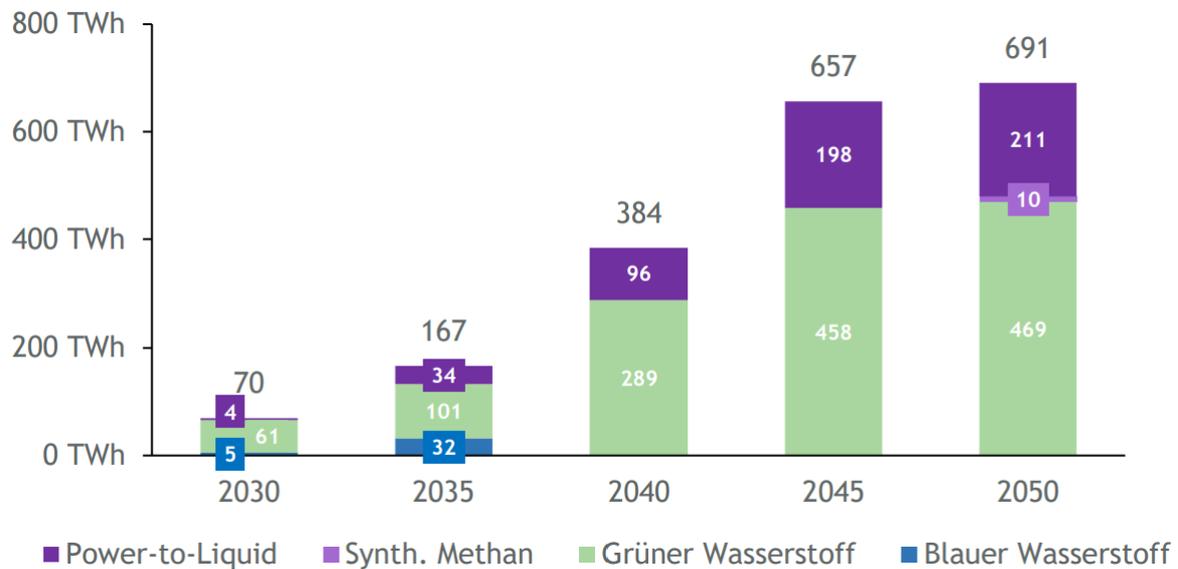
3.6 Dena Leitstudie 2021

Das energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) erstellte im Oktober 2021 den Gutachtenbericht „Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems“ für die deutsche Energie-Agentur (Dena) mit dem Ziel, wie die Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland erreicht werden kann. Diese Leitstudie orientiert sich vor allem am Klimaschutzgesetz 2021 und berücksichtigt sowohl „die sektorspezifischen Treibhausgasminderungsziele für das Jahr 2030 auch die sektorenübergreifenden Minderungsziele in den Folgejahren.“⁶⁹

Hierbei wird die Nachfrage von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten für die Jahre 2030 bis 2050 in Deutschland in der unteren Abbildung 18 visualisiert. Die Abbildung zeigt nicht welche Menge an Wasserstoff in den folgenden Jahren von welchen Sektoren verwendet wird, sondern differenziert bei der Nachfrage lediglich zwischen grünem und blauem Wasserstoff.

⁶⁹ Vgl. Dena (2021), S.7.

Abbildung 18: Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten



Quelle: Dena (2021), S. 118.

In der Dena-Leitstudie ist ebenso ein klarer Markthochlauf von 2030 (70 TWh) bis 2050 (691 TWh) zu erkennen. Es ist auffällig, dass der blaue Wasserstoff lediglich in den Jahren 2030 (5 TWh) und 2035 mit einem Anteil von 32 TWh präsent ist. Laut des exogenen Transformationspfades wird in Deutschland hingegen kein blauer Wasserstoff in der Industrie hergestellt, was aber nicht bedeutet, dass kein blauer Wasserstoff aus dem Ausland importiert werden darf.⁷⁰

Der grüne Wasserstoff hingegen nimmt im fünf-Jahres-Takt eine immer wichtigere Rolle ein, da dieser nachhaltig und emissionsfrei ist. Nach der Abbildung 42 in der Dena-Leitstudie wird der Hochlauf des Wasserstoffbedarfs im Industriesektor zwischen 2030 bis 2050 veranschaulicht. Die größten Wasserstoffnachfrager sind die Chemie- sowie die Eisen- und Stahlindustrie, die mehr als die Hälfte des Bedarfs nachfragen. Der Gesamtbedarf nach Wasserstoff im Industriesektor liegt im Jahr 2030 bei 52 TWh, 2035 bei 94 TWh, 2040 bei 138 TWh, 2045 bei 190 TWh und 2050 bei 192 TWh.⁷¹

Hinsichtlich des Verkehrssektors erhöht sich die Wasserstoffnachfrage im Jahr 2030 von 9 TWh über die Jahre 2035 auf 19 TWh, 2040 auf 37 TWh, 2045 59 TWh und bis 2050 auf 75

⁷⁰ Vgl. Dena (2021), S119.

⁷¹ Vgl. Dena (2021), S. 67.

TWh.⁷² Die größten Nachfrager sind schwere Lastkraftwagen mit einem Gewicht von über 12 Tonnen, die deutlich mehr als die Hälfte der nachgefragten Menge benötigen.⁷³

Darüber hinaus wird Wasserstoff im Gebäude- sowie Strom- und Wärmesektor eine wichtige Rolle zugeschrieben. Während der Wasserstoffverbrauch im Gebäudesektor im Jahr 2030 bei 5 TWh liegt, steigt dieser im Jahre 2045 auf 79 TWh.⁷⁴ Für das Jahr 2045 sind im Strom- und Wärmesektor 130 TWh geplant. Für die Jahre davor wurden keine Angaben getätigt.

Darüber hinaus wird in der Abbildung 18 die PtL-Nachfrage zwischen 2030 und 2050 abgebildet, bei dem angenommen wird, dass die Luftfahrt der größte Abnehmer sein wird, welcher im Jahr 2030 3 TWh und im Jahr 2045 108 TWh synthetisches Kerosin nachfragt.⁷⁵

Für die Jahre 2035 und 2050 wurden keine Angaben getätigt, in welchem Ausmaß die PtL-Nachfrage in den jeweiligen Sektoren an Bedeutung hat.

Im Straßenverkehr wird hingegen im Jahr 2030 lediglich 1 TWh und 2045 30 TWh Wasserstoff verwendet.⁷⁶

Ferner wird im Jahr 2045 51 TWh grünes Naphtha (Rohbenzin) in der chemischen Industrie benötigt, um Aromaten und Olefine herzustellen.⁷⁷ Im Gebäudesektor wird im Jahr 2045 lediglich 9 TWh synthetisches Heizöl nachgefragt.⁷⁸

Bezüglich der Wasserstofferzeugung in Deutschland unterscheidet die Dena-Leitstudie in der unteren Abbildung 19 zwischen der inländischen Wasserstoffproduktion und dem Importbedarf von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten aus Europa und Nicht-Europa für die Jahre 2030-2050.

⁷² Vgl. Dena (2021), S. 43.

⁷³ Vgl. Dena (2021), S. 44.

⁷⁴ Vgl. Dena (2021), S. 80.

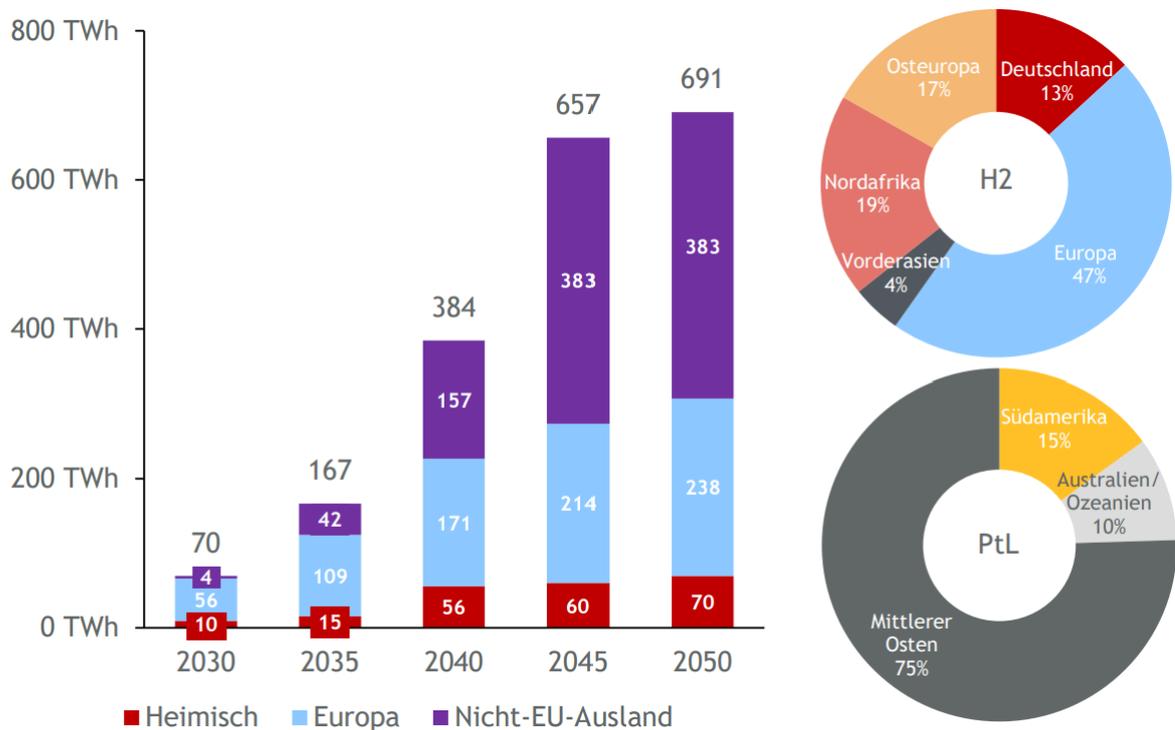
⁷⁵ Vgl. Dena (2021), S. 119f.

⁷⁶ Vgl. Dena (2021), S. 119.

⁷⁷ Vgl. Dena (2021), S.120.

⁷⁸ Vgl. Dena (2021), S.120.

Abbildung 19: Angebotspotenzial und Herkunft von Wasserstoff und Folgeprodukten



Quelle: Dena (2021), S. 120.

In der Dena-Leitstudie wird angenommen, dass kein PtL in Deutschland produziert werden kann, da andere Herkunftsländer deutlich kompetitivere Gesteungskosten aufweisen. Außerdem können PtL aufgrund der hohen Energiedichte gut per Schiff transportiert werden und brauchen kein neues Pipeline-Netz.⁷⁹ Einerseits können in den Jahren 2030 10 TWh, 2035 15 TWh, 2040 56 TWh, 2045 60 TWh und 2050 70 TWh Wasserstoff inländisch produziert werden. Der Sprung von 15 TWh auf 56 TWh zwischen 2035 und 2040 ist der Größte und weist einen Anstieg von 273% auf. Auf der anderen Seite entsteht ein Importbedarf für Wasserstoff und seine Derivate für die Jahre 2030 i.H.v. 60 TWh, 2035 152 TWh, 2040 328 TWh, 2045 597 TWh und 2050 621 TWh.

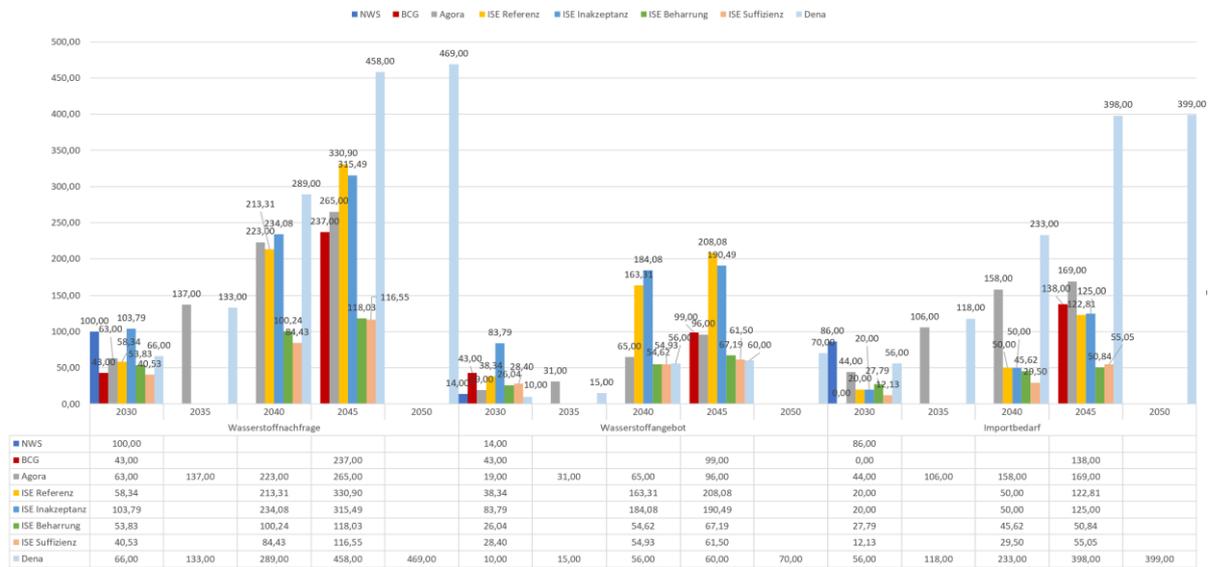
Die Dena-Leitstudie geht davon aus, dass der größte Anteil der Importe von Wasserstoff aus Europa stammen wird. Bei dem PtL-Import hingegen wird dieser größtenteils aus dem mittleren Osten kommen. In Kapitel 4.3 wird dieses Szenario näher erläutert.

⁷⁹ Vgl. Dena (2021), S. 120f.

3.7 Zusammenfassung der Studien – Der resultierende Importbedarf

Nach der Analyse der diversen Studien, kann die Wasserstoffnachfrage, das -angebot sowie der Importbedarf zusammenfassend visualisiert werden. Hierbei werden die erhobenen Daten der Studien im zeitlichen Verlauf zwischen 2030 und 2050 sowohl für den Wasserstoff als auch für die synthetischen Kraftstoffe mit Hilfe von Excelgrafiken abgebildet.

Abbildung 20: Wasserstoffnachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland



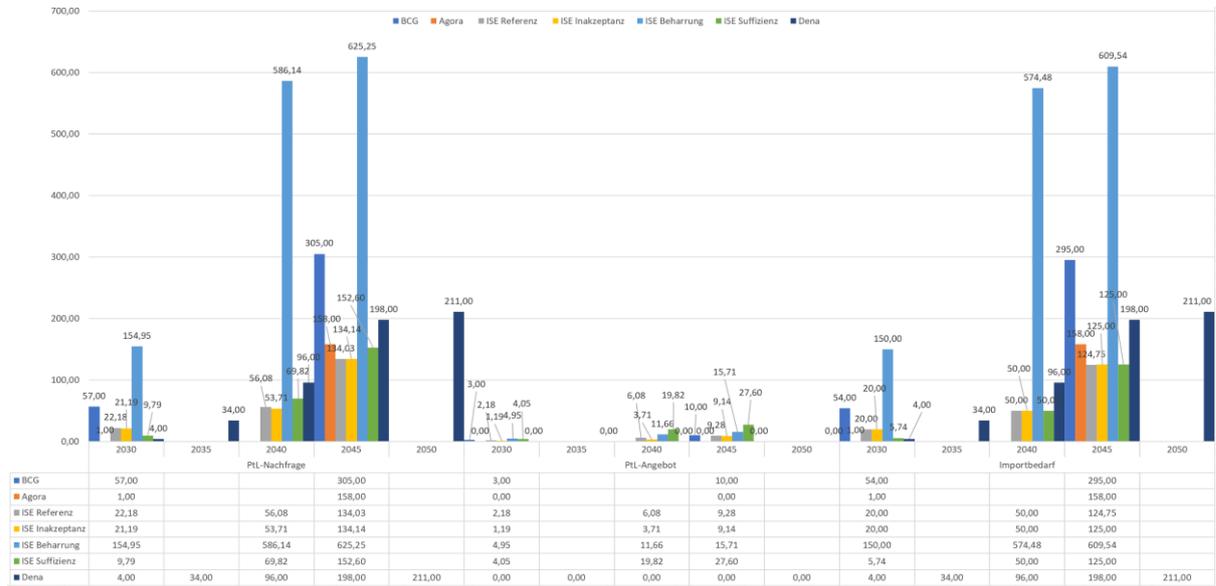
Quelle: Eigene Darstellung via Excel.

Es ist auffällig, dass vor allem die Szenarien ISE Beharrung und die ISE Suffizienz des Fraunhofer ISE die kleinsten Werte im Markthochlauf aufzeigen. Das liegt daran, dass diese beiden Szenarien weniger Wasserstoff in Zukunft nachfragen und eher einen starken Zuwachs nach synthetischen Kraftstoffen im Verkehrssektor erwarten.

Lediglich in der Dena-Leitstudie konnten die Wasserstoffbedarfe im fünf-Jahres-Takt ausgewertet und in der obigen Abbildung 20 visualisiert werden. Die restlichen Studien und Szenarien berücksichtigen hingegen andere Jahresangaben, was dazu führt das nicht jede Studie in diesem fünf-Jahres-Takt miteinander verglichen werden kann. Die meisten ausgewerteten Daten finden sich im Jahr 2030 und im Jahr 2045 wieder, die in Kapitel vier noch einmal genutzt werden.

Darauffolgend ist der PtL-Bedarf für die verschiedenen Studien und Szenarien ebenso visualisiert worden.

Abbildung 21: PtL-Nachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland

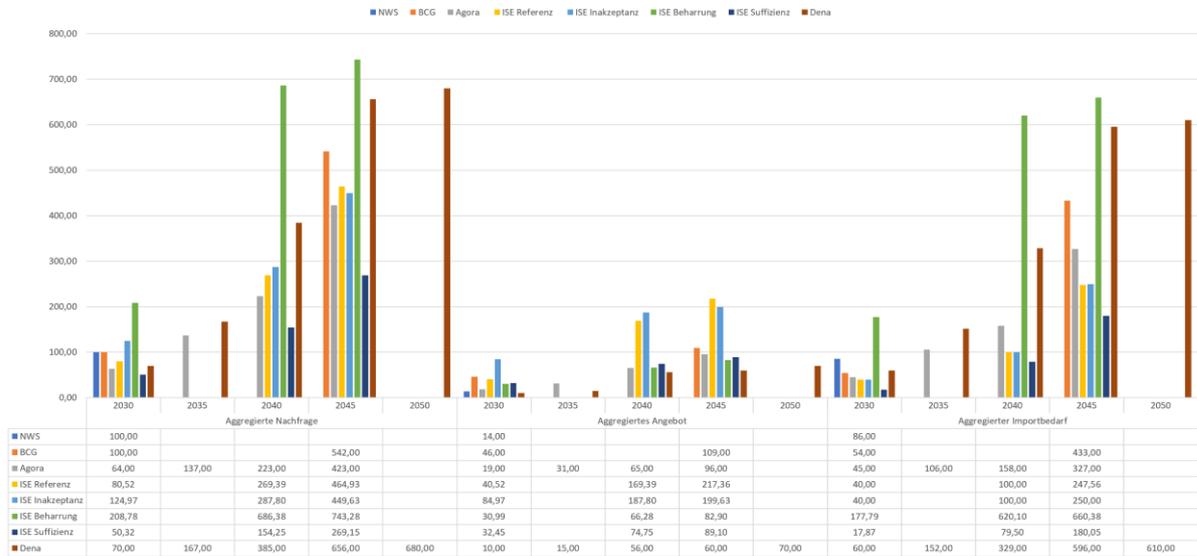


Quelle: Eigene Darstellung via Excel.

Hier kann deutlich erkannt werden, dass der Bedarf der Fraunhofer-Studie ISE Beharrung deutlich herausragt, da in diesem Szenario konventionelle Technologien, wie Verbrennungsmotoren und Gaskesseln, in Zukunft weiterhin genutzt werden. Das führt dazu, dass die Nachfrage und der Import von synthetischen Kraftstoffen weiter sehr hoch bleiben wird. Weiterhin ist es auffällig, dass die synthetischen Kraftstoffe kaum bzw. gar nicht in Deutschland hergestellt werden.

In der nächsten Abbildung ist die Nachfrage, das Angebot und der Importbedarf aggregiert hinsichtlich des H₂ und des PtL zusammenfassend abgebildet.

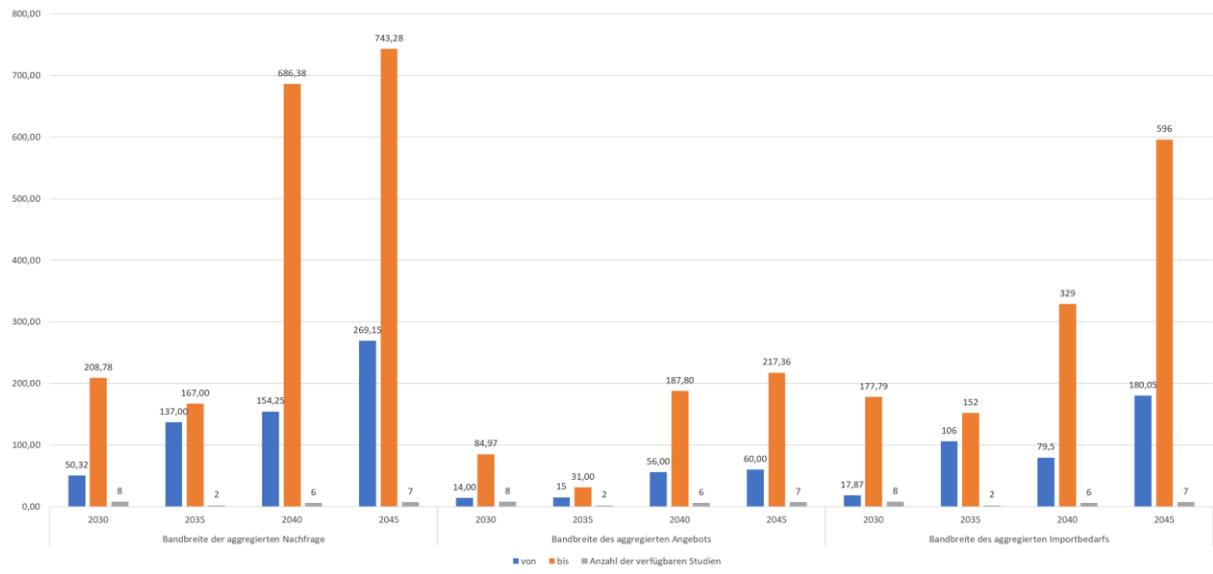
Abbildung 22: H₂- und PtL-Nachfrage und -angebot sowie Importbedarf für Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung via Excel.

Somit ist ein klarer Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland zu erkennen, da die Wasserstoffnachfrage in den kommenden Jahren steigen wird, um die Ziele der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Jede Studie kommt zu einem unterschiedlichen Ergebnis und es kann nicht gesagt werden, welche Menge an Wasserstoff Deutschland exakt in Zukunft erwarten wird. Dennoch können Bandbreiten zu dem aggregierten Bedarf in der unteren Abbildung 23 erstellt werden, um dem Leser die Informationen zu vermitteln, in welchen Studien pro Jahresangabe am wenigsten und am meisten nachgefragt, produziert und importiert wird.

Abbildung 23: Bandbreite der H₂- und PtL-Nachfrage, des -angebots und des Importbedarfs



Quelle: Eigene Darstellung via Excel.

Im Jahre 2030 wurden acht diverse Studien und Szenarien ausgewertet, bei dem die ISE Suffizienz mit 50,32 TWh die geringste Wasserstoffnachfrage erwartet. Den höchsten Bedarf weist hingegen die ISE Beharrung mit 208,78 TWh auf, welcher viermal höher als die ISE Suffizienz liegt. Bei der inländischen Wasserstofferzeugung beträgt das kleinste Angebot 14 TWh, welches in der NWS zu finden ist. Die höchste Wasserstoffproduktion dagegen stellt die ISE Inakzeptanz dar, welche insgesamt 84,97 TWh 2030 herstellen kann.

Da die ISE Suffizienz die niedrigste Wasserstoffnachfrage aufweist, stellt diese auch den niedrigsten Importbedarf im Jahre 2030 mit 17,87 TWh auf. Ebenso andersrum erwartet die ISE Beharrung mit der höchsten Nachfrage auch den höchsten Importbedarf i.H.v.177,79 TWh.

Während die ISE Suffizienz Studie erneut die geringste Wasserstoffnachfrage im Jahr 2045 mit 269,15 TWh aufweist, weist die ISE Beharrung mit 742,28 TWh weiterhin die höchste Wasserstoffnachfrage auf. Die Dena-Leitstudie prognostiziert mit 60 TWh die geringste inländische Wasserstoffproduktion, während die ISE Referenz mit 217,36 TWh die höchste Wasserstoffgewinnung im Inland aufzeigt. Mit 660,38 TWh ist die ISE Beharrung auch auf die größten Wasserstoffimporte angewiesen.

4. Deckung des Importbedarfs durch verfügbare Importe

In diesem Kapitel erfährt der Leser aus welchen Regionen und Ländern Deutschland zukünftig Wasserstoff und seine Folgeprodukte beziehen kann. Weiterhin werden Importzahlen für Deutschland quantifiziert, um herauszufinden, ob die deutsche Nachfrage durch ausländische Importe gedeckt werden kann. Schließlich werden Wasserstoffangebot und Wasserstoffnachfrage in einem Schalendiagramm gegenübergestellt, um einen Abgleich zu erstellen.

4.1 Potenzial der vielversprechendsten Importregionen und -länder

Im letzten Kapitel hat der Leser erfahren, dass Deutschland auf ausländische Importe angewiesen ist, da die inländische Wasserstoffproduktion nicht ausreicht, um die langfristige Nachfrage decken zu können.

Ein wichtiges Argument, welches nicht unberücksichtigt bleiben darf, ist der hohe Strompreis in Deutschland. Nach Zahlen des europäischen Statistikamts Eurostat kostete die Kilowattstunde im Jahr 2021 31,93 Cent.⁸⁰ Damit ist die Bundesregierung Spitzenreiter beim Strompreis in Europa, während der Durchschnittspreis in Europa bei 22,03 Cent pro Kilowattstunde lag.⁸¹ Weltweit gibt es mehrere Regionen, in denen der erneuerbare Strom kostengünstig hergestellt werden kann, da diese von hohen Sonneneinstrahlungen und günstigen Windbedingungen profitieren. Dementsprechend ist Deutschland in den letzten Jahren bereits auf einige Wasserstoffpartnerschaften eingegangen, um die Wasserstoffnachfrage kostengünstiger beziehen und decken zu können.

Die Adelphi consult GmbH hat im Jahr 2020 die Kurzanalyse „Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland“ veröffentlicht. Hierbei konzentriert sich die Studie lediglich auf den Import von grünem Wasserstoff in den Jahren 2030 und 2050.⁸² Bis 2030 kommen die Lieferanten in Frage, welche die Möglichkeiten haben zeitnah und kostengünstig Wasserstoff nach Deutschland hinsichtlich niedriger Herstellungs- und Transportkosten sowie einen vorteilhaften politischen ökonomischen Rahmen zu

⁸⁰ Vgl. Eurostat (o.J.).

⁸¹ Vgl. Eurostat (o.J.).

⁸² Vgl. Adelphi consult GmbH et al. (2020), S.3.

importieren.⁸³ In der unteren Abbildung 24 sind die geeignetsten Länder für das Jahr 2030 aufgelistet.

Abbildung 24: Geeignete Herkunftsländer von grünem Wasserstoff (Perspektive 2030)

<u>Höchste Eignung:</u>	Island, Kanada, Marokko, Norwegen, Tunesien, Türkei.
<u>Gute Eignung:</u>	Ägypten, Algerien, Argentinien, Australien, Brasilien, Chile, Indien, Kasachstan, Katar, Kenia, Neuseeland, Oman, Russland, Saudi-Arabien, Südafrika, Ukraine, USA, VAE.
<u>Weitere geeignete Länder:</u>	Äthiopien, China, Iran, Mexiko, Namibia, Nigeria.

Quelle: Adelphi consult GmbH et al. (2020), S. 5.

Aufgrund der geringen Distanz zu Deutschland, eignen sich besonders Norwegen und Marokko Lieferanten bis 2030 zu werden, da der grüne Wasserstoff kostengünstig durch Pipelines nach Deutschland importiert werden kann.⁸⁴ Mit beiden Ländern ist Deutschland bereits auf eine Wasserstoffpartnerschaft eingegangen.

Im Jahr 2020 unterzeichnete Deutschland ein Wasserstoff-Abkommen mit Marokko, „welches die gemeinsame Entwicklung der Erzeugung von grünem Wasserstoff, den Bau einer Wasserstoffproduktionsanlage sowie die Einrichtung von Forschungs- und Investitionsprojekten zu dessen Nutzung in Marokko und der Bundesrepublik Deutschland festlegt.“⁸⁵ Hierfür wurden bereits Mittel i.H.v. 300 Millionen Euro zugesagt, um aus Marokko grünen Wasserstoff beziehen zu können.

Auch mit Norwegen hat Deutschland im Jahr 2022 eine Wasserstoff-Zusammenarbeit vereinbart, um unabhängiger vom russischen Erdgas zu werden. In einer Machbarkeitsstudie will Norwegen weiterhin ermitteln, ob der Bau einer zusätzlichen Wasserstoff-Pipeline nach Deutschland sinnvoll ist und „welche Rolle blauer Wasserstoff als Übergang auf den Weg zu grünem Wasserstoff spielen kann.“⁸⁶

Neben den Anforderungen bis 2030, spielen zusätzlich die Kriterien Flächenrestriktionen für EE-Anlagen (erneuerbare Energien) und Elektrolyseure, Restriktionen durch Wasser und Exportrestriktionen durch Eigenenergiebedarf eine entscheidende Rolle, um grünen

⁸³ Vgl. Adelphi consult GmbH, S. 4f.

⁸⁴ Vgl. Adelphi consult GmbH et al. (2020), S. 5.

⁸⁵ Ghorfa (2020).

⁸⁶ BMWK (2022).

Wasserstoff langfristig bis 2050 in großen Mengen nach Deutschland zu importieren.⁸⁷ Im der unteren Abbildung sind die vielversprechendsten Länder bis 2050 nach den o.g. Punkten aufgelistet.

Abbildung 25: Geeignete Herkunftsländer von grünem Wasserstoff (Perspektive 2050)

<u>Höchstes Potenzial:</u>	Ägypten, Algerien, Argentinien, Australien, Kanada, Kasachstan, Russland, Saudi-Arabien.
<u>Gutes Potenzial:</u>	Äthiopien, Brasilien, Chile, Iran, Island, Kenia, Marokko, Mexiko, Namibia, Nigeria, Norwegen, Oman, Südafrika, USA.
<u>Weiteres Potenzial:</u>	China, Indien, Katar, Neuseeland, Tunesien, Türkei, Ukraine, VAE.

Quelle: Adelphi consult GmbH et al. (2020), S. 5.

Hinsichtlich des Kriteriums Flächenrestriktionen EE-Anlagen und Elektrolyseure, haben die o.g. Länder Norwegen und Marokko eine geringere Fläche in Quadratkilometern wie beispielsweise Algerien, Australien, Kanada, Russland und Saudi-Arabien vorzuweisen.⁸⁸ Je größer die Fläche eines Landes ist, desto höher kann die Wasserstoffproduktion erfolgen. Dies bedeutet auch, dass diese großen Länder langfristig mehr grünen Wasserstoff als Norwegen und Marokko exportieren können, ohne die Deckung des eigenen Energiebedarfs zu gefährden.

In der unteren Abbildung 26 wurden die Länder mit der kleinsten Bevölkerungsdichte aufgezeigt, die als potenzielle Importeure für Deutschland in Frage kommen und mit Farben markiert.

⁸⁷ Vgl. Adelphi consult GmbH et al. (2020), S. 5.

⁸⁸ Vgl. Adelphi consult GmbH et al. (2020), S. 5.

Abbildung 26: Weltweite Bevölkerungsdichte

Land (> 10 Mio. Einw.)	Einwohner	je km ²	Land (1 bis 10 Mio. Einw.)	Einwohner	je km ²
Australien	19,3 Mio.	3	Mongolei	2,6 Mio.	2
Kanada	31,0 Mio.	3	Namibia	1,8 Mio.	2
Kasachstan	16,1 Mio.	6	Mauretanien	2,7 Mio.	3
Russ. Föderation	144,7 Mio.	8	Botsuana	1,6 Mio.	3
Niger	11,2 Mio.	9	Libyen	5,4 Mio.	3
Mali	11,7 Mio.	9	Gabun	1,3 Mio.	5
Saudi-Arabien	21,0 Mio.	10	Zentralafrik. Republik	3,8 Mio.	6
Angola	13,5 Mio.	11	Tschad	8,1 Mio.	6
Sudan	31,8 Mio.	13	Bolivien	8,5 Mio.	8
Algerien	30,8 Mio.	13	Kongo (Brazzaville)	3,1 Mio.	9
Argentinien	37,5 Mio.	14	Turkmenistan	4,8 Mio.	10
Sambia	10,6 Mio.	14	Papua-Neuguinea	4,9 Mio.	11
Brasilien	172,6 Mio.	20	Oman	2,6 Mio.	12
Peru	26,1 Mio.	20	Paraguay	5,6 Mio.	14
Chile	15,4 Mio.	20	Norwegen	4,5 Mio.	14
Kongo	52,5 Mio.	22	Neuseeland	3,8 Mio.	14
Mosambik	18,6 Mio.	23	Somalia	9,2 Mio.	14
Venezuela	24,6 Mio.	27	Finnland	5,2 Mio.	15
Madagaskar	16,4 Mio.	28	Uruguay	3,4 Mio.	19
Vereinigte Staaten von Amerika	285,9 Mio.	31	Schweden	8,8 Mio.	20
Kamerun	15,2 Mio.	32	Laos	5,4 Mio.	23
Simbabwe	12,9 Mio.	33	Kirgistan	5,0 Mio.	25
Afghanistan	22,5 Mio.	34	Liberia	3,1 Mio.	28
Jemen	19,1 Mio.	36	Estland	1,4 Mio.	31
Südafrika	43,8 Mio.	36	Eritrea	3,8 Mio.	32
Kolumbien	42,8 Mio.	38	Ver. Arab. Emirate	2,7 Mio.	32
Tansania	36,0 Mio.	38	Guinea	8,3 Mio.	34
Burkina Faso	11,9 Mio.	43	Guinea Bissau	1,2 Mio.	34
Iran	71,4 Mio.	43	Lettland	2,4 Mio.	37
			Panama	2,9 Mio.	38
			Nicaragua	5,2 Mio.	40
			Tadschikistan	6,1 Mio.	43

Quelle: PDWB (o.J.).

Zum Vergleich zu den anderen Ländern hat Deutschland eine Bevölkerungsdichte von 233 km².⁸⁹

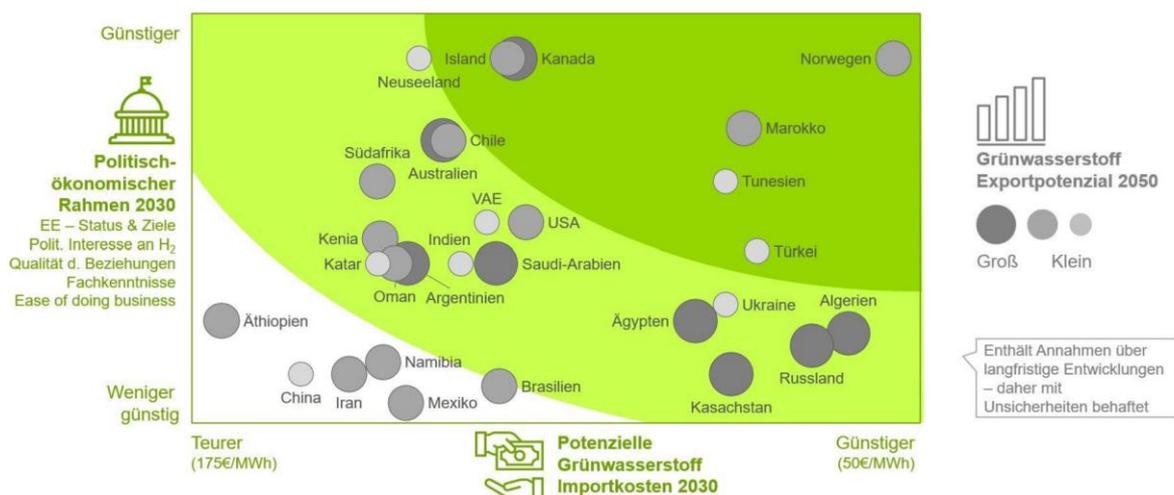
Neben den Flächenrestriktionen spielt die Wasserversorgung der möglichen Importländer für Deutschland eine wichtige Rolle, da in der Norm für 1 Kilogramm Wasserstoff 9 Liter Wasser

⁸⁹ Vgl. Destatis (o.J.).

benötigt werden.⁹⁰ Wenn angenommen wird, dass 3 Kilogramm Wasserstoff rund 100 kWh Energie beinhalten, dann müssten für 100 TWh Wasserstoff 3 Milliarden Kilogramm Wasserstoff hergestellt werden, welche 27 Milliarden Liter bzw. 27 Millionen Kubikmeter Wasser im Produktionsprozess verbrauchen. Mit dieser Menge an Wasser könnten fast 580.000 Einwohner Deutschlands mit Wasser jährlich versorgt werden. Dies konnte berechnet werden, in dem herausgefunden worden ist, dass durchschnittlich jeder deutsche Einwohner rund 128 Liter Wasser pro Tag verbraucht⁹¹, welches sich auf einen jährlichen Wasserverbrauch bei einer Einwohnerzahl von 83,2 Millionen Menschen⁹² auf 3,89 Billionen Liter bzw. 3,89 Milliarden Kubikmeter Wasser im Jahr beläuft. Für wasserarme Regionen und Länder können Wasserentsalzungsanlagen in Kombination mit erneuerbaren Energien eine Möglichkeit darstellen, Meerwasser statt Trinkwasser für die Wasserstoffproduktion zu verwenden.

Zusammenfassend hat die Adelphi consult GmbH in der unteren Abbildung 27 die möglichen internationalen Kooperationsziele für Deutschland mittelfristig (2030) bis langfristig (2050) erarbeitet, welche die besten Voraussetzungen für den Import von grünem Wasserstoff aufzeigen.

Abbildung 27: Mögliche internationale Kooperationsziele von grünem Wasserstoff für Deutschland von 2030 bis 2050



Quelle: Adelphi consult GmbH et al. (2020), S.6.

⁹⁰ Vgl. Greenpeace Energy EG (2020), S. 26.

⁹¹ Vgl. Destatis (2022a).

⁹² Vgl. Destatis (2022b).

Während auf der x-Achse die günstigsten Importländer für grünen Wasserstoff in €/MWh vorkommen, wird auf der y-Achse der Stand des politischen-ökonomischen Rahmens begutachtet. Die Größe und die Farbenintensität des Kreises beschreibt das Exportpotenzial für grünen Wasserstoff nach Deutschland. Je größer der Kreis ist, desto höher ist das Exportpotenzial.

So weisen Norwegen und Marokko die besten Voraussetzungen auf, bei dem das Exportpotenzial bis 2050 allerdings nur mittelmäßig ist. Länder wie Kanada oder Australien haben günstige politisch-ökonomische Rahmenbedingungen, sind aber aufgrund der großen Entfernung teurer als Russland oder Algerien, die wiederum nicht so günstige Rahmenbedingen aufweisen.

In der unteren Abbildung werden die Länder der „Middle-East and North Africa (MENA)“-Region aufgezeigt, die ein enormes Potenzial aufweisen, Wasserstoff nach Deutschland zu transportieren.

Abbildung 28: MENA-Region



Quelle: Stiftung Mercator GmbH (2021).

Die MENA-Region umfasst die Länder Nordafrikas und des Nahen Ostens, welche im nächsten Kapitel im Detail betrachtet werden.

Es ist wichtig anzumerken, dass Deutschland bisher noch nicht mit allen abgebildeten Ländern der Adelphi eine Wasserstoffpartnerschaft vereinbart hat. Dennoch ist es

empfehlenswert die Importe so weit wie möglich zu diversifizieren, um unabhängiger von einzelnen Ländern agieren zu können.

4.2 Vorgehen zur Herleitung der Verfügbarkeit von Wasserstoff

Es ist schwierig, offizielle Zahlen zu den Exportpotenzialen der möglichen Importeure für Deutschland zu finden, da kein Land Informationen veröffentlicht, welche Menge an Wasserstoff diese in Zukunft inländisch erzeugen können, welche Menge davon sie selbst für den Eigenverbrauch benötigen und welcher Anteil davon für Deutschland zur Verfügung bereitstünde.

In den vorhandenen nationalen Wasserstoffstrategien haben die jeweiligen Länder über ihren eigenen Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft detailliert gesprochen. Exporte wurden in den Strategien nicht bzw. kaum im Detail erläutert.

Um dennoch die Höhe des zukünftigen Angebots an klimafreundlichen Gasen für Deutschland zu ermitteln, wurde die erst kürzlich veröffentlichte Studie im Auftrag vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) von der Frontier Economics veröffentlicht. Hierbei werden drei Szenarien der mittel- und langfristigen Verfügbarkeit von Wasserstoff für die Jahre 2030 und 2045 abgeschätzt, welche lediglich Pipelinetransporte aus allen europäischen Ländern und der MENA-Region untersucht.⁹³ Die Studie betrachtet hierbei blauen, türkisen und grünen Wasserstoff, sowie Biomethan als klimafreundliche Gase. Biomethan wird hierbei nicht berücksichtigt.

Im pessimistischen Szenario wird davon ausgegangen, dass der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft langsam vorangeht und konservative Rahmenbedingungen ausgelegt sind. Letzteres meint, dass beispielsweise blauer und türkiser Wasserstoff nicht seitens der Bundesregierung akzeptiert werden.⁹⁴

Im Base Case Szenario wird von einer disruptiven Veränderung für den zukünftigen Wasserstoffmarkt wie bei dem Photovoltaik-Boom in den Jahren 2008 bis 2012 gesprochen, da global eine neue Technologie hochgefahren wird, die bereits heute auf EE-Anlagentechnologie und Elektrolyse zurückgreifen kann. Demzufolge werden die formulierten und angenommenen Daten der nationalen Wasserstoffstrategie nach oben korrigiert. Zusätzlich wird angenommen, dass Pipelines umgerüstet bzw. weitere Pipeline

⁹³ DVGW (2022), S. 12f.

⁹⁴ DVGW (2022), S.13.

errichtet werden, welche pro Pipeline rund 80 bis 90 TWh pro Jahr Wasserstoff nach Deutschland bei einer Übertragungsleistung von 13 Gigawatt und 6000 bis 7000 Nutzungsstunden pro Jahr importieren können.⁹⁵ Ferner werden erste Mengen an blauen und türkisen Wasserstoff angenommen.

Das optimistische Szenario vermutet einen noch schnelleren Markthochlauf des grünen Wasserstoffes und nimmt einen wesentlich höheren Anteil an blauen und türkisen Wasserstoff in Betracht, da Deutschland ausreichend Methan und Lagerstätte für CO₂ aufweist.⁹⁶

Hinsichtlich der Herleitung des potenziellen Angebots in den Herkunftsländern wird angenommen, dass das technische EE-Potenzial für Wasserstoff im Jahr 2030 bei 3% liegt „(d.h. 97% der EE-Landespotenziale werden nicht für Wasserstoff genutzt).“⁹⁷ Bei Ländern wie Norwegen und den Niederlanden, welche einen schnelleren Markthochlauf anstreben, wird das EE-Potenzial von 3 % auf 5 % nach oben korrigiert.

Als „faire share“ wird die europäische Wasserstoffproduktion bezeichnet, die für Deutschland zur Verfügung steht. Dieser wurde mittels der Energienachfrage von Deutschland mit der gesamteuropäischen ins Verhältnis gesetzt, welcher bei 15-20 % liegt. Direkte Nachbarstaaten von Deutschland erhalten einen Exportanteil von 15 %, nicht direkte Nachbarstaaten werden lediglich 8 % der inländischen Wasserstoffproduktion an Deutschland abgeben. Länder, die eine gute Netzanbindung zu Deutschland aufweisen wie zum Beispiel die Niederlande, Belgien, Polen, Ukraine, Russland und Weißrussland, werden mit einem Prozentsatz von 5 % aufgeschlagen.⁹⁸

In der unteren Abbildung 29 sind die o.g. Punkte erneut zum besseren Verständnis visualisiert worden, die sich nach den drei besprochenen Szenarien aufteilen.

⁹⁵ DVGW (2022), S. 13f.

⁹⁶ Vgl. DVGW (2022), S. 14.

⁹⁷ DVGW (2022), S. 15.

⁹⁸ Vgl. DVGW (2022), S. 15.

Abbildung 29: Herleitung des prognostizierten Angebotspotenzials für Wasserstoff (Perspektive 2030)

Grüner H2	Pessimistisch	Base case	Optimistisch
Geplante Projekte DE	5 GW Elektrolyse	10 GW Elektrolyse	15 GW Elektrolyse
Nachbarländer	3% RES Potenzial für H2, davon 15% nach DE	3% RES Potenzial für H2, davon 15% nach DE	3% RES Potenzial für H2, davon 15% nach DE
Andere europ. Länder		3% RES Potenzial für H2, davon 8% nach DE	3% RES Potenzial für H2, davon 8% nach DE
MENA			3% RES Potenzial für H2, davon 8% nach DE
Länder mit beschleunigtem Ausbau (Norwegen, Niederlande)	2 Prozentpunkte RES Potenzial mehr für H2	2 Prozentpunkte RES Potenzial mehr für H2	2 Prozentpunkte RES Potenzial mehr für H2
Länder mit Gasnetzvorteil (Belgien, Niederlande, Polen, Belarus, Russland, Ukraine)	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE

Quelle: DVGW (2022), S. 16.

In der Abbildung steht hierbei RES für Renewable Energy System und meint das EE-Länderpotenzial.

Im Gegensatz zum Jahr 2030 erhöhen sich sowohl die Elektrolysekapazitäten als auch die Prozentpunkte im zeitlichen Verlauf wie unten in der Abbildung 30 zu sehen ist.

Abbildung 30: Herleitung des prognostizierten Angebotspotenzials für Wasserstoff (Perspektive 2045)

Grüner H2	Pessimistisch	Base case	Optimistisch
Geplante Projekte DE	25 GW Elektrolyse***	40 GW Elektrolyse***	60 GW Elektrolyse***
Nachbarländer	9% RES-E Potenzial für H2, davon 15% nach DE	9% RES-E Potenzial für H2, davon 15% nach DE	9% RES-E Potenzial für H2, davon 15% nach DE
Andere europ. Länder		9% RES-E Potenzial für H2, davon 10% nach DE	9% RES-E Potenzial für H2, davon 10% nach DE
MENA			9% RES-E Potenzial für H2, davon 10% nach DE
Länder mit beschleunigtem Ausbau (Norwegen, Niederlande)	4 Prozentpunkte RES-E Potenzial mehr für H2	4 Prozentpunkte RES-E Potenzial mehr für H2	4 Prozentpunkte RES-E Potenzial mehr für H2
Länder mit Gasnetzvorteil (Belgien, Niederlande, Polen, Belarus, Russland, Ukraine)	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE	5 Prozentpunkte Produktion mehr für DE

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Geplante Projekte DE nach dena (2021), Agora Energiewende (2021) und Fraunhofer ISE (2020)

Quelle: DVGW (2022), S. 22.

Anstatt 3 % RES-Länderpotenzial im Jahr 2030 wurden 9 % im Jahr 2045 angenommen, welches lediglich für die Nutzung der Produktion von Wasserstoff verwendet wird. Weiterhin erhöht sich die Importquote sowohl der anderen europäischen Länder als auch der MENA-

Abbildung 31: Prognostiziertes Angebotspotenzial für Wasserstoff (Perspektive 2030)

Grüner H2	Pessimistisch	Base case	Optimistisch
Geplante Projekte DE	10 TWh	34,74 TWh	84,97 TWh
Nachbarländer	48 TWh	48 TWh	49 TWh*
Andere europ. Länder	-	98 TWh	100 TWh*
MENA	-	-	302 TWh

* Da im optimistischen Szenario optimistischere Input-Kostenannahmen getroffen werden, verändert sich das optimale Verhältnis von RES zu Elektrolysekapazität. Die gleichbleibende RES-Kapazitätsnutzung führt im Optimum zu einem leicht veränderten H2-Output.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DVGW (2022), S. 17.

Im pessimistischen Szenario würde Deutschland im Jahre 2030 lediglich 10 TWh gemäß der Dena-Leitstudie Wasserstoff inländisch produzieren können. 48 TWh grünen Wasserstoff würde die Bundesrepublik aus den Nachbarländern erhalten. Die Nachbarländer Deutschlands sind Dänemark, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Frankreich, Schweiz, Österreich, Tschechien und Polen. Welcher dieser Länder Deutschland mit Wasserstoff beliefert, bleibt in der Studie unbeantwortet. Niederlande wird hierbei ein großer Anteilseigner sein, da sie ambitionierte Wasserstoffstrategien aufweisen.⁹⁹ Dabei kämen blauer und türkiser Wasserstoff, aufgrund der restriktiven Verhaltensweise der Bundesregierung, nicht in Frage und würden 0 TWh betragen. Zusammenfassend würde das Angebotspotenzial bei 58 TWh liegen.

Im Base Case Szenario wird der Mittelwert für die inländische Wasserstoffproduktion benutzt, welcher rund 34,74 TWh Wasserstoff beträgt. Während die Importmenge bei den Nachbarländern bei 48 TWh gleich bleibt, wird das Angebotsportfolio durch andere europäische Länder, die nicht an Deutschland grenzen, ergänzt. Diese können 2030 rund 98 TWh grünen Wasserstoff nach Deutschland importieren. Auch hier erfährt der Leser nicht, welche konkreten Länder gemeint sind. Gewiss ist, dass Norwegen als großer Bereitsteller sowohl von blauem als auch grünem Wasserstoff eintritt.¹⁰⁰ Ferner wird im Base Case Szenario vermutet, dass der Bundesregierung 20 TWh türkiser und 100 TWh blauer Wasserstoff bereitgestellt wird, da auch andere Wasserstofftechnologien hinsichtlich der Klimaschutzbemühungen akzeptiert werden, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in

⁹⁹ Vgl. DVGW (2022), S.15.

¹⁰⁰ Vgl. DVGW (2022), S.15.

Deutschland zu beschleunigen.¹⁰¹ Somit entsteht insgesamt ein Angebotspotenzial i.H.v. 300,74 TWh.

Im optimistischen Szenario hingegen stammt der höchste Wert der erhobenen Daten aus der Fraunhofer ISE Inakzeptanz Studie, der bei 84,97 TWh Wasserstoff liegt. Das gleichbleibende EE-Länderpotenzial von 3% verändert den Wasserstoff-Output nur marginal. Dementsprechend erhöht sich das Angebotspotenzial bei den Nachbarländern um 1 TWh nach oben sowie um 2 TWh bei den anderen europäischen Ländern. Das Angebotsportfolio wird im optimistischen Szenario um die Importe der MENA-Region ergänzt, welche insgesamt 302 TWh Wasserstoff per Pipeline nach Deutschland transportieren können. Ferner könnte 50 TWh türkiser und 100 TWh blauer Wasserstoff bereitgestellt werden.¹⁰² Somit entsteht ein Angebotspotenzial i.H.v. 685,97 TWh.

Nachdem das prognostizierte Wasserstoff-Angebotspotenzial für Deutschland im Jahr 2030 ausgearbeitet worden ist, erhält der Leser Informationen über das prognostizierte Angebotspotenzial für das Jahr 2045. Ebenso hier wird der niedrigste und höchste Angebotswert sowie der Mittelwert aus den analysierten Studien entnommen.

Abbildung 32: Prognostiziertes Angebotspotenzial für Wasserstoff (Perspektive 2045)

Grüner H2	Pessimistisch	Base case	Optimistisch
Geplante Projekte DE	60 TWh	122 TWh	217,36 TWh
Nachbarländer	154 TWh	154 TWh	159 TWh*
Andere europ. Länder	-	387 TWh	400 TWh*
MENA	-	-	1229 TWh

* Da im optimistischen Szenario optimistischere Input-Kostenannahmen getroffen werden, verändert sich das optimale Verhältnis von RES zu Elektrolysekapazität. Die gleichbleibende RES-Kapazitätsnutzung führt im Optimum zu einem leicht veränderten H2-Output.

Quelle: DVGW (2022), S. 23.

Auffällig ist es, dass die Staffelung der Szenarien wie im Jahr 2030 gleichbleibt, was bedeutet, dass im pessimistischen Szenario lediglich Nachbarländer Deutschland mit Wasserstoff versorgen, im Base Case Szenario andere europäische Länder hinzukommen und

¹⁰¹ Vgl. DVGW (2022), S.28.

¹⁰² Vgl. DVGW (2022), S.28.

im optimistischen Fall das Angebotsportfolio zusätzlich durch die MENA-Region ergänzt wird.

Abbildung 33: Potenzial für blauen und türkisen Wasserstoff (Perspektive 2045)

Blauer / Türkiser H2	Pessimistisch	Base case	Optimistisch
Produktion + Angebot blauer H2		150 TWh*	200 TWh*
Produktion + Angebot türkiser H2		50 TWh**	100 TWh**

Quelle: DVGW (2022), S. 22.

So wird für das Jahr 2045 im pessimistischen Szenario ein Angebotspotenzial von 214 TWh erwartet, welche sich in 60 TWh inländische Eigenproduktion aus der Dena-Leitstudie und 154 TWh Importe aus den Nachbarländern aufteilen. Wie auch im Jahr 2030 werden hier auch keine Mengen an türkischem und blauem Wasserstoff erwartet.

Im Base Case Szenario hingegen wird angenommen, dass unter Berücksichtigung des Mittelwertes 122 TWh inländisch erzeugt werden können. Weitere 154 TWh stammen aus den Nachbarländern sowie 387 TWh aus anderen europäischen Ländern. Weiterhin könnten 50 TWh türkiser und 150 TWh blauer Wasserstoff für Deutschland bereitgestellt werden. In Summe kommt Deutschland im Base Case Szenario auf ein Angebotspotenzial von 863 TWh. Im optimistischen Szenario kann nach der ISE Referenz 217,36 TWh Wasserstoff inländisch hergestellt werden. Neben dem Importbedarf aus den Nachbarländern (159 TWh) und aus den anderen europäischen Ländern (400 TWh), wird ein enormes Potenzial für die MENA-Region ausgeschrieben, welche 1229 TWh beträgt. Weitere 300 TWh können aus blauem Wasserstoff (200 TWh) und türkischem Wasserstoff (100 TWh) bereitgestellt werden. Somit ergibt sich ein Angebotspotenzial i.H.v. 2305,36 TWh.

Weiterhin konnte herausgefunden werden, dass das Bundesforschungsministerium einen „Potenzialatlas Wasserstoff seit 2020 fördert, welcher die Potenziale für die Produktion und für den Export von grünem Wasserstoff analysiert.

Die Bundesforschungsministerin Frau Karliczek veröffentlichte die ersten Atlas-Ergebnisse für die 15 Staaten der erstafrikanischen Wirtschaftsgemeinschaft (ECOWAS).

Abbildung 34: Die ECOWAS-Staaten



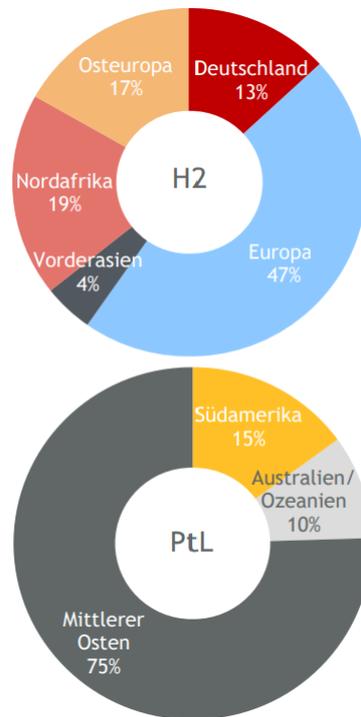
Quelle: DW (2017).

Daraus resultierte eine maximale jährliche grüne Wasserstoffproduktion in Westafrika i.H.v. 165.000 TWh. Die ECOWAS-Staaten verbrauchen insgesamt lediglich 53 TWh, während Deutschland jährlich rund 520 TWh Strom verwendet.¹⁰³ Von den 165.000 TWh können 120.000 TWh unter 2,50 € das Kilo Wasserstoff hergestellt werden. Wenn davon ausgegangen wird, dass die ECOWAS-Staaten 100.000 TWh grünen Wasserstoff exportieren können und lediglich 1% davon nach Deutschland kommt, würde das Importpotenzial bei 1.000 TWh liegen.

Außerdem hat die Dena-Leitstudie, welche bereits in Kapitel 3.6 analysiert worden ist, prognostiziert, dass die Nachfrage nach Wasserstoff und seinen Derivaten für das Jahr 2045 durch ausländische Importe vollumfänglich gedeckt werden kann. Die Herkunft der jeweiligen Regionen ist in der unteren Abbildung 35 anschaulich visualisiert.

¹⁰³ Vgl. BMBF (2022b).

Abbildung 35: Herkunft von Wasserstoff und PtL (Perspektive 2045)



Quelle: Dena (2021), S. 120.

67% der Wasserstoffnachfrage können demnach innerhalb von Europa hergestellt werden. Davon kommen 17% aus Türkei, Russland und Ukraine (Osteuropa), welche den Wasserstoff per Pipeline nach Deutschland importieren können.¹⁰⁴ Aufgrund des aktuellen Konflikts zwischen Russland und Ukraine, kann sich allerdings der Import von Wasserstoff nach Deutschland aus Osteuropa minimieren.

47% der Wasserstoffnachfrage können aus anderen europäischen Ländern gedeckt werden, welche nicht namentlich genannt werden. Auch hier kommen Norwegen und Niederlande als mögliche Importeure für Deutschland ins Spiel.

Mit 13% kann die Bundesregierung nur einen kleinen Teil des Wasserstoffbedarfs inländisch produzieren und verwenden. Die restlichen 23% verteilen sich auf Nordafrika (19%) und Vorderasien (4%), welche die MENA-Region darstellen. So lassen sich viele Ähnlichkeiten zu der DVGW-Studie aufweisen, in der dieselben Regionen und Länder als mögliche Importeure für Deutschland aufkommen. Wie auch in der DVGW-Studie wird der Wasserstofftransport lediglich in der Dena-Leiststudie per Pipeline berücksichtigt.

¹⁰⁴ Vgl. Dena (2021), S.121.

Länder wie Brasilien, Chile, Australien oder Neuseeland haben nicht die Möglichkeit den Wasserstoff direkt per Pipeline nach Deutschland zu transportieren, sondern lediglich in diversen Formen per Schiff. Diese Länder kommen eher als PtL-Nachfrager ins Spiel aufgrund der großer Streckendistanz. Weiterhin wird die MENA-Region (hier: Mittlerer Osten) auch als größter PtL-Nachfrager gehandelt, welche 75% der Nachfrage ausmachen. Somit wäre die MENA-Region der größte Importeur für Wasserstoff und seine Folgeprodukte, die in der DVGW-Studie ebenso im optimistischen Szenario mit 1229 TWh lediglich für Wasserstoff, an erster Stelle ist. Der Transport von synthetischen Kraftstoffen erfolgt laut der Dena-Leitstudie nur per Schiff.

4.4 Vergleich der Transportmöglichkeiten nach Deutschland

In Kapitel 2.4 hat der Leser verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt bekommen, den Wasserstoff zu transportieren und zu speichern. Die Hauptarten der Lieferung von Wasserstoff sind sowohl der Pipeline- als auch der Schifftransport, da dies zur Zeit die gängigsten Methoden sind, um den Energieträger vom Erzeuger zum Verbraucher zu bringen. Züge und Lastkraftwagen sind eine alternative Möglichkeit, um kleinere Mengen Wasserstoff zu transportieren, die im Weiteren hingegen nicht berücksichtigt werden, aber in Zukunft eine wichtige Rolle spielen können.

4.4.1 European Hydrogen Backbone (EHB) – Initiative per Pipeline

Der Leser hat im letzten Kapitel erfahren, dass der Großteil der europäischen Länder Deutschland mit Wasserstoff versorgen kann. Im Jahr 2020 wurde die Hydrogen Backbone-Initiative gegründet, um die Dekarbonisierung Europas mit dem Aufbau einer umfassenden Wasserstoffinfrastruktur voranzubringen. Dabei plant die European Hydrogen Backbone – Initiative, dass die bestehende europäische Gasinfrastruktur mit Investitionen in neue Leitungen, ein großflächiges Wasserstoffnetz bzw. ein „hydrogen backbone“ errichtet. Hierbei sind 31 Gastransportunternehmen aus 28 Ländern beteiligt, welche das Ziel haben bis 2030 ein 28.000 km¹⁰⁵ langes europäisches Wasserstofftransportnetz aufzubauen.

¹⁰⁵ Vgl. EHB (2022), S.8.

Dabei sind fünf paneuropäische Wasserstoffversorgungs- und -importkorridore geplant, welche Industriecluster, Häfen und Wasserstofftäler mit reichhaltigem Wasserstoffangebot verbinden, um die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur zu fördern.¹⁰⁶

Wasserstofftäler oder sog. Wasserstoff-Hubs¹⁰⁷ bedeuten Standorte, „die über eine kritische Masse an Wasserstoffnachfrage in räumlicher Nähe zu Wasserstoffproduktion und Wasserstoffinfrastruktur (Speicherung, Transport) verfügen.“¹⁰⁸ Dadurch wird die Erzeugung, Bereitstellung und die Nutzung in einem Hub gebündelt, was dazu führt, dass die Kosten für die Infrastruktur sinken und Skaleneffekte bei der Produktion und Lieferung von Wasserstoff an die Kunden erzielt werden können. Das Ziel für 2030 ist es 20,6 Millionen Tonnen klimafreundlichen Wasserstoff in Europa fördern zu können¹⁰⁹, welches ausgerechnet 686,6 TWh Wasserstoff ergibt.

Vor allem durch den Russland-Ukraine-Konflikt im Jahr 2022 hat sich die Denkweise der europäischen Länder dahingehend geändert, dass diese bis 2030 unabhängig von fossilen Brennstoffimporten aus Russland sein wollen.¹¹⁰ In der unteren Abbildung 36 ist zu sehen, dass Deutschland zu den größten Abnehmern von russischem Erdgas gehört, welcher 2020 24% der gesamten Gasexporte aus Russland erhalten hat.

¹⁰⁶ Vgl. EHB (2022), S. 3.

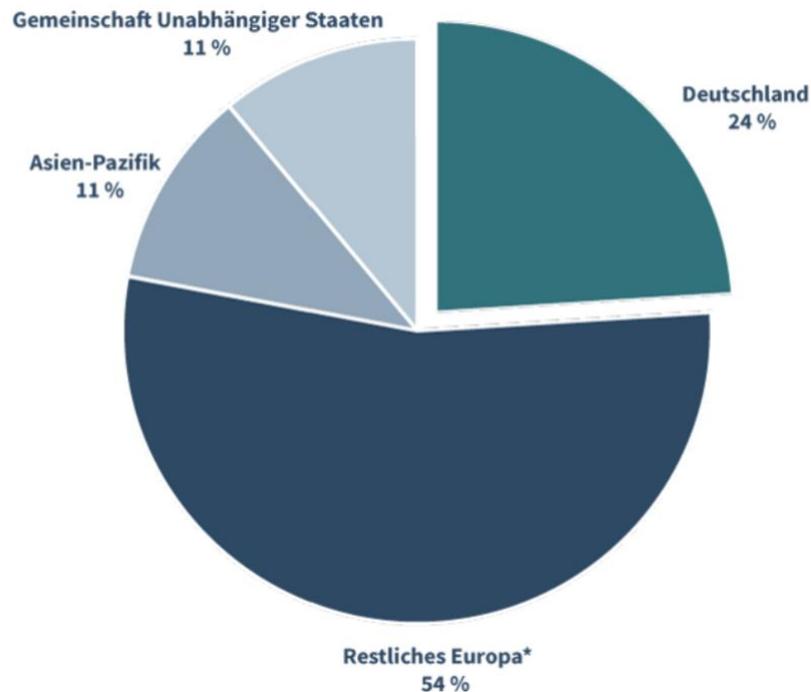
¹⁰⁷ Hub = englisch für Zentrum, Dreh- und Angelpunkt

¹⁰⁸ Vgl. Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer (2019), S. 22f.

¹⁰⁹ Vgl. EHB (2022), S. 8.

¹¹⁰ Vgl. EHB (2022), S. 6.

Abbildung 36: Russische Gasexporte nach Abnehmerländer (2020)



*restliches Europa inklusive Türkei

Quelle: IW Köln (2022).

Mit 54 % Anteil an den russischen Gasexporten ist das restliche Europa ebenso stark abhängig vom russischen Erdgas. Durch den Einmarsch Russlands in die Ukraine beschleunigt sich die Vision des EHB-Netzes und damit auch die Einführung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und Europa, welches die Resilienz des Energiesystems in Europa stärken soll.¹¹¹

In der unteren Abbildung 37 ist das EHB-Netz, welches für 2030 angedacht ist, dargestellt. So umfasst das Wasserstoffnetz neue H₂-Leitungen, Unterwasserleitungen und umgerüstete Leitungen.

¹¹¹ Vgl. EHB (2022), S. 6.

Abbildung 37: Europäisches Wasserstoffnetz (Perspektive 2030)

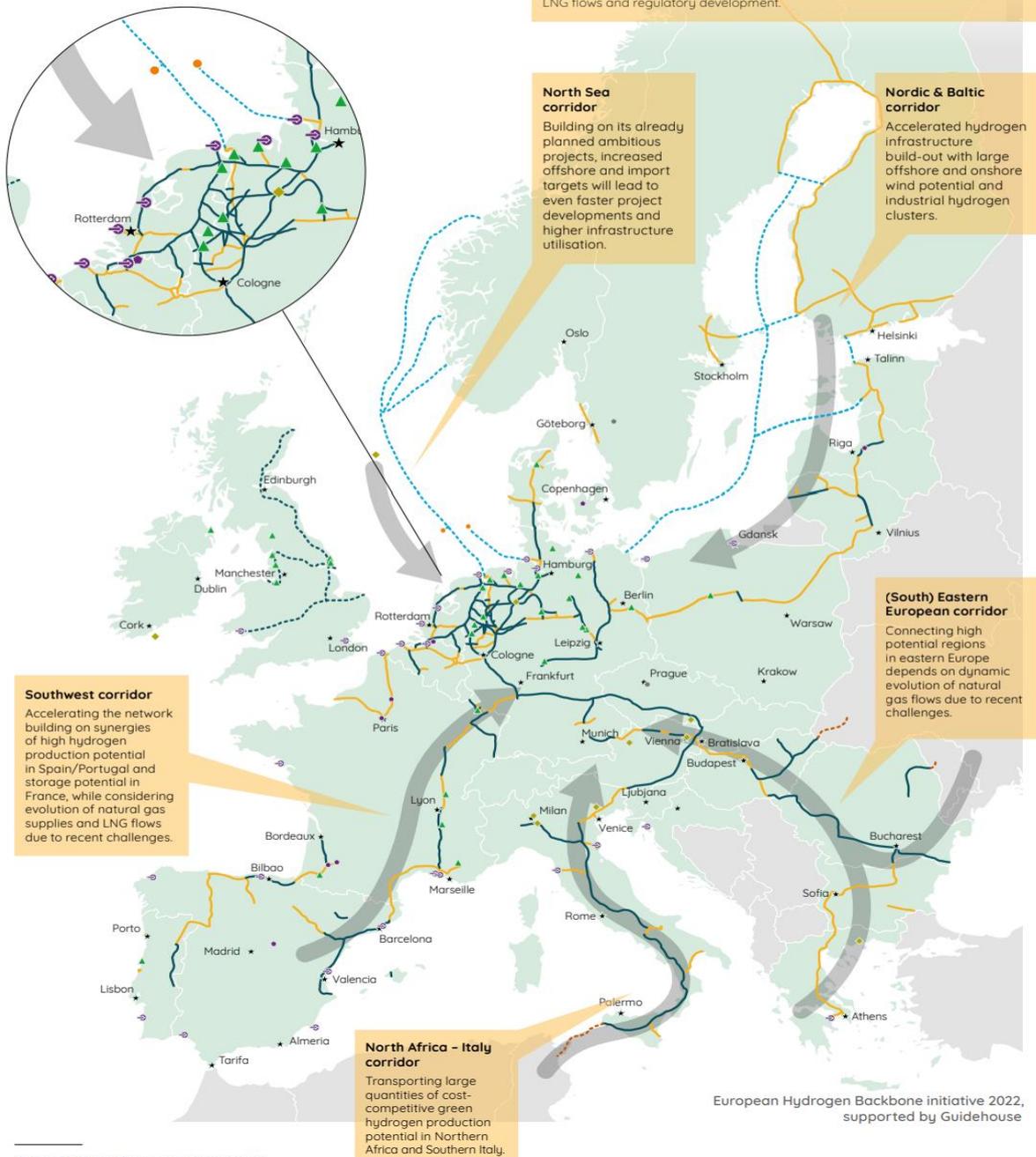
Figure 2 - 2030

Accelerated and updated 2030 EHB network supports the EC's REPowerEU ambition to accelerate the creation of a domestic and import market for hydrogen and to increase European energy system resilience

- | | | |
|---|------------------|--|
| Pipelines | Storages | Other |
| — Repurposed | ▲ Salt cavern | ★ City, for orientation purposes |
| — New | ▲ Aquifer | ★ Energy hub / Offshore (wind) hydrogen production |
| — Subsea | ▲ Depleted field | ★ Existing or planned gas-import-terminal |
| — Import / Export | ● Rock cavern | |
| — UK 2030 pipelines depends on pending selection of hydrogen clusters | | |

General remarks

Across all corridors, market conditions are continuously evolving. Map subject to updates resulting from new announcements, considering natural gas supplies, LNG flows and regulatory development.



Die fünf paneuropäischen Wasserstoffkorridore sind anschaulich an den Pfeilen und den gelben Kickerboxen in der Abbildung 37 zu erkennen, welche Europa mit Wasserstoff versorgen können.

So kann beispielsweise im südlichen Korridor Wasserstoff aus Tunesien und Algerien nach Palermo (Italien) per Pipeline transportiert werden. Aus Palermo kann der Wasserstoff dann über Wien (Österreich) und Bratislava (Slowakei) nach Deutschland gelangen.

Im südwestlichen Korridor kann Wasserstoff aus Valencia (Spanien) über Marseille und Lyon (Frankreich) nach Deutschland befördert werden.

Im Nordsee-Korridor kann Wasserstoff sowohl durch Unterwasserpipelines aus Norwegen als auch durch Pipelineanschlüsse an Offshore-Windenergieparks nach Deutschland und Europa transportiert werden.

Im nord-baltischen Korridor kann mit Hilfe der Windenergie an Land und auf hoher See große Mengen an Wasserstoff aus den baltischen Staaten nach Deutschland und Europa gefördert werden.

Im südöstlichen Korridor kann Wasserstoff aus Rumänien, Griechenland oder Ungarn produziert und nach Europa und Deutschland transportiert werden.

Für das Jahr 2040 plant die EHB ein 53.000 km langes Leitungsnetz, welches 60% aus umgestellten Erdgasleitungen und 40% neuen Wasserstoff-Leitungen besteht.¹¹² So kann in der unteren Abbildung 38 die Vergrößerung des Wasserstoffnetzes klar erkannt werden.

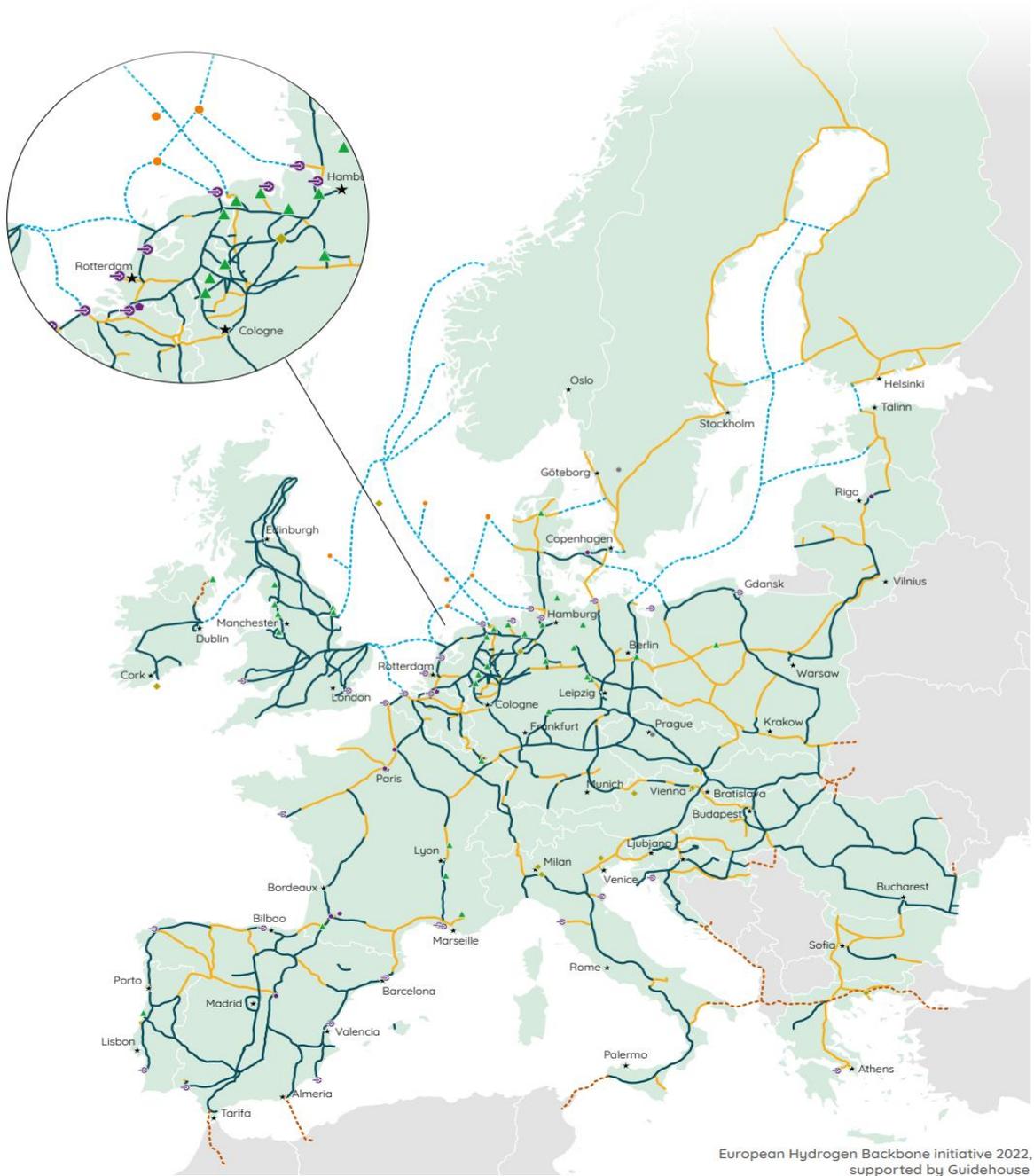
¹¹² Vgl. EHB (2022), S. 11.

Abbildung 38: Europäisches Wasserstoffnetz (Perspektive 2040)

Figure 3 - 2040

Mature infrastructure stretching towards all directions by 2040

- | Pipelines | Storages | Other |
|-------------------|------------------|--|
| — Repurposed | ▲ Salt cavern | ★ City, for orientation purposes |
| — New | ◆ Aquifer | ● Energy hub / Offshore (wind) hydrogen production |
| — Subsea | ◆ Depleted field | ⊕ Existing or planned gas-import-terminal |
| — Import / Export | ● Rock cavern | |



Quelle: EHB (2022), S. 13.

Im Jahr 2040 kann bereits erkannt werden, dass sich die geplanten Importpipelines gegensätzlich zu 2030 immens vergrößert haben. Sowohl eine Pipeline aus Marokko als auch eine Unterwasserpipeline aus Algerien wird seitens der EHB geplant den Süden von Spanien mit Wasserstoff aus Afrika zu versorgen. Weiterhin sind Pipelines geplant, die Deutschland mit Wasserstoff aus der Ukraine und der Türkei versorgen sollen.

Im Jahr 2040 nimmt die EHB an, dass die europäische Wasserstoffnachfrage i.H.v. 1640 TWh durch das geplante Wasserstoffnetz gedeckt werden kann.¹¹³ Die abgebildeten Wasserstoffnetzpläne in Abbildung 37 und 38 für 2030 und 2040 sollen nicht final gesehen werden, da sich die Wasserstofftransportrouten und die Zeitpläne im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ändern können.

4.4.2 Schifftransport – Relevanz des Rotterdamer Hafens für Europa und Deutschland

Durch das EHB kann Wasserstoff sowohl außerhalb als auch innerhalb von Europa produziert und nach Deutschland per Pipeline importiert werden. Dennoch gibt es einige Regionen und Länder, welche Wasserstoff bzw. seine Folgeprodukte lediglich per Schiff transportieren können. Für Länder aus Südamerika oder Australien wäre es beispielsweise nicht wirtschaftlich eine so weite Unterwasserpipeline bis nach Europa zu errichten. Da Deutschland bisher noch keine Wasserstoffimportterminals erbaut hat, wäre die Bundesrepublik kurzfristig bis mittelfristig an ausländische Häfen angewiesen, welche im Nachhinein den Wasserstoff per Pipeline, per Lastwagen oder per Schienenverkehr nach Deutschland transportieren. Ein nahegelegener ausländischer Hafen liegt in Rotterdam, welcher auch gleichzeitig der größte Hafen Europas ist.¹¹⁴ Das Ziel des Hafens von Rotterdam ist es die Wasserstoffdrehscheibe Europas zu werden, welche im Jahr 2030 4,6 Millionen Tonnen Wasserstoff (153,32 TWh) und 2050 rund 20 Millionen Tonnen Wasserstoff¹¹⁵ (666,6 TWh) verteilen kann. Davon werden 2050 90% aus dem Ausland importiert und 10% am Hafen selbst produziert.¹¹⁶ Dennoch wurden keine Angaben zu Importzahlen nach Deutschland getätigt.

¹¹³ Vgl. EHB (2022), S. 11.

¹¹⁴ Vgl. Port of Rotterdam (o.J.).

¹¹⁵ Vgl. Port of Rotterdam (2022).

¹¹⁶ Vgl. Port of Rotterdam (2021).

Aufgrund der räumlichen Nähe zu Deutschland ist eine Pipeline-Infrastruktur vorgesehen, die Rotterdam und Nordrhein-Westfalen miteinander verbinden soll. In der unteren Abbildung 39 ist die geplante Route zu erkennen.

Abbildung 39: Route von Rotterdam nach Nordrhein-Westfalen



Quelle: Port of Rotterdam (2020).

Die unterirdische Pipeline verläuft von Rotterdam über Tilburg und Venlo zum Industriepark in Chemelot, welcher nördlich zwischen Maastricht und Aachen gelegen ist. Von Chemelot und von Venlo kann der Wasserstoff bis nach Nordrhein-Westfalen geleitet werden, um die CO₂-Emissionen der Industrieunternehmen wie Currenta, Bayer Ineos, etc. zu minimieren.

Langfristig kann Deutschland die geplanten LNG-Importterminals zu Wasserstoffterminals umbauen, um die Abhängigkeit vom aus den Niederlanden importierten Wasserstoff zu reduzieren.

Dennoch ist der Wasserstofftransport per Schiff im Gegensatz zum Pipelinetransport für kürzere Strecken kostenintensiver. Das liegt daran, dass der Wasserstoff „entweder verflüssigt, in einen anderen Energieträger wie Ammoniak umgewandelt, oder in einem Trägermolekül wie (...)“ LOHC gebunden werden muss.¹¹⁷ Der erforderte Energieaufwand für diese drei Verfahren treibt dementsprechend auch die Kosten des Wasserstoffes in die Höhe. Pipelinetransporte eignen sich besonders für Distanzen von unter 2000 km bis 7000 km.¹¹⁸ Falls eine bestehende Erdgasleitung auf Wasserstoff umgewandelt werden kann, ist diese weiterhin günstiger als der Wassertransport per Tanker.¹¹⁹ Demzufolge sind Pipelinetransporte innerhalb von Europa und Umgebung am kosteneffizientesten für Deutschland.

Importe aus Australien oder Chile würden sich hingegen per Schifftanker, aufgrund der immensen Entfernung lohnen. Hierbei eignen sich eher wasserstoffbasierte Produkte wie Methanol, Ammoniak oder synthetische Kraftstoffe als reiner Wasserstoff per Schiff.¹²⁰

4.5 Zusammenfassung der möglichen Wasserstoffimporte nach Deutschland – Abgleich von Angebot und Nachfrage

In Kapitel drei hat der Leser erfahren, dass die deutsche Wasserstoffproduktion nicht ausreicht, um die inländische Wasserstoffnachfrage zu decken. Demzufolge resultiert ein Importbedarf für Deutschland, der in den analysierten Studien in den verschiedenen Jahren verschiedene Höchstwerte aufweist. In diesem Kapitel wird ein Abgleich erstellt, um herauszufinden, ob die deutsche Nachfrage durch die prognostizierten Importe nach Deutschland gedeckt werden kann.

Wie in Kapitel 4.2 und 4.3 wird hier ebenso zwischen einem pessimistischen-, einem Base Case und einem optimistischem Szenario verglichen.

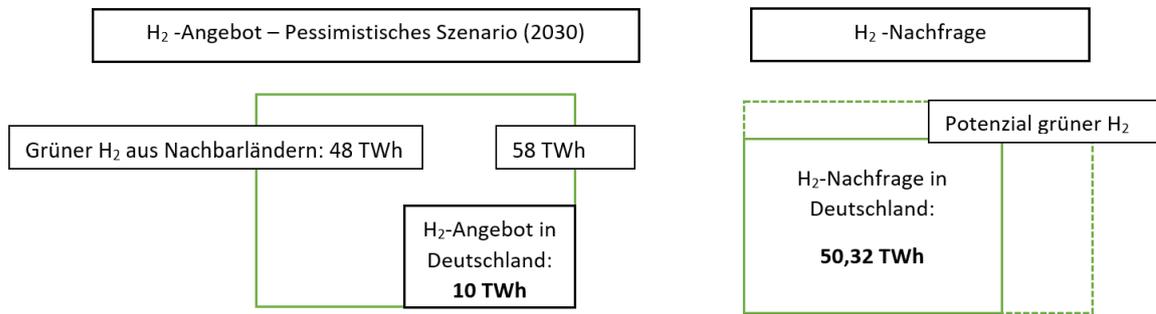
¹¹⁷ Vgl. EWI (2020), S.8.

¹¹⁸ Vgl. EWI (2020), S.8f.

¹¹⁹ Vgl. EWI (2020), S.8f.

¹²⁰ Vgl. EWI (2020), S.9f.

Abbildung 40: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Pessimistisches Szenario - Perspektive 2030)

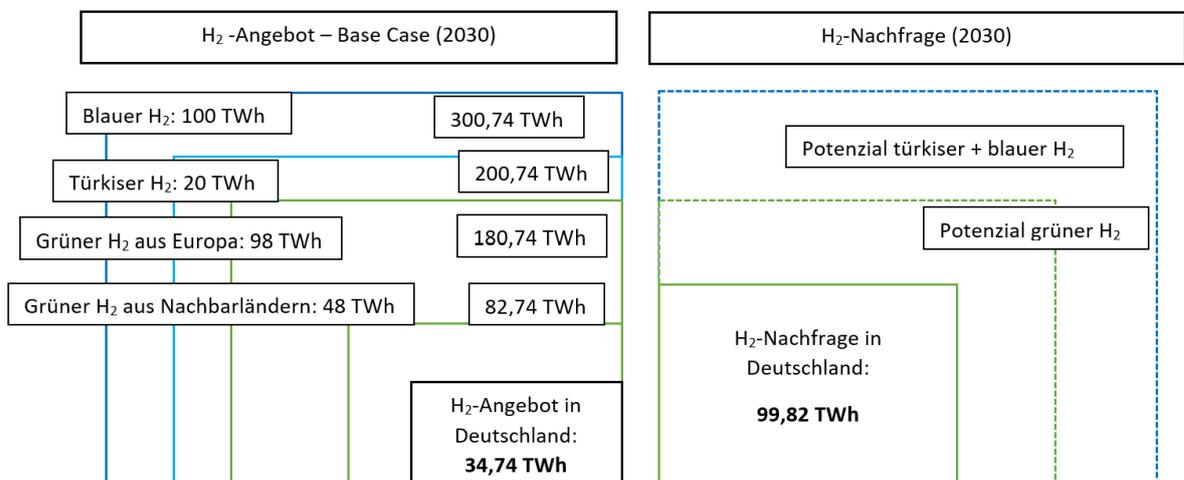


Quelle: Eigene Darstellung.

Nach Angaben des DVGW stammen 48 TWh grüner Wasserstoff aus den Nachbarländern von Deutschland, welche ein aggregiertes Angebotspotenzial von 58 TWh aufweisen. Somit kann bereits die inländische Nachfrage von 50,32 TWh durch die 58 TWh vollumfänglich gedeckt werden. Somit entsteht ein Angebotsüberschuss von 7,68 TWh grünem Wasserstoff.

Im Base Case Szenario beträgt der ermittelnde Mittelwert aller Studien und Szenarien 34,74 TWh. Neben dem Angebot der Nachbarländer, kommen weitere 98 TWh grüner Wasserstoff aus ganz Europa. Zusätzlich werden weitere 20 TWh türkiser und 100 TWh blauer Wasserstoff bereitgestellt.

Abbildung 41: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Base Case Szenario - Perspektive 2030)

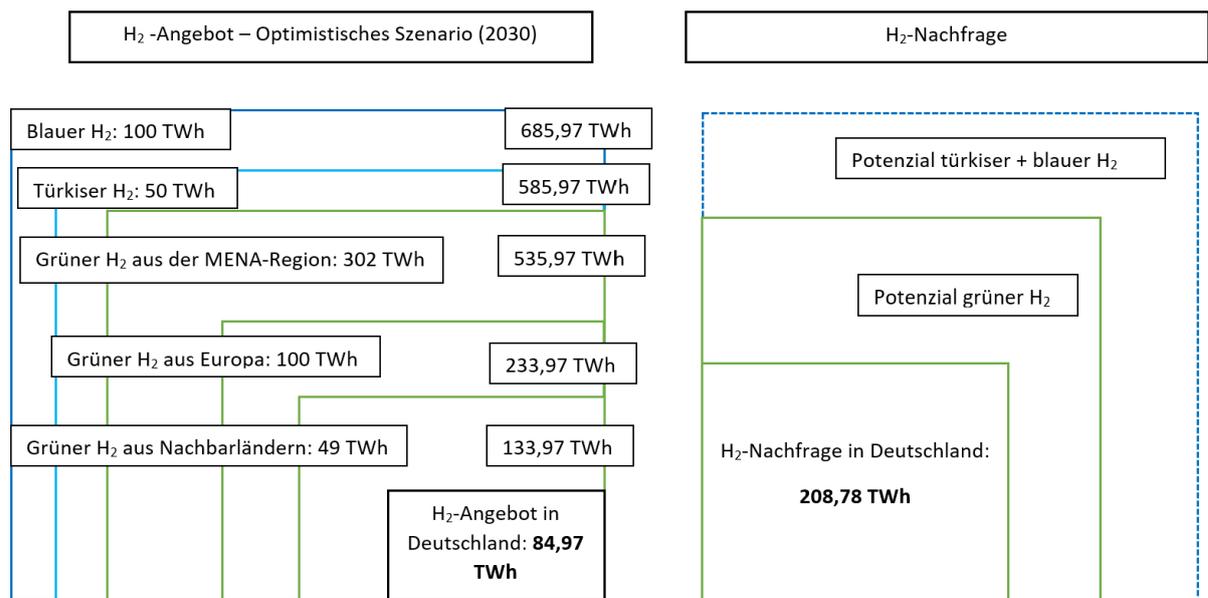


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DVGW (2022), S. 28.

Somit liegt das Angebotspotenzial im Base Case Szenario bei 300,74 TWh, welches ebenso den ermittelnden Mittelwert der Nachfrage in Deutschland von 99,82 TWh komplett deckt. Aus der Differenz zwischen Angebot und Nachfrage entsteht ein Angebotsüberschuss von 200,92 TWh.

Während im optimistischen Szenario die höchste Wasserstoffproduktion 84,97 TWh beträgt, liegt die höchste H₂-Nachfrage in der NWS bei 110 TWh. Im unteren Schalenmodell liegt das Angebotspotenzial im Jahr 2030 bei 685,97 TWh und deckt somit die Wasserstoffnachfrage mehr als das Sechsfache.

Abbildung 42: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Optimistisches Szenario - Perspektive 2030)



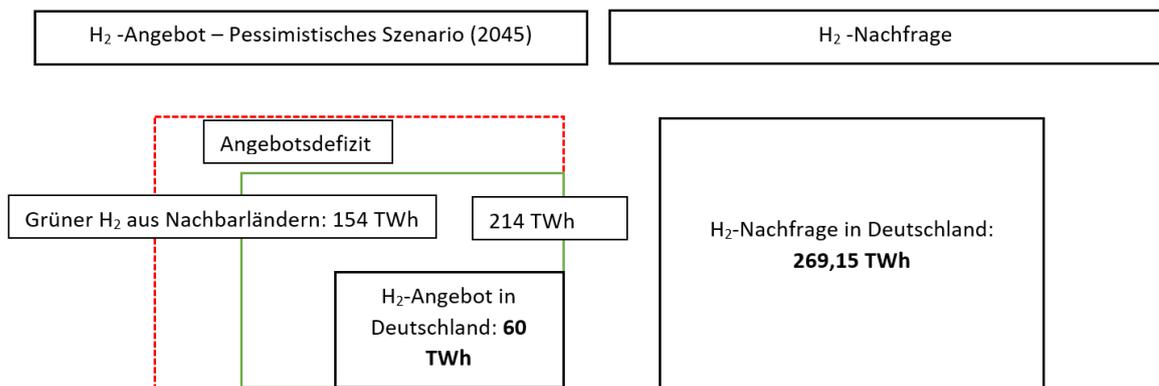
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DVGW (2022), S. 28.

Dabei liegt ein Angebotsüberschuss i.H.v. 477,19 TWh, bei dem blauer und türkiser Wasserstoff nicht nötig wäre.

Im Jahre 2045 kann die Nachfrage lediglich im pessimistischen Szenario nicht durch das Angebot gedeckt werden. Die geringste Wasserstoffproduktion wird in der Dena-Leitstudie i.H.v. 60 TWh erwartet, welche mit Hilfe des Angebots aus den Nachbarländern auf ein

Angebotspotenzial von 214 TWh kommt. Die H₂-Nachfrage liegt dagegen bei 269,15 TWh, welche aus der Fraunhofer ISE-Suffizienz-Studie stammen.

Abbildung 43: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Pessimistisches Szenario - Perspektive 2045)

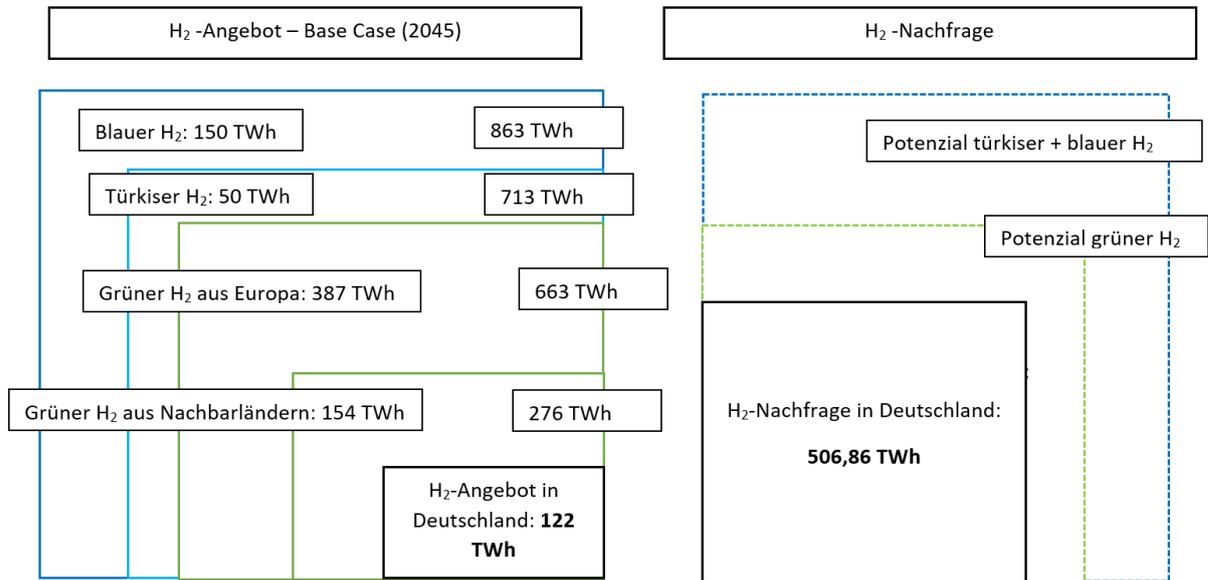


Quelle: Eigene Darstellung.

Erneut wird das Potenzial des türkisen und grünen Wasserstoffes im pessimistischen Szenario nicht berücksichtigt, bei dem ein Angebotsdefizit i.H.v. 55,15 TWh vorliegt.

Im Base Case Szenario beträgt das H₂-Angebot als Mittelwert 122 TWh im Jahre 2045. Das gesamte Angebotspotenzial liegt bei 863 TWh, wovon 541 TWh aus Europa importiert werden. Die restlichen 200 TWh kommen in Form als türkiser und blauer Wasserstoff zustande. Der Mittelwert der H₂-Nachfrage beträgt 506,86 TWh und lässt sich demnach vollumfänglich durch das Angebot decken.

Abbildung 44: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Base Case Szenario - Perspektive 2045)

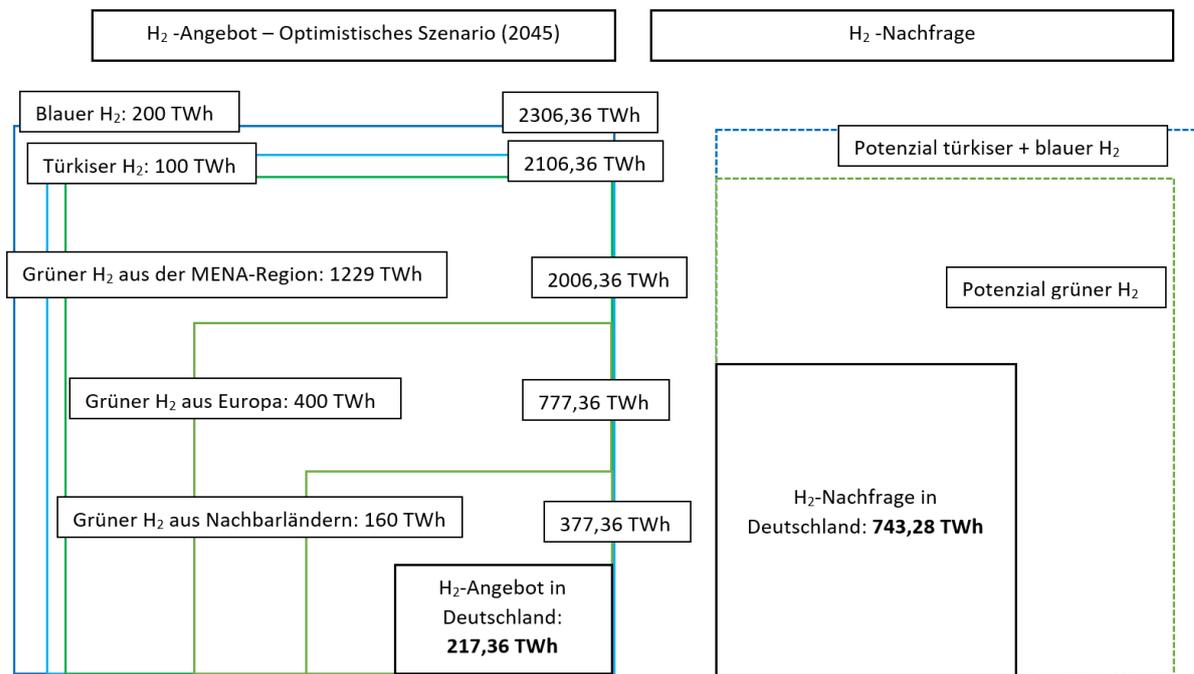


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DVGW (2022), S. 29.

Auch in der Abbildung 44 wäre der Einsatz des blauen und türkisen Wasserstoffes im Base Case Szenario nicht nötig. Hierbei entsteht ein Angebotsüberschuss i.H.v. 356,14 TWh.

Im optimistischen Szenario liegt das H₂-Angebot bei 217,36 TWh, welches aus der Fraunhofer ISE Referenz Studie als höchster Wert entnommen wird. Wie unten im Schalenmodell 45 zu erkennen, beträgt das aggregierte Angebotspotenzial bei 2306,36 TWh. Neben der Bereitstellung der 560 TWh aus Europa, ist die MENA-Region mit 1229 TWh der größte Importeur.

Abbildung 45: Vergleich von Angebot und Nachfrage (Optimistisches Szenario - Perspektive 2045)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DVGW (2022), S. 29.

Die höchste inländische Nachfrage kann aus der Fraunhofer ISE-Beharrung entnommen werden, die 743,28 TWh beträgt. Somit kann die Nachfrage um mehr als das Dreifache durch das Angebot gedeckt werden, welches einen Überhang von 1536,08 TWh bildet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die deutsche Wasserstoffnachfrage im Jahr 2030 und 2045 (fast) durch ausländische Importe gedeckt werden kann. Blauer und türkiser Wasserstoff werden im Base Case und im optimistischen Szenario erst gar nicht benötigt, um das grüne Wasserstoffangebot aus dem Ausland zu ergänzen. Dennoch erscheint es wichtig diesen im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland einzusetzen, da im pessimistischen Szenario im Jahr 2045 die Nachfrage ohne diese Energieträger nicht gedeckt wird.

Wie erwähnt berücksichtigt die DVGW-Studie lediglich Pipelinetransporte. Darüber hinaus können Wasserstoff- und seine Folgeprodukte per Schiff, Lastwagen oder Zug transportiert werden, die das Importangebot weiter ergänzen würden.

5. Handlungsempfehlungen

Die erarbeitete Prognose besagt, dass der Wasserstoffbedarf in Deutschland durch ausländische Importe für das Jahr 2030 und 2045 gedeckt werden kann. Um die deutsche Nachfrage bis 2030 zu decken, muss Deutschland weiterhin auf weitere Wasserstoffpartnerschaften eingehen, um die Importe so weit wie möglich zu diversifizieren. Dadurch senkt sich das Risiko, von einem Land abhängig zu sein.

Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland kann beschleunigt werden, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien konsequent und zügig voranschreitet, um die inländische Produktion von Wasserstoff zu erhöhen. Solange der Bedarf über Importe nicht gedeckt werden kann, muss die deutsche Wasserstoffproduktion massiv gefördert werden oder es muss zu anderen Alternativen zu Wasserstoff gesetzt werden.

Dementsprechend müssen die Ausbaumengen im Zielpfad für Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) sowie für Windkraftanlagen deutlich erhöht werden, um ebenso die Klimaneutralität bis spätestens 2045 zu erreichen. Allerdings stehen bürokratische Hindernisse im Weg, um diesen Ausbau zu beschleunigen. Ein Beispiel dafür ist, dass der Prozess für die Planung- und das Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen in Deutschland durchschnittlich vier bis fünf Jahre dauert.¹²¹ Weiterhin droht der Bundesregierung ein Fachkräftemangel, um PV-Anlagen zu installieren oder Windkraftanlagen zu errichten.¹²² Klar erkannte und bekannte Hindernisse müssen seitens der Bundesregierung gelöst werden, um sowohl die inländische Wasserstoffproduktion zu erhöhen als auch eine schnelle Markteinführung zu unterstützen. Dabei sollte nicht nur auf grünen Wasserstoff gesetzt werden, sondern auch auf blauen und türkisen Wasserstoff. Dies verstärkt den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und ermöglicht es, die Wasserstoffnachfrage bis 2030 decken zu können. In dieser Hinsicht würde die Verbreitung der diversen Wasserstofftechnologien in Deutschland vorangebracht werden, bevor dieser komplett emissionsfrei erzeugt werden.

Um den Markthochlauf nutzen zu können, bedarf es an einer Infrastruktur für Wasserstoff und seine Folgeprodukte. Hierbei kann Deutschland bereits auf das bestehende Gasnetz und das

¹²¹ Vgl. BWE (o.J.).

¹²² Vgl. Tagesschau (2021).

Know-How der Marktakteure zurückgreifen, um den Wasserstoff aus dem Ausland zu importieren und diesen im Inland zu verteilen. Entweder kann das bestehende Leitungsnetz auf Wasserstoff erfolgreich umgestellt werden oder es muss (teilweise) neu errichtet werden. Um den Wasserstoff und seine Folgeprodukte aus dem Ausland per Schiff importieren zu können, benötigt Deutschland Wasserstoffimportterminals. Die Bundesregierung plant drei LNG-Terminals in je Wilhelmshaven, Brunsbüttel und Stade zu errichten, um erstmals Flüssiggas per Tanker zu erhalten.¹²³ Langfristig sollten diese Terminals auch als Importhäfen für Wasserstoff fungieren, um beispielsweise Wasserstoff und seine Derivate aus Australien oder Chile entgegenzunehmen. Übergangsweise kann Wasserstoff auch aus dem Rotterdamer Hafen nach Deutschland importiert werden.

Neben dem Leitungsnetz für Wasserstoff, stellt die Speicherung des Energieträgers ebenso eine wichtige Rolle dar, um in Zeiten von niedriger Stromproduktion den gespeicherten Wasserstoff in Energie zurückzuwandeln und diesen ins Stromnetz einzuspeisen. Deutschland kann dabei auf die höchsten Erdgasspeicherkapazitäten in Europa zurückgreifen, welche in 47 Untertagespeicher mit einem Volumen von 227,3 TWh Arbeitsgas aufgeteilt sind.¹²⁴ Im Laufe des Markthochlaufs der Wasserstoffwirtschaft sollten somit die Untertagespeicher schrittweise auf Wasserstoff umgerüstet werden.

Außerdem muss die Tankstelleninfrastruktur in Deutschland weiterhin ausgebaut werden, welche bisher 91 deutsche Tankstellen¹²⁵ beinhaltet, um den steigenden Bedarf nach wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in den kommenden Jahrzehnten zu decken.

Darüber hinaus sollte die Bundesregierung Herkunftsnachweise für emissionsfreien Wasserstoff aus den Partnerländern verlangen, um sicherzustellen, dass der produzierte Wasserstoff emissionsfrei hergestellt wurde und in Wirklichkeit kein grauer Wasserstoff ist. Hierbei sollten auch blauer und türkiser Wasserstoff dazu gehören, die nahezu keine Emissionen verursachen. Dadurch kann Deutschland gewährleisten, dass durch die Nutzung des importierten Wasserstoffes keine CO₂-Emissionen entstanden sind und die Bundesregierung somit zur Klimaneutralität beiträgt.

¹²³ Vgl. DW (2022).

¹²⁴ Vgl. BDEW (2020b).

¹²⁵ Vgl. BMVI (2021).

Abschließend sollte Deutschland auf sog. Wasserstoff-Hubs setzen, um die räumliche Nähe zu Nachfragern, Bereitstellern und Infrastruktur zu bündeln.

6. Fazit

Der Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit lag in der Analyse der verschiedenen Studien zur Bestimmung der voraussichtlichen Wasserstoffnachfragen im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und der Ermittlung des Bedarfs und der Verfügbarkeiten an ausländischen Wasserstoff-Importen. Als Antwort auf die zentralen Forschungsfragen zeigt sich, dass die diversen Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Alle Studien kommen zum Ergebnis, dass Deutschland auf ausländische Importe angewiesen sein wird, da Deutschland nicht über genügend Flächen verfügt, um den Wasserstoffausmaß mittels erneuerbarer Energien herzustellen.

Für das Jahr 2030 kann nach Analyse der Studien gesagt werden, dass die Wasserstoff-Nachfragebandbreite im Jahr 2030 zwischen 50,32 und 208,78 TWh und im Jahr 2045 zwischen 269,15 und 743,28 TWh liegt. Hinsichtlich der Wasserstofferzeugung kann im Jahr 2030 zwischen 10 TWh und 84,97 TWh und 2045 zwischen 60 und 217,36 TWh inländisch hergestellt werden. Die größten Wasserstoffabnehmer ist der Verkehrs- und Industriesektor, welcher durch den Einsatz von Wasserstoff viele Emissionen einsparen kann.

Während für das Jahr 2030 eine Wasserstoff-Importbandbreite zwischen 17,87 und 96 TWh entsteht, liegt diese für 2045 zwischen 180,05 und 596 TWh. Im Nachhinein wurden mit Hilfe der Importzahlen vom DVGW das pessimistische, das Base Case Szenario sowie das optimistische Szenario begutachtet. Jeder dieser Szenarien wurde eine unterschiedliche Wasserstoffnachfrage und -angebot unterstellt, um die möglichen Entwicklungen der Zukunft so gut wie möglich abzudecken. Hierbei wurden in der Bandbreite die niedrigsten und höchsten Werte sowie der Mittelwert für die Szenarien als Basis genommen. Es stellte sich heraus, dass vor allem europäische Staaten am Anfang des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft wichtige Wasserstoffimporteure sein können. Diese These wird auch durch die EHB-Initiative gestützt, in dem bis 2030 und 2045 ein großflächiges Wasserstoffnetz erbaut wird, um die Wasserstoffabnehmer zu versorgen. Über Europa hinaus werden langfristig Nordafrika und Vorderasien bzw. die MENA-Region einen wichtigen Stellenwert hinsichtlich der Deckung der Wasserstoffnachfrage spielen. So konnte in der DVGW-Studie erkannt werden, dass diese im optimistischen Szenario als größter Nachfrager gilt. Nach Angaben der Dena-Leitstudie wäre die MENA-Region auch der größte PtL-Bereitsteller. Ferner ist es auffällig, dass die PtL-Nachfrage kaum bzw. gar nicht in Deutschland hergestellt wird, da andere Länder deutlich kompetitive Gestehungskosten

aufweisen. Die synthetischen Kraftstoffe benötigen ferner auch kein eigenes Pipelinennetz, da diese aufgrund der hohen Energiedichte gut per Schiff transportiert werden können. Die PtL-Nachfrage ist im Gegensatz zur Wasserstoffnachfrage in den meisten Fällen kleiner. Lediglich die die Szenarien des Fraunhofer ISE Suffizienz und Beharrung gehen davon aus, dass diese der Wasserstoffnachfrage übersteigt.

Weiterhin ist es wichtig zu erwähnen, dass der Einmarsch Russlands in die Ukraine ein essenzieller Faktor ist, den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Europa und Deutschland zu beschleunigen, um unabhängiger von russischen Erdgasimporten zu werden. Durch diesen Wendepunkt werden die europäischen Länder noch enger als zuvor miteinander zusammenarbeiten und stärker auf erneuerbare Energien und Wasserstoff setzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die deutsche Wasserstoffnachfrage ab 2030 gedeckt werden kann, wenn türkiser und blauer Wasserstoff im Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft seitens der Bundesregierung berücksichtigt und akzeptiert werden. Zusätzlich muss sowohl die inländische als auch die ausländische Pipelineinfrastruktur fortschrittlich aufgebaut sein, um Deutschland mit Wasserstoff zu versorgen. Ansonsten kann der Wasserstoff lediglich mit dem Lastkraftwagen transportiert werden. Weiterhin muss gesagt werden, dass das Wasserstoffangebot der möglichen Importeure für Deutschland von der Ausbaudynamik der Elektrolyseurkapazitäten abhängig ist. Je langsamer die Wasserstoffinfrastruktur erbaut wird, desto niedriger sind die Wasserstoffimporte nach Deutschland.

Ab spätestens 2045 kann der Wasserstoffimportbedarf vollumfänglich durch ausländische Importe gedeckt werden, da die o.g. Punkte innerhalb in über zwei Jahrzehnte fortschrittlich verbessert werden.

Vor allem grüner Wasserstoff spielt bei der Erreichung der Klimaziele eine wichtige Rolle, um die schwer zu elektrifizierten Sektoren zu dekarbonisieren. Der grüne Wasserstoff sollte dort hergestellt werden, wo die Voraussetzungen für erneuerbare Energien am besten sind. Demzufolge ist es für Deutschland ratsam auf viele strategische Partnerschaften einzugehen, damit die Wasserstoffimporte aus erneuerbaren energiereichen Regionen gesichert werden können.

Literaturverzeichnis

Adelphi consult GmbH et al. (2020), *Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland Kurzanalyse zu ausgewählten Aspekten potenzieller Nicht-EU Partnerländer*; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi); Quelle: https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/Gr%C3%BCner%20Wasserstoff_Internationale%20Kooperationspotenziale%20f%C3%BCr%20Deutschland_finale%20Version.pdf, Zugriffsdatum: 17.05.2022.

AGBF Bund (2008), *Wasserstoff und dessen Gefahren Ein Leitfaden für Feuerwehren*; Quelle: https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

Air Liquide GmbH (o.J.), *Wasserstoffanlagen*; Quelle: <https://de.airliquide.com/unser-equipment/wasserstoffanlagen>, Zugriffsdatum: 18.04.2022.

BCG - Boston Consulting Group (2021), *Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*; Studie im Auftrag für den Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI); Quelle: <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>, Zugriffsdatum: 06.06.2022.

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (o.J.), *Wasserstoff als Allround-Talent: Wo wird er eingesetzt?*; Quelle: <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/wasserstoff-als-allround-talent-wo-wird-er-eingesetzt/>, Zugriffsdatum: 30.04.2022.

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2015), *Wärmemarkt I Botschaften für die Energiewende im Wärmemarkt mit CO₂-Vermeidungskosten als Bewertungsmaßstab*; Quelle: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20151215_Waermemarkt-I.pdf, Zugriffsdatum: 1.05.2022.

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2020a), *Foliensatz zur BDEW-Publikation Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland Basisdaten und Einflussfaktoren*; 4. aktualisierte Ausgabe; Quelle: https://www.bdew.de/media/documents/20200525_Waermeverbrauchsanalyse_Foliensatz_2020_daQSUCb.pdf, Zugriffsdatum: 01.05.2022.

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2020b), Rund 227 Milliarden Kilowattstunden Gas...; Quelle: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/rund-227-milliarden-kilowattstunden-gas/>, Zugriffsdatum: 27.05.2022.

BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2021a), *Von fossil zu erneuerbar: Energiemärkte im Umbruch*; Quelle: <https://bdi.eu/artikel/news/energiemaerkte-im-umbruch/>, Zugriffsdatum: 17.04.2022.

BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2021b), *E-Fuels: CO2-neutrale Kraftstoffe der Zukunft*; Quelle: <https://bdi.eu/artikel/news/e-fuels-co2-neutrale-kraftstoffe-der-zukunft/>, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022a), *Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff*; Quelle: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>, Zugriffsdatum: 16.05.2022.

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022b), *Grüner Wasserstoff: Welche internationalen Projekte fördert das BMBF?*; Quelle: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/gruener-wasserstoff-welche-projekte-foerdert-das-bmbf.html>, Zugriffsdatum: 27.05.2022.

BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021), *Klimaschutz in Zahlen Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*; Quelle: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf, Zugriffsdatum: 26.04.2022.

BMVI - Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021), Wasserstoff-Tankinfrastruktur und Brennstoffzellen-Technologie; Quelle: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Alternative-Kraftstoffe/wasserstoff-tankinfrastruktur.html>, Zugriffsdatum: 28.05.2022.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), *Die Nationale Wasserstoffstrategie*; Quelle: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20, Zugriffsdatum: 16.04.2022.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (o.J.), *Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende*; Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2020), *Altmaier stellt Handlungskonzept Stahl vor: „Starkes Signal für eine starke und klimafreundliche Stahlindustrie in Deutschland und Europa“*; Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200715-altmaier-stell-handlungskonzept-stahl-vor.html>, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2021), *Spitzengespräch zur Stahlindustrie: Wege zur Umstellung auf CO₂-arme und langfristig klimaneutrale Produktion*; Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/06/20210621-spitzengespraech-der-stahlindustrie.html>, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022), *Deutschland und Norwegen vereinbaren Zusammenarbeit für Wasserstoff-Importe*, Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220316-deutschland-und-norwegen-vereinbaren-zusammenarbeit-fur-wasserstoff-importe.html>, Zugriffsdatum: 17.05.2022.

Breg - Bundesregierung (2021), *Klimaschutzgesetz Generationsvertrag für das Klima*; Quelle: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, Zugriffsdatum: 24.04.2022.

BWE - Bundesverband Windenergie (o.J.), *Planung von Windenergieanlagen*; Quelle: <https://www.wind-energie.de/themen/mensch-und-umwelt/planung/>, Zugriffsdatum: 20.05.2022.

Destatis - Statistisches Bundesamt (o.J.), *Länder und Regionen Regionales*, Quelle: https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/_inhalt.html, Zugriffsdatum: 18.05.2022.

Destatis - Statistisches Bundesamt (2022a), *Wasserwirtschaft*; Quelle: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/_inhalt.html, Zugriffsdatum: 01.06.2022.

Destatis – Statistisches Bundesamt (2022b), *Bevölkerungsstand: Amtliche Einwohnerzahl Deutschlands 2021*; Quelle: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/_inhalt.html, Zugriffsdatum: 01.06.2022.

Deutscher Bundestag (2019), *Grenzwerte für Wasserstoff (H₂) in der Erdgasinfrastruktur*, Wissenschaftliche Dienste - Sachstand; Quelle: <https://www.bundestag.de/resource/blob/646488/a89bbd41acf3b90f8a5fbfbc8616df4/WD-8-066-19-pdf-data.pdf>, Zugriffsdatum: 22.04.2022.

Deutscher Bundestag (2020), *Wasserstoffträgersysteme Einzelfragen zu Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)*, Wissenschaftliche Dienste - Dokumentation; Quelle: <https://www.bundestag.de/resource/blob/816048/454e182d5956d45a664da9eb85486f76/WD-8-058-20-pdf-data.pdf>, Zugriffsdatum: 23.04.2022.

DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (2020), *Wasserstoff DIHK Faktenpapier*; Quelle:

<https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>, Zugriffsdatum: 13.04.2022.

DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2022), *Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff – Merit Order für klimafreundliche Gase in 2030 und 2045*; Studie im Auftrag des Frontier Economics; Quelle: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202116-1-dvgw-verfuegbarkeit-kostenvergleich-h2.pdf>, Zugriffsdatum: 21.05.2022.

DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren (o.J.), *Wasserstoff: Mit neuer Energie in die Zukunft*; Quelle: <https://www.dvs-home.de/themen/wasserstoff-mit-neuer-energie-in-die-zukunft#:~:text=%E2%80%9C,Quelle%3A%20iStock.com&text=Denkt%20man%20bei%20der%20m%C3%B6glichen,%20Ding>, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

DW – Deutsche Welle (2017), ECOWAS: Marokkos umstrittener Heiratsantrag an Westafrika, Quelle: <https://www.dw.com/de/ecowas-marokkos-umstrittener-heiratsantrag-an-westafrika/a-40173203>, Zugriffsdatum: 16.05.2022.

DW – Deutsche Welle (2022), Die Zeit drängt: Bau von LNG-Terminals; Quelle: <https://www.dw.com/de/die-zeit-dr%C3%A4ngt-bau-von-lng-terminals/a-61620851>, Zugriffsdatum: 26.05.2022.

EnBW – Energie Baden-Württemberg (o.J.), *Brennstoffzellenantrieb*; Quelle: <https://www.enbw.com/energie-entdecken/mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/>, Zugriffsdatum: 27.04.2022.

Eurostat – Statistisches Amt der Europäischen Union (o.J.), *Strompreise nach Art des Benutzers*; Quelle: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=de>, Zugriffsdatum: 16.05.2022.

EWE AG (o.J.), *Die Farben des Wasserstoffes*; Quelle: <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffes>, Zugriffsdatum: 14.04.2022.

EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2020), *Wasserstoff: Bezugsoptionen für Deutschland – Kostenvergleich von importiertem und lokal produziertem CO₂-armen Wasserstoff*, EWI Policy Brief November 2020; Quelle: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/03/EWI_Policy_Brief_H2_Supply_Costs_20201127.pdf, Zugriffsdatum: 30.05.2022.

EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2021), *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems*; Studie im Auftrag von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena), Quelle: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Landingpages/Leitstudie_II/Gutachten/2110_06_DLS_Gutachten_EWI_final.pdf, Zugriffsdatum: 15.05.2022.

Fraunhofer IKTS - Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (o.J.a), *Wasserstoffnutzung im Industrie-, Energie- und Mobilitätssektor*; Quelle: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/wasserstofftechnologien/wasserstoffnutzung_im_industrie_energie_und_mobilitaetssektor.html, Zugriffsdatum: 28.04.2022.

Fraunhofer IKTS (o.J.b), *Wasserstoffherzeugung und Wasserstoffmarkt*; Quelle: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/wasserstofftechnologien/wasserstoffherzeugung_und_wasserstoffmarkt.html, Zugriffsdatum: 18.04.2022.

Fraunhofer ISE - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2021), *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen Update November 2021: Klimaneutralität 2045*; Quelle: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf> sowie <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Anhang->

Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.xlsx,
Zugriffsdatum: 12.05.2022.

Fraunhofer UMSICHT - Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT (2021), *Transport von Wasserstoff*; Quelle:
<https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/interviews/transport-von-wasserstoff.html>, Zugriffsdatum: 29.04.2022.

Frontier Economics (2021), *Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt*, Studie im Auftrag für
Viessmann Climate Solutions; Quelle: <https://www.frontier-economics.com/media/4590/wasserstoff-im-waermemarkt.pdf>, Zugriffsdatum: 02.05.2022.

Ghorfa - Ghorfa Arab - German Chamber of Commerce and Industry (2020),
Bundesregierung unterzeichnet Wasserstoff-Abkommen mit Marokko, Quelle:
<https://ghorfa.de/de/bundesregierung-unterzeichnet-wasserstoff-abkommen-mit-marokko/>,
Zugriffsdatum: 17.05.2022.

Greenpeace Energy EG (2020), *Blauer Wasserstoff Perspektiven und Grenzen eines neuen
Technologiepfades*, Quelle: <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>,
Zugriffsdatum: 30.05.2022.

IW Köln – Institut der deutschen Wirtschaft Köln (2022), *Russisches Gas: Verkraftet Europa
einen Importstopp?*; Quelle: <https://www.iwkoeln.de/presse/iw-nachrichten/verkraftet-europa-einen-importstopp.html>, Zugriffsdatum: 22.05.2022.

Neuman & Esser Group (o.J.), *Wasserstoff-Transport mit Pipelines*; Quelle:
<https://www.neuman-esser.de/unternehmen/media/blog/wasserstoff-transport-mit-pipelines/>,
Zugriffsdatum: 30.04.2022.

Port of Rotterdam (o.J.), *Der Hafen, der Sie weiter bringt*; Quelle:
<https://www.portofrotterdam.com/de/warum-rotterdam/der-hafen-der-sie-weiter-bringt>,
Zugriffsdatum: 24.05.2022.

Port of Rotterdam (2020), *Energiewende erfordert neue Pipelines zwischen Rotterdam, Chemelot und Nordrhein-Westfalen*, Quelle: <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/pipeline-infrastruktur-rotterdam-chemelot-und-nordrhein-westfalen.pdf>, Zugriffsdatum: 24.05.2022.

Port of Rotterdam (2021), *Rotterdam setzt auf Wasserstoff*; Quelle: <https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/rotterdam-setzt-auf-wasserstoff>, Zugriffsdatum: 24.05.2022.

Port of Rotterdam (2022), *Rotterdam kann Europa 2030 mit ca. 4,6 Millionen Tonnen Wasserstoff versorgen*; Quelle: <https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/rotterdam-kann-europa-2030-mit-ca-46-millionen-tonnen>, Zugriffsdatum: 24.05.2022.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Langfassung*; Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende; Quelle: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf, Zugriffsdatum: 09.05.2022.

Rheingas (o.J.), *Wasserstoff – Der Energieträger*; Quelle: <https://www.rheingas.de/wasserstoff>, Zugriffsdatum: 13.04.2022.

Roland Berger (2021), *Transportmöglichkeiten für den Kraftstoff der Zukunft*; Quelle: <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Transportm%C3%B6glichkeiten-f%C3%BCr-den-Kraftstoff-der-Zukunft.html>, Zugriffsdatum: 23.04.2022.

Shell Deutschland Oil GmbH (2017), *SHELL WASSERSTOFF-STUDIE ENERGIE DER ZUKUNFT? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2*; Quelle: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6647/file/6647_Wasserstoff-Studie.pdf, Zugriffsdatum: 14.04.2022.

Stiftung Energie & Klimaschutz (2022), *Wasserstoff im Wärmesektor – Champagner oder Grundnahrungsmittel?*; Quelle: <https://www.energie-klimaschutz.de/wasserstoff-im-waermesektor-champagner-oder-grundnahrungsmittel/>, Zugriffsdatum: 01.05.2022.

Stiftung Mercator GmbH (2021), *Internationale Beziehungen – für Menschen gedacht?*; Quelle: <https://www.aufrohr-magazin.de/europa/nebahat-tanriverdi-yasar-internationale-beziehungen-fuer-menschen-gemacht/>, Zugriffsdatum: 19.05.2022.

Tagesschau (2021), *Personalnot droht Energiewende auszubremsen*; Quelle: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/energiewende-fachkraeftemangel-101.html>, Zugriffsdatum: 21.05.2022.

UBA - Umweltbundesamt (2022), *Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem*; Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle>, Zugriffsdatum: 15.04.2022.

UBA - Umweltbundesamt (2021a), *Die Treibhausgase*; Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>, Zugriffsdatum: 19.04.2022.

UBA - Umweltbundesamt (2021b), *Emissionsquellen*; Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar>, Zugriffsdatum: 27.04.2022.

UBA Umweltbundesamt (2021c), *Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs)*; Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraftstoffe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#frage-1-wie-kann-wasserstoff-im-verkehr-eingesetzt-werden-und-welche-ziele-werden-damit-verfolgt>, Zugriffsdatum: 27.04.2022.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e.V. (o.J.), *Grau, blau, grün: Wasserstoff*; Quelle: https://www.vdi.de/energie-und-umwelt/wasserstoff?tx_vdi-publications_publicationdetails%5Baction%5D=details&tx_vdipu

blications_publicationdetails%5Bcontroller%5D=Publication&tx_vdi-publications_publication
details%5Bpublication%5D=426&cHash=2fb0cd601a041d0c91ce4bfa2e6bbcbc,

Zugriffsdatum: 12.04.2022.

Wasserstoffproduktion Ostschweiz AG (o.J.), *Das ist Wasserstoff*; Quelle:
<https://www.wasserstoffostschweiz.ch/wasserstoff/das-ist-wasserstoff/>, Zugriffsdatum:
12.04.2022.

Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer (2019), *Bremen,
Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein Norddeutsche
Wasserstoffstrategie*; Quelle:
[https://www.hamburg.de/contentblob/13179812/f553df70f865564198412ee42fc8ee4b/data/w
asserstoff-strategie.pdf](https://www.hamburg.de/contentblob/13179812/f553df70f865564198412ee42fc8ee4b/data/wasserstoff-strategie.pdf), Zugriffsdatum: 23.05.2022.

Zukunft Gas e.V. (o.J.), *Wasserstoff – Energieträger der Zukunft*; Quelle:
<https://gas.info/energie-gas/wasserstoff>, Zugriffsdatum: 13.04.2022.

Anhang

Anhang 1: Bereitstellung und Nutzung von Wasserstoff

Model	Scenario	Region	Variable	Unit	2020	2030	2040	2045
REMod	01_Referenz	DEU	+ Bio-zu-H2	TWh/yr	0,0	18,0	20,7	6,8
REMod	01_Referenz	DEU	+ Dampfreformierung	TWh/yr	0,0	0,0	0,0	0,0
REMod	01_Referenz	DEU	+ Elektrolyse	TWh/yr	0,0	20,3	142,5	201,3
REMod	01_Referenz	DEU	+ H2-Import	TWh/yr	0,0	20,0	50,0	122,8
REMod	01_Referenz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	0,0	-0,1	-6,8	-34,5
REMod	01_Referenz	DEU	- H2-Beimischung in Gasnetz	TWh/yr	0,0	-11,2	-6,5	-3,6
REMod	01_Referenz	DEU	- H2-Verstromung	TWh/yr	0,0	0,0	-0,2	-2,7
REMod	01_Referenz	DEU	- Industrie	TWh/yr	0,0	-24,9	-57,4	-83,8
REMod	01_Referenz	DEU	- Speicherübertrag	TWh/yr	0,0	-1,9	-7,5	-24,2
REMod	01_Referenz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	0,0	-19,2	-127,8	-172,1
REMod	01_Referenz	DEU	- Verluste	TWh/yr	0,0	-1,0	-7,1	-10,1
REMod	02_Beharrung	DEU	+ Bio-zu-H2	TWh/yr	0,0	11,7	14,2	11,8
REMod	02_Beharrung	DEU	+ Dampfreformierung	TWh/yr	0,0	0,0	0,0	0,0
REMod	02_Beharrung	DEU	+ Elektrolyse	TWh/yr	0,0	14,3	40,4	55,3
REMod	02_Beharrung	DEU	+ H2-Import	TWh/yr	0,0	27,8	45,6	50,8
REMod	02_Beharrung	DEU	- Gebäude	TWh/yr	0,0	-0,2	-0,3	-4,0
REMod	02_Beharrung	DEU	- H2-Beimischung in Gasnetz	TWh/yr	0,0	-14,3	-10,9	-8,8
REMod	02_Beharrung	DEU	- H2-Verstromung	TWh/yr	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
REMod	02_Beharrung	DEU	- Industrie	TWh/yr	0,0	-34,8	-83,7	-99,1
REMod	02_Beharrung	DEU	- Speicherübertrag	TWh/yr	0,0	-0,4	0,0	-0,2
REMod	02_Beharrung	DEU	- Verkehr	TWh/yr	0,0	-3,4	-3,1	-2,8
REMod	02_Beharrung	DEU	- Verluste	TWh/yr	0,0	-0,7	-2,0	-2,8
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ Bio-zu-H2	TWh/yr	0,0	40,8	59,6	38,8
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ Dampfreformierung	TWh/yr	0,0	1,3	0,5	0,0
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ Elektrolyse	TWh/yr	0,0	41,7	124,0	151,6
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ H2-Import	TWh/yr	0,0	20,0	50,0	125,0
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	0,0	0,0	-2,1	-57,1
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- H2-Beimischung in Gasnetz	TWh/yr	0,0	-14,9	-8,9	-4,8
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- H2-Verstromung	TWh/yr	0,0	0,0	0,0	-7,5
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Industrie	TWh/yr	0,0	-24,2	-42,0	-66,3
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Speicherübertrag	TWh/yr	0,0	-12,7	-13,7	15,5
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	0,0	-49,9	-161,1	-187,6
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Verluste	TWh/yr	0,0	-2,1	-6,2	-7,6
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ Bio-zu-H2	TWh/yr	0,0	21,8	20,4	9,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ Dampfreformierung	TWh/yr	0,0	0,0	0,0	0,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ Elektrolyse	TWh/yr	0,0	6,6	34,5	52,5
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ H2-Import	TWh/yr	0,0	12,1	29,5	55,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	0,0	-0,4	-7,2	-17,5
REMod	04_Suffizienz	DEU	- H2-Beimischung in Gasnetz	TWh/yr	0,0	-11,3	-6,4	-3,6
REMod	04_Suffizienz	DEU	- H2-Verstromung	TWh/yr	0,0	-0,1	-0,2	-0,5
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Industrie	TWh/yr	0,0	-24,4	-43,2	-44,3
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Speicherübertrag	TWh/yr	0,0	-0,1	-0,6	-0,2
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	0,0	-4,0	-25,2	-48,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Verluste	TWh/yr	0,0	-0,3	-1,7	-2,6

Quelle: Fraunhofer ISE (2021).

Anhang 2: Bereitstellung und Nutzung von Flüssigkraftstoffen

Model	Scenario	Region	Variable	Unit	2020	2030	2040	2045
REMod	01_Referenz	DEU	+ Biodiesel	TWh/yr	28,0	36,1	51,4	54,6
REMod	01_Referenz	DEU	+ SynFuel	TWh/yr	3,0	2,2	6,1	9,3
REMod	01_Referenz	DEU	+ SynFuel-Import	TWh/yr	0,0	20,0	50,0	124,7
REMod	01_Referenz	DEU	+ Öl-Import	TWh/yr	913,7	609,0	161,2	0,0
REMod	01_Referenz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	-182,3	-74,8	-0,1	-0,1
REMod	01_Referenz	DEU	- Industrie	TWh/yr	-37,1	-16,5	-0,1	0,0
REMod	01_Referenz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	-615,6	-463,1	-146,9	-62,5
REMod	01_Referenz	DEU	- internationale Luft- und Schifffahrt	TWh/yr	-103,8	-112,7	-121,5	-125,9
REMod	01_Referenz	DEU	- Ölverstromung	TWh/yr	-5,9	-0,2	-0,1	-0,1
REMod	02_Beharrung	DEU	+ Biodiesel	TWh/yr	28,1	33,4	0,2	0,3
REMod	02_Beharrung	DEU	+ SynFuel	TWh/yr	2,5	4,9	11,7	15,7
REMod	02_Beharrung	DEU	+ SynFuel-Import	TWh/yr	0,0	150,0	574,5	609,5
REMod	02_Beharrung	DEU	+ Öl-Import	TWh/yr	914,3	599,5	0,1	0,0
REMod	02_Beharrung	DEU	- Gebäude	TWh/yr	-182,3	-81,4	-2,4	-48,0
REMod	02_Beharrung	DEU	- Industrie	TWh/yr	-37,1	-17,3	-0,3	-5,3
REMod	02_Beharrung	DEU	- Verkehr	TWh/yr	-615,5	-576,3	-462,1	-446,2
REMod	02_Beharrung	DEU	- internationale Luft- und Schifffahrt	TWh/yr	-103,8	-112,7	-121,5	-125,9
REMod	02_Beharrung	DEU	- Ölverstromung	TWh/yr	-6,1	-0,2	-0,1	-0,1
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ Biodiesel	TWh/yr	28,0	30,0	29,8	6,5
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ SynFuel	TWh/yr	2,5	1,2	3,7	9,1
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ SynFuel-Import	TWh/yr	0,0	20,0	50,0	125,0
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	+ Öl-Import	TWh/yr	913,7	486,8	87,2	0,6
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	-182,3	-74,7	0,0	0,0
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Industrie	TWh/yr	-37,1	-16,5	0,0	0,0
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	-614,8	-334,1	-49,1	-15,3
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- internationale Luft- und Schifffahrt	TWh/yr	-103,8	-112,7	-121,5	-125,9
REMod	03_Inakzeptanz	DEU	- Ölverstromung	TWh/yr	-6,2	-0,1	0,0	0,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ Biodiesel	TWh/yr	28,0	43,1	57,2	78,7
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ SynFuel	TWh/yr	2,5	4,1	19,8	27,6
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ SynFuel-Import	TWh/yr	0,0	5,7	50,0	125,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	+ Öl-Import	TWh/yr	896,5	564,4	175,7	0,8
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Gebäude	TWh/yr	-183,4	-78,5	-0,3	-0,7
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Industrie	TWh/yr	-37,2	-16,7	-0,1	-0,1
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Verkehr	TWh/yr	-613,6	-445,1	-234,6	-168,3
REMod	04_Suffizienz	DEU	- internationale Luft- und Schifffahrt	TWh/yr	-85,8	-76,7	-67,5	-63,0
REMod	04_Suffizienz	DEU	- Ölverstromung	TWh/yr	-7,0	-0,3	-0,1	-0,1

Quelle: Fraunhofer ISE (2021).

Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder in ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Altena, 26.06.2022

Ort, Datum

D. Steinwurz

Unterschrift