



# **FOM Hochschule für Oekonomie & Management**

Hochschulzentrum Dortmund

## **Masterarbeit**

zur Erlangung des Grades eines  
**Master of Science (M.Sc.)**

über das Thema

**Die Transformation hin zu einer deutschen Wasserstoffwirtschaft –  
Eine szenariobasierte Untersuchung richtungsweisender Zusammenhänge**

von

B.A. Mathis Levermann

Erstgutachter	Prof. Dr. Dietmar Wechsler
Matrikelnummer	384756
Abgabedatum	07.11.2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage .....	2
1.3	Vorgehensweise.....	2
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>3</b>
2.1	Wasserstoff.....	3
2.1.1	Definition und Erzeugungsarten von Wasserstoff .....	3
2.1.2	Einsatzbereiche von Wasserstoff .....	6
2.2	Methodik Szenarioanalyse.....	7
2.2.1	Definition Szenario.....	7
2.2.2	Cross-Impact Bilanzanalyse.....	10
2.2.3	Konsistenzwert .....	11
2.2.4	Wirkungstotale .....	12
2.2.5	Aktiv- und Passivsumme .....	13
<b>3</b>	<b>Grundlage der Erarbeitung und Bestimmung der Cross-Impact-Matrix .....</b>	<b>13</b>
3.1	Literaturauswahl zur Bildung der Szenarioanalyse .....	13
3.2	Grundannahmen in der Erarbeitung der Schlüsselfaktoren .....	14
3.3	Abstraktion der Schlüsselfaktoren .....	16
3.3.1	Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland .....	16
3.3.2	Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor .....	18
3.3.3	Verfügbarkeit von Rohstoffen .....	20
3.3.4	Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie .....	22

3.3.5	Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten.....	24
3.3.6	Technologischer Fortschritt .....	25
3.3.7	Preisstabilität für den Endverbraucher .....	26
3.3.8	Politisch strategische Ausrichtung.....	28
3.3.9	Arbeitsplatzentwicklung.....	30
3.3.10	Infrastrukturelle Entwicklung der deutschen Wasserstoffwirtschaft	32
3.3.11	Öffentliche Fördermittel.....	34
3.3.12	Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung .....	35
3.3.13	Bewahrung einer nicht direkt von anderen Staaten abhängigen Energieversorgung.....	38
3.3.14	Betriebssicherheit bei Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff .....	39
3.3.15	Stör- und Extremereignisse.....	41
3.3.16	Gesellschaftlicher Konsens.....	41
4	Bestimmung der Wechselwirkungen .....	43
4.1	Grundannahmen in der Bestimmung der Wechselwirkungen .....	43
4.2	Bestimmung der Wechselwirkungen .....	44
4.2.1	Einflüsse des Faktors Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland.....	44
4.2.2	Einflüsse des Faktors Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor .....	48
4.2.3	Einflüsse des Faktors Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie.....	51
4.2.4	Einflüsse des Faktors Produktion von Wasserstofftechnologien und - komponenten .....	54
4.2.5	Einflüsse des Faktors Technologischer Fortschritt.....	56

4.2.6	Einflüsse des Faktors Politisch strategische Ausrichtung .....	58
4.2.7	Einflüsse des Faktors Öffentliche Fördermittel .....	60
4.2.8	Einflüsse des Faktors Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung .....	62
4.2.9	Einflüsse des Faktors Stör- und Extremereignisse .....	64
4.2.10	Einflüsse des Faktors Gesellschaftlicher Konsens .....	65
5	Analyse der entstandenen Szenarien.....	67
5.1	Aktiv-Passiv-Summen Diagramm.....	67
5.2	Gegenüberstellung der Szenarien .....	69
5.3	Der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft .....	71
5.4	Das Scheitern der Wasserstoffwirtschaft .....	73
5.5	Chancen und Risiken .....	74
6	Handlungsempfehlung .....	77
7	Kritische Reflexion und wissenschaftliche Weiterführung.....	80
8	Fazit.....	81

**Abkürzungsverzeichnis**

AEL / AEM	=	Alkalische Wasserelektrolyse mit flüssiger Kalilauge alternativ: Chlor-Alkali-Elektrolyse
BIP	=	Bruttoinlandsprodukt
CCS	=	Carbon capture and storage
CCU	=	Carbon capture usage
CIB	=	Cross-Impact Bilanzanalyse
CIM	=	Cross-Impact Matrix
CO <sub>2</sub>	=	Kohlenstoffdioxid
EU	=	Europäische Union
FCH JU	=	Fuel cells and hydrogen joint undertaking
HTEL / SOEC	=	Hochtemperatur-Elektrolyse Alternativ: Festoxid-Elektrolyse
NOW GmbH	=	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen- technologie GmbH
PEM	=	Saure-Membran-Elektrolyse alternativ: Proton-Exchange-Elektrolyse
TRL	=	Technology Readiness Level

**Einheitenverzeichnis**

Allgemeine Einheiten:

°C	=	Grad Celsius	
kg	=	Kilogramm	
t	=	Tonne	= 1.000 kg

Elektronische Einheiten:

W	=	Watt	
kW	=	Kilowatt	
MW	=	Megawatt	
GW	=	Gigawatt	
TW	=	Terawatt	
kWh	=	Kilowattstunde	
MWh	=	Megawattstunde	
GWh	=	Gigawattstunde	
TWh	=	Terawattstunde	
kWh pro kg	=	Kilowattstunden pro Kilogramm	
g/kW	=	Gramm pro Kilowatt	
TWh/a	=	Terawattstunden pro Jahr	

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Genutzte Einflussstärken in der Cross-Impact Balance Matrix .....	15
Tabelle 2: Vergleich der Wasserstofffarben Grün, Türkis und Blau .....	18
Tabelle 3: Faktorausprägungen inkonsistenter Szenarien.....	75

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Trichtermodell.....9  
Abbildung 2: Ausschnitt einer nicht ausgefüllten CIB-Matrix ..... 11  
Abbildung 3: Aktiv-Passiv-Summen Diagramm der Schlüsselfaktoren.....68  
Abbildung 4: Detailansicht der entstandenen Szenarien..... 69

## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Die Umstellung auf eine emissionsfreie Wirtschaft ist eine massive Herausforderung für Deutschland. Die Bundesregierung hat sich verpflichtet im Einklang mit den Zielen der Europäischen Union und dem Pariser Abkommen eine Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen. Die Erderwärmung soll dabei die Schwelle von 1,5 °C zum vorindustriellen Niveau nicht übertreffen. Eine dazu notwendige Energiewende erzeugt einen Wandel im gesamten Energie- und Wirtschaftssystem. Diese Herausforderung ist systemübergreifend und komplex. Dabei sind das genaue Ausmaß und die notwendigen Maßnahmen zur Bewältigung dieser Problematik noch unklar. Es müssen insbesondere fossile Energieträger durch solche ersetzt werden, die emissionsarm oder emissionsfrei erzeugt werden können. Somit ist erkennbar, dass ein Wandel im System hin zur Nachhaltigkeit und erneuerbarer Energie erfolgen muss. Innerhalb dieses Wandels bietet Wasserstoff einen Lösungsansatz für verschiedene Anwendungsbereiche. Er kann übergreifend eingesetzt werden und bietet somit ein verbindendes stofflich und energetisch nutzbares Ausgangsmaterial für verschiedene Sektoren. Zur weiteren Nutzung kann er auch in andere Stoffe, wie z.B. Methan, umgewandelt werden. Dieses Potenzial hat die Bundesregierung veranlasst 2020 eine nationale Wasserstoffstrategie zu veröffentlichen, welche als Leitinstrument für den kommenden Wandel dienen soll. Der Fokus liegt dabei laut Bundesregierung auf einer langfristigen Etablierung von nachhaltigem Wasserstoff, der auf Basis von erneuerbaren Energien hergestellt wird. Bedingt durch die notwendigen Investitionen und langen Lebenszyklen von Industrieanlagen, beispielsweise im Energiesektor, muss die Umstellung auf den Energieträger Wasserstoff zeitnah erfolgen. In der Literatur werden die dabei wirkenden Einflussfaktoren und deren komplexe Zusammenhänge im Gesamtsystem ungenau beschrieben. Eine transparente Basis zur Entscheidungsfindung für die Transformation der deutschen Wasserstoffwirtschaft ist somit aktuell nicht vorhanden.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.1; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.25; Kruse, M., Wedemeier, J., Potenzial grüner Wasserstoff, 2021, S.1 in Wirtschaftsdienst; NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S.17; MWIDE, Energieforschungsbericht, 2020, S.44; Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.1.

## 1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, einen Einblick zu gewinnen, in welche Richtung sich die deutsche Wasserstoffwirtschaft bis zum Jahr 2040 entwickeln kann. Dabei soll den Unsicherheiten entgegengewirkt werden, die aktuell im Rahmen der Wasserstofftechnologieentwicklung z.B. für Politik, Gesellschaft und Wirtschaft bestehen, indem Handlungsempfehlungen auf Grundlage einer Szenarioanalyse abgegeben werden. Die Szenarien werden dabei auf Basis der (Balanced) Cross-Impact-Analyse ermittelt und auf Plausibilität geprüft. Des Weiteren werden im Rahmen der Analyse die Schlüsselfaktoren, die auf die Transformation der deutschen Wasserstoffwirtschaft einwirken, präzisiert. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfrage und weiterführende Teilfragen:

Welche Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen lassen sich aus unterschiedlichen Szenarien für eine wasserstoffbasierte Transformation der deutschen Wirtschaft ableiten?

- a. Welche Szenarien können sich dabei ergeben?
- b. Welche Chancen und Risiken ergeben sich jeweils?
- c. Was ist das optimale Szenario für die deutsche Wirtschaft und wie kann es erreicht werden?

Die vorliegende Arbeit soll dabei helfen, Unsicherheiten über den Verlauf des Wandels zu mindern und entsprechende Maßnahmen zu bilden, mit denen eine möglichst adäquate Etablierung von Wasserstoff gelingen kann.

## 1.3 Vorgehensweise

Zunächst werden im Rahmen der Arbeit die theoretischen Grundlagen gebildet und erläutert. Dazu gehört im ersten Schritt eine Definition von Wasserstoff und eine Erklärung der gängigen Erzeugungsarten. Im Nachgang werden die Einsatzbereiche von Wasserstoff dargestellt. Im nächsten Schritt wird die Methodik näher erklärt. Dazu gehört eine Definition des Szenario-Begriffs und eine nähere Darstellung der Cross-Impact-Analyse. Nach den theoretischen Erläuterungen folgt eine kurze Literaturübersicht, welche die Grundlage der Methodik bildet. Im Nachgang erfolgt der Übergang zur praktischen Anwendung der Methodik. Es werden die einzelnen Schlüsselfaktoren der Analyse gebildet. Von insgesamt sechszehn Schlüsselfaktoren werden die zehn aussagekräftigsten zur

weiteren Betrachtung ausgewählt. Die Schlüsselfaktoren bilden dabei die Basis, auf der die Wechselwirkungen im ScenarioWizard erstellt werden. Durch diese Wechselwirkungen berechnet das Programm die Szenarien. Die gebildeten Szenarien werden anschließend analysiert und erklärt. Dann erfolgt eine Gegenüberstellung der Szenarien untereinander. Auf dieser Grundlage werden die Handlungsempfehlungen gebildet. Nach der Diskussion der Ergebnisse erfolgt eine kritische Reflexion und ein Überblick über die mögliche wissenschaftliche Weiterführung der Arbeit. Abschließend erfolgt ein Fazit. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Szenarien und Szenarios synonym verwendet.

## **2 Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Wasserstoff**

#### **2.1.1 Definition und Erzeugungsarten von Wasserstoff**

Wasserstoff (H) ist ein chemisches Element und das kleinste und leichteste Atom<sup>2</sup> im Periodensystem. Er hat keinen Geruch, ist nicht toxisch und verflüchtigt sich leicht. Aufgrund seines hohen Energiegehalts von 33,3 kWh pro kg bzw. 3 kWh pro Kubikmeter<sup>3</sup> kann es als Ersatzprodukt für Erdgas, welches zu 80-99%<sup>4</sup> aus Methan besteht, gesehen werden. Im Vergleich hat Wasserstoff eine geringere Energiedichte in Bezug auf das Volumen als Methan. Allerdings liegt die massenbezogene Energiedichte höher.<sup>5</sup> Somit kann Methan in Bezug auf seinen Energiegehalt zu einem großen Prozentsatz mit Wasserstoff substituiert werden. Dafür muss Wasserstoff jedoch komprimiert werden. Wasserstoff, der industriell genutzt werden kann, kann nicht direkt in der Natur abgebaut werden. Er muss durch Einbringung von Energie in chemischen Verbindungen produziert und konzentriert werden.<sup>6</sup> Wasserstoff kann auf verschiedene Arten erzeugt werden. Die Arten der Erzeugung unterscheiden sich im Ausstoß von Emissionen und in der Nutzung

---

<sup>2</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15.

<sup>3</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15.

<sup>4</sup> Vgl. GASAG, Sicherheitsdatenblatt Erdgas, 1999, S.3.

<sup>5</sup> Vgl. Enagás et al., European Hydrogen Backbone, 2020, S.10.

<sup>6</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15.

von verschiedenen Grundstoffen. Benannt werden sie durch eine Farbskala. Die vorrangig genutzten Farben sind:<sup>7</sup>

- Grün – Elektrolyse basierend auf Strom durch erneuerbare Energien
- Grau – Größtenteils Dampfreformierung von Erdgas, aber auch möglich mit anderen fossilen Brennstoffen
- Blau – Grauer Wasserstoff bei dem per Carbon Capture Storage (CCS) CO<sub>2</sub> gebunden und gespeichert wird (CO<sub>2</sub>-neutral)
- Türkis – Herstellung durch Methanpyrolyse mit zusätzlicher Entstehung von festem Kohlenstoff (Voraussetzung: Energieversorgung aus erneuerbaren Energien bzw. CO<sub>2</sub>-neutralen Quellen und dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs)
- Sonstige (z.B. Pink – Elektrolyse basierend auf Atomstrom)

Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen, wie z.B. Erdgas, per Dampfreformierung hergestellt. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 70-75%.<sup>8</sup> Im Herstellungsprozess wird Erdgas unter hohen Temperaturen von ca. 1.000 °C zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) umgewandelt. Dabei werden ca. 9 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Wasserstoff frei.<sup>9</sup> Grauer Wasserstoff ist aktuell die emissionsstärkste Art Wasserstoff herzustellen. Pro Jahr werden weltweit ca. 60-75 Mio. t Wasserstoff hergestellt.<sup>10</sup> Dies entspricht 1% des weltweiten Primärenergieeintrags und somit 330 Mio. t CO<sub>2</sub> Emissionen. Im deutschen Vergleich werden 93% grau und 7% per Elektrolyse hergestellt.<sup>11</sup> Türkiser und blauer Wasserstoff basiert ebenfalls auf grauem Wasserstoff. Dabei werden in weiteren Schritten CO<sub>2</sub> Emissionen gebunden, gespeichert oder industriell genutzt.<sup>12</sup> Der Herstellungsprozess für türkisen Wasserstoff heißt Methanpyrolyse. Dabei entstehen aus den Grundstoffen Wasser und Methan, die Produkte Wasserstoff und fester Kohlenstoff. Blauer Wasserstoff wird durch Abscheidung von CO<sub>2</sub> und die nachfolgende Nutzung (Carbon capture usage (CCU)) oder der Speicherung (Carbon capture and storage (CCS)) hergestellt.

---

<sup>7</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.29; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16; Bundesnetzagentur, Regulierung von Wasserstoffnetzen, 2020, S.16; Fraunhofer IEE, Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem, 2020, S.17.

<sup>8</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15; Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.85.

<sup>9</sup> Vgl. Adam, P. et al., Wasserstoffinfrastruktur, 2020, S.7.

<sup>10</sup> Vgl. Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.85; Adam, P. et al., Wasserstoffinfrastruktur, 2020, S.7.

<sup>11</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.10.

<sup>12</sup> Vgl. Adam, P. et al., Wasserstoffinfrastruktur, 2020, S.6.

Dabei können bis zu 90% des CO<sub>2</sub> abgefangen und gespeichert werden.<sup>13</sup> Je nach Aufwand kann auch ein Teil der restlichen 10% gebunden werden. Blauer Wasserstoff verursacht ca. 1/12 – 1/5 der Emissionen von Wasserstoff<sup>14</sup> der Stand 2020 aus dem normalen Strommix per Elektrolyse hergestellt wird. Die letzte Gruppe ist der grüne Wasserstoff. Dieser wird durch Elektrolyse in einem Elektrolyseur gewonnen. Dabei entstehen, je nach Herkunft des genutzten Stroms, wenig bis gar keine Emissionen. Dies gilt insbesondere für Strom, der aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. In dem Elektrolyse-Verfahren wird Wasser mit Hilfe von Strom, in Wasser- und Sauerstoff gespalten. In der nationalen Wasserstoffstrategie wurde der Fokus insbesondere auf grünem und somit nachhaltigem Wasserstoff gesetzt. Es gibt innerhalb der Elektrolyse verschiedene Formen, die unterschiedlich funktionieren. Dazu zählen:<sup>15</sup>

1. Alkalische Wasserelektrolyse mit flüssiger Kalilauge bzw. Chlor-Alkali-Elektrolyse (AEL oder auch AEM)
2. Saure-Membran- bzw. Proton-Exchange-Elektrolyse (PEM)
3. Hochtemperatur- oder auch Dampfelektrolyse (HTEL oder auch SOEC)

Die alkalische Wasserelektrolyse ist die älteste Form der Elektrolyse und wird seit Jahrzehnten genutzt. Sie hat bewährte Wirkungsgrade von 61-68%<sup>16</sup> und hohe Lebensdauern, aber kann nur eine geringe Dynamik in der Nutzung aufweisen. Die AEL wird bei ca. 50-80 °C<sup>17</sup> durchgeführt. Das Technology Readiness Level (TRL)<sup>18</sup>, welches den Reifegrad einer Technologie auf einer Skala von eins bis neun versinnbildlicht, wird mit neun angegeben. Die PEM wurde in den vergangenen Jahren nur in Nischenanwendungen genutzt, ist aber durch die Energiewende wieder relevant für den breiten Einsatz geworden. Sie funktioniert bei ähnlichen Temperaturen wie die AEL und weist hohe Dynamiken in der Nutzung, eine gute und kompakte Bauweise und einen hohen Druck von 30-50 bar im Anschluss an die Elektrolyse auf. Der mittlere Gesamtwirkungsgrad liegt zwischen 60-70%, wobei er langfristig auf 65-75% gesteigert werden soll.<sup>19</sup> Das TRL der

---

<sup>13</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15f.

<sup>14</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15f.

<sup>15</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S.31; DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende – Teil 1, 2020, S.9f.

<sup>16</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16.

<sup>17</sup> Vgl. Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.12f.

<sup>18</sup> Siehe Anhang 2: Technology Readiness Level.

<sup>19</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16; Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.85f.

Technologie liegt bei sechs bis acht. Weiterhin befinden sich noch weitere Elektrolyseformen in der Entwicklung. Die neueste Form der Elektrolyse ist die HTEL<sup>20</sup> oder auch Hochtemperatur-Festoxidelektrolyse (SOEC)<sup>21</sup>. Sie wird bei ca. 800°C durchgeführt und hat bisher noch keinen breiten Feldtest erfahren. Es besteht die Möglichkeit, dass der Wirkungsgrad der SOEC langfristig bis auf 83% gesteigert werden kann.<sup>22</sup> Das TRL liegt bei vier bis sechs.<sup>23</sup>

Im letzten Jahrzehnt wurde ein Forschungsprojekt zur Wasserstoffherzeugung via Sonnenlicht gegründet.<sup>24</sup> Dies kann bis zum Jahr 2040 eine mögliche Alternative in der Wasserstoffproduktion bieten. Weitere Verfahren werden aktuell noch erforscht.<sup>25</sup> Stand 2021 besteht aber noch keine direkte Wettbewerbsfähigkeit. Der Fokus der Arbeit liegt in der erneuerbaren Gewinnung von Wasserstoff durch Elektrolyse. Daher werden andere Möglichkeiten, wie z.B. Erzeugung von Wasserstoff durch solare Wasserspaltung, im weiteren Verlauf der Arbeit vernachlässigt.

### 2.1.2 Einsatzbereiche von Wasserstoff

Wasserstoff gilt als universell nutzbarer Energieträger, welches insbesondere in der Energiewende das Schlüsselement zwischen verschiedenen Sektoren bilden könnte. Die Hauptbereiche der Nutzung liegen in Lang- und Kurzzeitspeicherung von erneuerbaren Energien, Industrie- und Chemieanwendungen und im Mobilitätssektor.<sup>26</sup> Es gibt noch weitere Anwendungen, wie beispielsweise in der Umwandlung zu Wärme im Gebäudesektor. Hierbei werden sich wahrscheinlich andere Technologien, wie z.B. die Wärmepumpe durchsetzen.<sup>27</sup> Das Fuel Cell Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) nimmt an, dass die EU ohne Wasserstoff das Dekarbonisierungsziel verpasst.<sup>28</sup> Auch wird im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung Wasserstoff als Grundbaustein zur Umsetzung

<sup>20</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEde, 2018, S.31.

<sup>21</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16.

<sup>22</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16; Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.85.

<sup>23</sup> Vgl. CEA et al., HySpeedInnovation, 2020, S.13; Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.12f.

<sup>24</sup> Vgl. Schnurnberger, Dr. W., Methoden der Wasserstoffherzeugung, 2004, S.51f. in FVS Themen; Spektrum, Focus Hydrogen, 2020, S. 56ff.

<sup>25</sup> Vgl. Spektrum, Focus Hydrogen, 2020, S. 62ff.; Ebd. S.68ff.

<sup>26</sup> Vgl. van Wijk, Prof. Dr. A., Chatzimarkakis, J., 2x40GW Initiative, 2020, S.7.

<sup>27</sup> Vgl. Fraunhofer IEE, Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem, 2020, S.41f.

<sup>28</sup> Vgl. van Wijk, Prof. Dr. A., Chatzimarkakis, J., 2x40GW Initiative, 2020, S.7.

der Klimaziele angesehen.<sup>29</sup> Dabei ist eine permanente Nutzung von Wasserstoff in verschiedenen Sektoren notwendig.

Eine entsprechende Substitution in einem Großteil der Bereiche ist möglich, jedoch abhängig von diversen unterschiedlichen Faktoren.<sup>30</sup> Die Erwartung ist, dass die Wasserstoff-Bedarfe wachsen und er ein Substitut zu bisherigen Anwendungen von z.B. Erdgas bildet.<sup>31</sup> Erste Demonstrationsanlagen entstehen dabei in Deutschland in großskaligen Industrieproduktionen.<sup>32</sup> Dennoch sind nicht in jedem Fall die Substitutionen bereits industriell durchführbar. Beispielweise ist die Anwendung im Flug- und Schiffsverkehr aktuell noch nicht ohne fossile Treibstoffe sinnvoll.<sup>33</sup> Dies liegt unter anderem an den notwendigen Investitionsbedarf für die Umstellung auf Wasserstofftechnologien und für den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung.<sup>34</sup> Positiv anzusehen ist, dass weltweit diverse Projekte und Investitionen bereits getätigt wurden und sich in der Umsetzungsphase befinden.<sup>35</sup> Ein ausführlicherer Überblick über die verschiedenen Einsatzbereiche ist in Anhang drei aufgeführt.

## 2.2 Methodik Szenarioanalyse

### 2.2.1 Definition Szenario

Szenarien werden heutzutage weitläufig in der unternehmerischen Planung oder zur Technologievorausschau verwendet. Sie versuchen der Unsicherheit der Zukunft entgegenzuwirken und bilden eine möglichst robuste und resiliente Grundlage zur Erarbeitung von Strategien.<sup>36</sup> Die Erarbeitung verschiedener möglicher Zukunftsentwicklungen soll somit Orientierungswissen zur Verfügung stellen.<sup>37</sup> Nach Weimer-Jehle bilden sich dabei folgende Planungsschritte:<sup>38</sup>

1. Zusammenfassung und Recherche zum Entscheidungsfeld
2. Aufarbeitung der Schlüsselfaktoren

---

<sup>29</sup> Vgl. Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.6.

<sup>30</sup> Vgl. Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.5.

<sup>31</sup> Vgl. van Wijk, Prof. Dr. A., Chatzimakakis, J., 2x40GW Initiative, 2020, S.7.

<sup>32</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.9.

<sup>33</sup> Vgl. Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1.Roadmap Power-to-X, 2018, S.126.

<sup>34</sup> Vgl. Agora Energiewende, Wuppertal Institut, Klimaneutrale Industrie, 2019, S.10; Agora Energiewende et al., strombasierte synthetische Brennstoffe, 2018, S.11.

<sup>35</sup> Vgl. Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021, S.6f.

<sup>36</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Szenarienentwicklung mit der Cross-Impact Bilanzanalyse, 2009, S. 1f.

<sup>37</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.11.

<sup>38</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Szenarienentwicklung mit der Cross-Impact Bilanzanalyse, 2009, S. 1f.

3. Erarbeitung von Varianten zur Entwicklung der Schlüsselfaktoren
4. Bildung von Szenarien
5. Bildung von Strategien anhand der entstandenen Szenarien

Für den Begriff Szenario besteht kein Konsens in der Wissenschaft. Der Begriff wird weitläufig ähnlich verwendet, allerdings fehlt eine klare Definition.<sup>39</sup> Es gibt diverse Ansätze, die von einfachen Planungsszenarien bis hin zur hochkomplexen Entwicklung reichen. Der Konsens in den Ansätzen besteht darin, dass ein Gesamtsystem erstellt wird, welches einen Schluss von der Gegenwart auf die verschiedenen Teilbereiche in der Zukunft ermöglicht. Es sollen dabei unter Zuhilfenahme kritischer Faktoren verschiedene und potenziell mögliche Zukunftsverläufe aufgezeigt werden. Dabei wird in keinem Fall Vollständigkeit erwartet. Jedoch muss jedes Bild der Zukunft sinnvoll und in sich stimmig sein.<sup>40</sup> Der Weg zu diesem Ziel ist dabei nicht klar gesetzt. Ein klarer Unterschied besteht zu Prognosen, die versuchen, die Zukunft anhand von Entwicklungen in der Vergangenheit vorherzusagen. Dabei sind die Rahmenbedingungen gesetzt und können sich nicht, wie bei Szenarios, dynamisch verändern oder anpassen. Des Weiteren werden Prognosen nur für einen relativ nahen Zeithorizont genutzt und sind im Vergleich zu Szenarios eher einfach angelegt.<sup>41</sup>

Grundsätzlich lassen sich Szenarioanalysen dabei in explorative oder normative Ansätze aufteilen. Explorative Szenarien bilden Szenarien ungeachtet ihrer Wünschbarkeit ab. Normative Szenarien beziehen diesen Faktor mit ein.<sup>42</sup> Die in dieser Arbeit verwendete Szenarioanalyse hingegen bildet eine speziell formalisierte Szenarioanalyse, da die Konsistenzprüfung innerhalb der Cross-Impact Bilanzanalyse klar systematisiert ist.<sup>43</sup> Der explorative Ansatz bezieht weiterhin mit ein, was bereits vorhanden ist bzw. von den Erstellern gewusst wird und was nicht. Der normative Ansatz hingegen nimmt die Interessen der involvierten Akteure mit auf. Die zentrale Fragestellung ist dabei, wie sich die Zukunft gewünscht wird und welche Handlungen dafür notwendig sind. Dabei sind die Szenarien nicht weltfremd, sondern versuchen die Wege ein Ziel zu erreichen möglichst konkret abzubilden.<sup>44</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. Mietzner, D., Strategische Vorausschau und Szenarioanalyse, 2009, S.95ff.

<sup>40</sup> Vgl. Mietzner, D., Strategische Vorausschau und Szenarioanalyse, 2009, S.95ff.

<sup>41</sup> Vgl. Mietzner, D., Strategische Vorausschau und Szenarioanalyse, 2009, S.95ff.

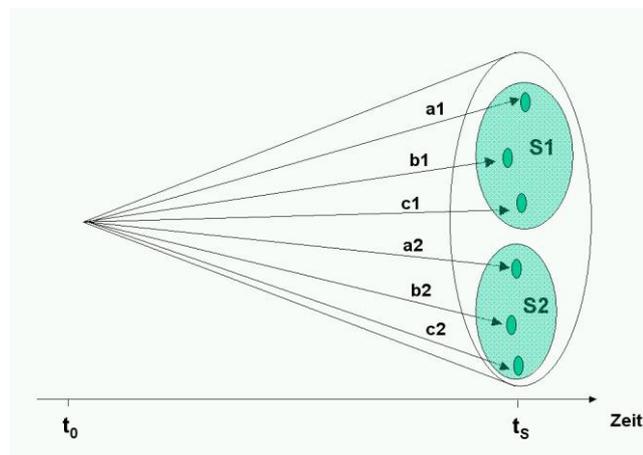
<sup>42</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.24f.

<sup>43</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.57.

<sup>44</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.23f.

Das Trichtermodell<sup>45</sup> ist dabei zentraler Bestandteil in der Szenarioentwicklung. Es veranschaulicht die Entwicklungen verschiedener Schlüsselfaktoren hin zu unterschiedlichen Szenarien. Jedes Szenario bildet dabei nur einen Teil der Zukunft ab. Das Modell ist in Abbildung 1 ersichtlich. Grundsätzlich entwickelt sich ein Szenario, wie z.B. S1, aus dem Zusammenspiel verschiedener Schlüsselfaktoren, wie z.B. a1, b1, etc., über einen Zeitraum vom Startpunkt  $t_0$  bis hin zum Endpunkt  $t_s$ . Je länger der Zeitraum der Betrachtung hin zu  $t_s$  gewählt wird, desto mehr mögliche zukünftige Entwicklungen können entstehen. Diese bilden einen Raum in Form eines Trichters ab. Die Bandbreite der Faktoren a bis c wird dabei über den Zeitverlauf größer. Der äußere Rand bildet dabei die Grenzen der Betrachtung. Entwicklungen darüber hinaus werden als unmöglich angesehen. Das Trichtermodell sieht aus wie folgt:

**Abbildung 1: Trichtermodell**



Quelle: IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse, 2008, S.13

Szenarien haben dabei oftmals das Problem, dass sie sich auf einzelne Expertenmeinungen oder einfache, implizite Modelle verlassen. Dabei besteht die Realität zumeist aus einem Zusammenspiel von nicht direkt erkennbaren Wechselwirkungen.<sup>46</sup> Hierbei setzt die Cross-Impact Bilanzanalyse an. Sie kombiniert die Interdependenzen der Experten- oder Literaturmeinungen in einer Matrix. Die einbezogenen Faktoren und Entwicklungen können dabei aus verschiedenen Teilgebieten stammen. Dimensionen, die relevant werden können, sind z.B. sozialer, politischer, technologischer oder wirtschaftlicher Natur. Die Matrix beinhaltet dabei die Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren untereinander.

<sup>45</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.12ff.

<sup>46</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Properties of Cross-Impact Balance Analysis, 2009, S.1f.

Jeder Faktor kann dabei von allen anderen beeinflusst werden und die anderen Faktoren beeinflussen.<sup>47</sup>

### 2.2.2 Cross-Impact Bilanzanalyse

Im Rahmen der Arbeit wird mit der Cross-Impact Bilanzanalyse gearbeitet. Das Programm ScenarioWizard, welches für die Auswertung genutzt wird, wurde vom Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart auf Basis der Cross-Impact Bilanzanalyse entwickelt.<sup>48</sup> Diese Methodik ist nach Definition eine speziell-formalisierte Szenariotechnik mit normativem Ansatz.

Im Rahmen der Arbeit wird weiterhin das Programm ScenarioWizard genutzt, um die Rechnungen der Matrizen der Wechselwirkungen zu vereinfachen. Die Vereinfachung erfolgt hierbei durch die Matrizen, welche das Netz der Wechselwirkungen versinnbildlichen, computerunterstützt deutlich einfacher und insbesondere schneller als bei einer händischen Berechnung. Die Software minimiert daher die Anfälligkeit für Fehler. Eine händische Berechnung ohne den ScenarioWizard würde den Rahmen der Arbeit deutlich übersteigen.

Im ersten Teil der praktischen Umsetzung der Szenarioanalyse werden zunächst Ziele gebildet, an denen sich die Schlüsselfaktoren orientieren sollen. Nachfolgend werden in Bezug auf die Ziele Schlüsselfaktoren der Entwicklung analysiert und mit Varianten versehen, die die Entwicklung der Schlüsselfaktoren versinnbildlichen.<sup>49</sup> Anschließend werden die Schlüsselfaktoren in eine Cross-Impact Matrix aufgenommen mit Hilfe der, die Einflüsse jeder Variante auf jede andere Variante jedes anderen Schlüsselfaktors aufgezeigt wird.<sup>50</sup> Das zentrale Objekt ist dabei die (Balanced) Cross-Impact-Matrix oder auch Cross-Impact Bilanzanalyse (CIB). Diese fungiert als Konzept zur Gegenüberstellung der Schlüsselfaktoren. Wenn die Schlüsselfaktoren und Ausprägungen, durch z.B. Literaturrecherche oder Experteninterviews, identifiziert sind, können sie mit Wechselwirkungen versehen werden. Zunächst entsteht folgende Datei:

---

<sup>47</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Properties of Cross-Impact Balance Analysis, 2009, S.1f.

<sup>48</sup> Vgl. ZIRIUS, CIB Lab, o.J., o.S.

<sup>49</sup> Siehe Anhang 4: Gegenüberstellung der Schlüsselfaktoren in Lang- und Kurzform.

<sup>50</sup> Siehe Anhang 5: Vereinfachte CIB nach Weimer-Jehle.

Abbildung 2: Ausschnitt einer nicht ausgefüllten CIB-Matrix

Projektarbeit Masterarbeit.scw	1. Energieeffizienz			2. Ausbau EE			3. Branchenübergreifender	
	Grün dom.	Blau dom.	Türkis dom.	Überdurchschnittlich	nach Plan	Stagnation	Stark	3. Branch
<b>1. Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland:</b>								
Grün dominant				0	0	0	0	
Blau dominant				0	0	0	0	
Türkis dominant				0	0	0	0	
<b>2. Ausbau und Einsatz von Erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor:</b>								
Übermäßiges Wachstum	0	0	0					0
Wachstum nach Plan	0	0	0					0
Stagnation des Ausbaus	0	0	0					0
<b>3. Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie:</b>								
Starke Branchendurchdringung	0	0	0	0	0	0		
Moderate Branchendurchdringung	0	0	0	0	0	0		
Schwache Branchendurchdringung	0	0	0	0	0	0		
<b>4. Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten:</b>								
Technologieführerschaft bei der gesamte Wertschöpfungskette	0	0	0	0	0	0		0
Teiltechnologien	0	0	0	0	0	0		0
Nischenanteile	0	0	0	0	0	0		0
<b>5. Technologischer Fortschritt:</b>								
Disruptiver erfolgreicher Durchbruch	0	0	0	0	0	0		0
Stetige Steigerung	0	0	0	0	0	0		0
Stagnation	0	0	0	0	0	0		0
<b>6. Politisch strategische Ausrichtung:</b>								
Pro	0	0	0	0	0	0		0
Neutral	0	0	0	0	0	0		0
Kontra	0	0	0	0	0	0		0
<b>7. Öffentliche Fördermittel:</b>								
Steigendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021	0	0	0	0	0	0		0
Gleichbleibendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021	0	0	0	0	0	0		0
Sinkendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021	0	0	0	0	0	0		0

Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb dieses Ausschnitts aus einer nicht ausgefüllten Cross-Impact-Matrix (CIM) wird ein Teil der Schlüsselfaktoren gegenübergestellt. Die Schlüsselfaktoren sind dabei jeweils an der linken und oberen Seite erkennbar. Vor der Erstellung der einzelnen Wechselwirkungen ist jede Wechselwirkung mit null hinterlegt. Innerhalb dieser Betrachtungsweise sind die Schlüsselfaktoren nicht komplett ausgeschrieben, um Unübersichtlichkeit zu vermeiden. Dazu werden Kurz-Namen genutzt. Jede Ausprägung jedes Schlüsselfaktors wirkt dabei von der linken Seite aus auf die jeweils anderen Faktorenausprägungen. Die Cross-Impact-Matrix ist dabei der letzte Schritt vor der Bildung der Szenarien durch das Programm. Sobald die Matrix der CIB ausgefüllt wurde, können direkt die Szenarien durch den ScenarioWizard gebildet werden. Im Allgemeinen verbindet die CIB-Methode dabei qualitative Aussagen und fokussiert sie in einem analytischen Modell.<sup>51</sup> Die einzutragenden Wechselwirkungen können verschiedene Werte annehmen. Beispielfhaft können sie von 0 bis 5, von -2 bis +2 oder von -3 bis +3 gewählt werden. Innerhalb dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen von -3 bis +3 genutzt, je nach Grad der positiven bzw. negativen Beeinflussung.

### 2.2.3 Konsistenzwert

Die Bewertung von Szenarien erfolgt durch verschiedene Kennwerte. Relevant sind insbesondere der Konsistenzwert bzw. Inkonsistenzwert und die Wirkungsbilanz. Er ist entscheidend für die Robustheit, Sinnhaftigkeit und logische Gleichheit der Szenarien. Der

<sup>51</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Properties of Cross-Impact Balance Analysis, 2009, S.1.

Konsistenzwert kann pro Deskriptor und pro Szenario betrachtet werden. Der Konsistenzwert wird gebildet aus der Differenz der im Szenario genutzten Deskriptor-Ausprägung und der bestmöglichen Alternative innerhalb der Deskriptor-Ausprägungen.<sup>52</sup> Das Minimum aller Deskriptor-Konsistenzen ergibt dabei die Szenario-Konsistenz. Um ein konsistentes Szenario zu bilden, muss der Konsistenzwert größer/gleich Null sein. Je höher ein Szenario-Konsistenzwert ist, desto mehr Änderungen können entstehen, ohne dass es inkonsistent wird. Im ScenarioWizard kann die Inkonsistenz eines Szenarios separat eingestellt werden. Somit können die Grenzen, ab wann ein Szenario als inkonsistent gilt, angepasst werden. Ein Konsistenzwert unter null resultiert in einem inkonsistenten und somit zu verwerfenden Szenario. Hintergrund ist, dass sobald ein Szenario eine einzelne klare Schwäche hat, seine innere Logik nicht mehr besteht und es somit nicht zielführend ist, dieses Szenario zu verfolgen. Der Konsistenzwert trifft somit eine Aussage über einzelne Konsistenzen in einem Szenario und über die Summe der Konsistenzen.<sup>53</sup>

#### **2.2.4 Wirkungstotale**

Die Wirkungstotale ist der nachfolgende Bewertungsmaßstab eines Szenarios. Sie wird herangezogen, wenn zwei oder mehr verschiedene Szenarien den gleichen Konsistenzwert beinhalten. Die Wirkungstotale trifft eine Aussage darüber, welches der Szenarien den höchsten Grad an logischer Robustheit beinhaltet. Sie wird gebildet, indem die Summe der Auswirkungen aller einzelnen ausgewählten Varianten ausgerechnet wird.<sup>54</sup> Wirkungstotalen geben einen Einblick in die innere Konsistenz eines Szenarios. Sie werden über die Cross-Impact-Matrix ausgewertet und zeigen, welche Einzelelemente eines Szenarios einen Kontrast zu welchen anderen Teilen bilden. Weiterhin zeigt sie, ob Widersprüche vorhanden sind und demnach ob das Szenario konsistent sein kann. Die Wirkungstotale bildet dabei eine separate Auswertung im Anschluss an die Bildung der Szenarien.<sup>55</sup>

---

<sup>52</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Guideline No.4, 2018, S.2.

<sup>53</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Guideline No.4, 2018, S.2.

<sup>54</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Guideline No.4, 2018, S.3.

<sup>55</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Anleitung ScenarioWizard, 2018, S.55f.

### **2.2.5 Aktiv- und Passivsumme**

Aktiv- und Passivsummen können vor der eigentlichen Bildung der Szenarien angewendet werden, um das Szenario vorab zu bewerten. Somit wird ein erster Überblick über die Konstruktion und die gegenseitige Beeinflussung der Deskriptoren im Szenario geschaffen. Die Aktivsumme gibt eine Aussage darüber, wie stark ein Deskriptor alle anderen Deskriptoren beeinflusst. Die Passivsumme gibt eine Aussage darüber, wie stark ein Deskriptor von allen anderen Deskriptoren beeinflusst wird. Die Aktiv- und Passivsummen werden jeweils gebildet, wenn die Cross-Impact-Matrix ausgefüllt ist. Dazu wird jeweils die Summe der Einflussmaßzahlen pro Spalte bzw. Zeile addiert und der Durchschnitt gebildet. Die Summe pro Spalte wird Passiv-Summe und die pro Zeile Aktiv-Summe genannt. Weiterführend kann durch diese Indikatoren eine Auswertung als System-Gitter erstellt werden. Diese findet sich in Anhang sieben. Diese Auswertung gibt eine erste Aussage darüber, welche Deskriptoren das Systemverhalten wahrscheinlich beeinflussen werden (Quadrant links oben), welche nur eine kleine oder gar keine Auswirkung haben (Quadrant rechts unten) und welche, die sowohl beeinflussen, als auch beeinflusst werden (Quadrant rechts oben). Hierbei werden jedoch nur die ersten, direkten Wechselbeziehungen ausgewertet. Demnach bildet sie nur den ersten Schritt zur Analyse der Einflussparameter und muss noch durch genauere Analysen gestützt werden.<sup>56</sup>

## **3 Grundlage der Erarbeitung und Bestimmung der Cross-Impact-Matrix**

### **3.1 Literatursauswahl zur Bildung der Szenarioanalyse**

Die für die Arbeit ausgewählte Literatur wird größtenteils von öffentlichen Institutionen gestellt. Dabei sind insbesondere Ministerien der Bundesregierung, Forschungszentren, öffentliche Vereine und nationale und internationale Zusammenschlüsse von Akteuren aus dem Wasserstoff-Umfeld involviert. Es ist dabei nicht auszuschließen, dass in der weiteren Betrachtung die Arbeit daher in eine mit den Ansichten der Autoren ähnliche Richtung tendiert. Die öffentlichen Institutionen sind dabei Wasserstoff in erster Linie gewogen und stoßen ihn nicht als Energieträger ab oder stellen ihn in Frage. Die Literatur wurde zunächst per Online-Recherche gesammelt und ausgewertet. Auffällig ist dabei die Aktualität der Veröffentlichungen. Größtenteils wurden die Publikationen ab 2018

---

<sup>56</sup> Vgl. Weimer-Jehle, Dr. W., Anleitung Scenariowizard, 2018, S.53f.

veröffentlicht. Erkennbar war, dass seit 2018 die Menge an Literatur zu dem Thema Wasserstoff im Allgemeinen zugenommen hat. Für die Arbeit war die Aktualität dahingehend relevant, dass ein möglichst genauer aktueller und adäquater Stand über das Thema abgebildet wird, der als Basis der Szenarioanalyse dient. Innerhalb der weiteren Betrachtung fällt auf, dass die Literatur in erster Linie von deutschen Herausgebern veröffentlicht wird. In zweiter Instanz wird die europäische Ebene ersichtlich. Vollkommen international geprägte Literatur wurde nur von wenigen großen Herausgebern (z.B. IRENA, IEA) genutzt.

### **3.2 Grundannahmen in der Erarbeitung der Schlüsselfaktoren**

Innerhalb der Szenarios gibt es eine zeitliche Begrenzung. Die Szenarien beziehen sich auf das Jahr 2040. Demnach ist der Fokus der vorliegenden Betrachtung ein Zeitraum von ca. 19 Jahren. Hintergrund für den Betrachtungszeitraum ist, dass sich eine Wasserstoffwirtschaft vor dem Jahr 2050 bilden muss, um die Klimaziele zu erreichen. Entsteht bis zum Jahr 2040 keine erfolgreiche deutsche Wasserstoffwirtschaft können noch Maßnahmen getroffen werden, um diese bis 2050 entstehen zu lassen.

Zunächst werden für die Erarbeitung der Schlüsselfaktoren Ziele gesetzt, an denen sich diese orientieren sollen. Diese Ziele der Faktoren sind:

1. CO<sub>2</sub>-Neutralität und ressourcenschonende Wasserstoffwirtschaft bis 2040
2. Entstehung einer wettbewerbsfähigen deutschen Wasserstoffwirtschaft
3. Branchenübergreifender Einsatz von Wasserstoff als Substitut für fossile Energieträger

Im Nachgang an die erste Bildung der Schlüsselfaktoren werden diese auf interne Sinnhaftigkeit geprüft. Dies erfolgt im ersten Schritt mit der Hilfe von Literaturquellen und Logik in Bezug auf die Zielzusammensetzung. Dabei soll vermieden werden, dass sich Faktoren doppeln, zu sehr ähneln oder für die Szenarioziele nicht relevant sind. Wahlweise können diese auch nur indirekt zu der Bildung der Szenarien beitragen. In diesem Zusammenhang ist die Relevanz der Literaturquellen noch einmal herauszustellen. Die Arbeit und insbesondere die Schlüsselfaktoren basieren auf Literaturquellen und nicht wie auch teilweise üblich auf Experteninterviews und mehrfacher Befragung ebenjener Experten. Dieser hat jedoch keine direkte Auswirkung auf die Konsistenz, da sowohl die Auswahl der Literaturquellen und ihre Extrapolation in der Arbeit, als auch

Experteninterviews einen gewissen Grad an Subjektivität beinhalten. Diese sollte dabei so gering wie möglich gehalten werden. Die Deskriptoren werden bei ihrer Bildung mit Ausprägungen versehen, in die sich der Faktor entwickeln könnte. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Ausprägungen und Varianten synonym verwendet. Diese Ausprägungen gelten als Ausrichtung der Deskriptoren. Beispielhaft werden für einen Deskriptor drei Varianten gebildet, in die sich der Schlüsselfaktor entwickeln könnte. Maximal kann ein Faktor im ScenarioWizard neun Ausprägungen enthalten. Um eine stringente Ausrichtung der Deskriptoren beizubehalten, werden pro Faktor drei Ausprägungen gewählt. Diese Deskriptoren und ihre Ausprägungen werden einzeln beschrieben und erklärt, um ein transparentes Bild über die Zusammensetzung der entstandenen Szenarien zu erhalten. Ohne diese Transparenz entstehen Szenarien, die vage und unschlüssig sind. Im Nachgang an die Benennung und Clusterung der Deskriptoren erfolgt die Überschreibung in die Form der Cross-Impact-Matrix. Hierbei werden die Deskriptoren auf gegenseitige Beeinflussung geprüft. Dieser Schritt erfolgt ebenfalls in enger Kombination mit der Literaturanalyse. Die Wechselwirkungen werden dabei von -3 bis +3 gebildet. Dabei unterscheiden sich die Zahlen in der Bedeutung des Einflusses:

**Tabelle 1: Genutzte Einflusstärken in der Cross-Impact Balance Matrix**

Numerische Eintragung in der CIB Matrix	Einfluss
-3	stark hemmender Einfluss
-2	moderat hemmender Einfluss
-1	schwach hemmender Einfluss
0	kein Einfluss
1	schwach fördernder Einfluss
2	moderat fördernder Einfluss
3	stark fördernder Einfluss

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Weimer-Jehle, Dr. W., Anleitung ScenarioWizard, 2018, S.11.

Diese Szenarien werden dann auf Konsistenz und innere Logik untersucht. Eine beispielhafte Szenariobeschreibung und das dazugehörige Tableau, eine weitere Darstellungsform von Szenarios, findet sich in Anhang acht. Die Untersuchung erfolgt durch die Überprüfung des Konsistenzwertes und der Wirkungstotale eines jeden Szenarios. Diese sind der erste Indikator, ob ein Szenario konsistent ist. Danach werden die Ausprägungen gegenübergestellt und auf Besonderheiten bzw. Unstimmigkeiten analysiert. Sollten

Faktoren innerhalb des Szenarios logisch gegeneinanderstehen, ist das Szenario als inkonsistent zu bewerten.

### **3.3 Abstraktion der Schlüsselfaktoren**

#### **3.3.1 Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland**

In den nachfolgenden Kapiteln werden die möglichen Schlüsselfaktoren zunächst gebildet und dabei auf Sinnhaftigkeit überprüft. Ziel ist es, nur die aussagekräftigsten in die Szenarioentwicklung mitaufzunehmen.

Aktuell basiert der größte Teil der Wasserstoffherstellung auf grauer Erzeugung.<sup>57</sup> Dieser steht dabei aufgrund der hohen Emissionen in direktem Konflikt mit den Zielen der Bundesregierung klimaneutral zu werden. Daher wird eine graue Erzeugung im weiteren Verlauf der Arbeit nicht als dominante Erzeugungsvariante weiterverfolgt. In der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung wird nur grüner Wasserstoff auf Grundlage von erneuerbaren Energien als nachhaltig angesehen. Es ist demnach auch die klare Zielsetzung der Bundesregierung grünen Wasserstoff zu fördern und den Markthochlauf zu unterstützen.<sup>58</sup> Demnach sollte bei den Ausprägungen eine Variante grünen Wasserstoff repräsentieren. Die Entwicklung von grünem Wasserstoff ist allerdings von vielen Faktoren abhängig und daher sind auch andere Erzeugungsarten relevant. Die Bundesregierung verweist daher im gleichen Zusammenhang auch auf blauen und türkisen Wasserstoff, welche insbesondere bis 2030 und möglicherweise darüber hinaus einen klaren Anteil an der Wasserstoffherzeugung in Deutschland haben werden. Nach aktuellem Stand kann ebenfalls keine hundertprozentige Versorgung mit grünem Wasserstoff entstehen. Dies basiert auf der Produktion von Wasserstoff als Nebenprodukt in beispielsweise der Petrochemie bei der Benzinreformierung.<sup>59</sup>

Grüner Wasserstoff kann dabei auch durch andere Verfahren neben der Elektrolyse gewonnen werden.<sup>60</sup> Diese Verfahren befinden sich aktuell noch in der Erforschung. Der Fokus besteht somit auf der Elektrolyse, im Bestfall mit erneuerbaren Energien. Daher

---

<sup>57</sup> Vgl. IKEM, Wasserstoff - Farbenlehre, 2020, S.12.

<sup>58</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.2f.

<sup>59</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.10.

<sup>60</sup> Vgl. DLR, Hydrosol-plant, o.J., o.S.

sind die zwei anderen Ausprägungen mit Dominanztendenzen in Richtung blauem und türkisen Wasserstoff geprägt. Blauer und türkiser Wasserstoff sollen dabei insbesondere den Markthochlauf für Wasserstofftechnologien unterstützen.<sup>61</sup> Weiterhin hat türkiser Wasserstoff den Vorteil, dass der entstandene feste Kohlenstoff weiter genutzt werden kann, z.B. als Graphit für Batterien oder in der Stahl- oder Bauindustrie.<sup>62</sup>

Zusätzlich werden in diesem Markthochlauf auch europaweit blauer und türkiser Wasserstoff gehandelt und somit wird auch eine Nutzung in Deutschland wahrscheinlich. Um eine klare Ausrichtung zu einem Herstellungsverfahren zu bilden, wird in diesem Faktor eine mehrheitliche Nutzung vorausgesetzt. Mehrheitlich steht dabei für einen prozentualen Anteil >50%. Die anderen Wasserstofffarben können demnach auch anteilig genutzt werden und unterstützend auf die Erreichung der Klimaneutralität wirken. Die Ausprägungen des Faktors sind somit:

1. Grün dominant
2. Blau dominant
3. Türkis dominant

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird pinker Wasserstoff nicht weiter als dominante Variante betrachtet. Dies basiert auf dem geplanten Ausstieg der Bundesregierung aus der Atomkraft 2022.<sup>63</sup> Pinker Wasserstoff könnte demnach nur als Import in das deutsche Netz fließen oder mit Import-Strom hergestellt werden. Für eine dominante Ausrichtung ist dies zu umfangreich.

Da die Quellenlage keine direkt vergleichbaren Ergebnisse aufzeigt, werden im weiteren Verlauf der Arbeit und insbesondere in der Nutzung der Wechselwirkungen folgende Annahmen getroffen:

---

<sup>61</sup> Vgl. DLR, Hydrosol-plant, o.J., o.S.

<sup>62</sup> Vgl. BASF, Stimmen aus der Forschung, o.J., o.S.

<sup>63</sup> Vgl. Bundesregierung, Ausstieg aus der Kernkraft, o.J., o.S.

**Tabelle 2: Vergleich der Wasserstofffarben Grün, Türkis und Blau**

	<b>Grün</b>	<b>Türkis</b>	<b>Blau</b>
<b>Erzeugungskosten</b>	Aktuell hoch, zukünftig sinkend	Hoch	Mittel
<b>Emissionen</b>	Gering	Gering	Hoch
<b>Technologiereifegrad</b>	Abhängig vom Verfahren (TRL 4-9)	TRL 4-5	TRL 9
<b>Energieverbrauch</b>	Hoch	Mittel	Mittel
<b>Resultat energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung</b>	Hoch	Mittel	Gering

Quellen: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.5; Bukold, Dr. S., Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020, S. 21f.; Ebd. S.27f.; Fraunhofer IEE, Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem, 2020, S.17ff.; Greenpeace Energy EG, Blauer Wasserstoff, 2020, S.9; IKEM, Wasserstoff - Farbenlehre, 2020, S.5ff.; IEA, The Future of hydrogen, 2019, S.41; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15ff.; Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020, S.5-7.

### **3.3.2 Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor**

Die Grundlage von nachhaltigem Wasserstoff sind erneuerbare Energien. Demnach ist der Ausbau der erneuerbaren Energien ein essenzieller Faktor bzw. eine mögliche Limitierung für eine grüne Wasserstoffwirtschaft. Die Bundesregierung plant mit einem Gesetzesentwurf sogar die Klimaneutralität auf das Jahr 2045 zu verfrühen.<sup>64</sup> Der Fokus im zukünftigen Energiesystem liegt dabei insbesondere auf Wind- und Solarstrom.<sup>65</sup> Die zwei relevantesten Dimensionen des Ausbaus sind dabei die installierte Leistung und die erwirtschafteten Terawattstunden unter Volllast. Es ist dabei ebenfalls erkennbar, dass in einem dekarbonisierten Energiesystem erneuerbare Energien die tragende Rolle spielen müssen, um Emissionen dauerhaft zu vermeiden.<sup>66</sup> Ebenfalls wird der weltweite Ausbau, ungleich dem Deutschen, eher aus fossilen Energieträgern bestehen.<sup>67</sup> Deutschland

<sup>64</sup> Vgl. Bundesregierung, Ein neues Zeitalter hat begonnen, o.J., o.S.

<sup>65</sup> Vgl. DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2, 2020, S.21.

<sup>66</sup> Vgl. UBA, Strommarkt und Klimaschutz, 2021, S.69.

<sup>67</sup> Vgl. Statista, Prognose zur Verteilung des weltweiten Energiebedarfs nach Energieträger bis 2040, 2019, o.S.

nimmt somit eine Pionier-Rolle im weltweiten Ausbau hin zur Einbindung von erneuerbaren Energieträgern in einem treibhausgasneutralen Energiesystem ein. Laut der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) GmbH werden erneuerbare Energie das gesamte Energiesystem elektrifizieren, wobei zukünftig insbesondere auch flexible, gasgefeuerte Kraftwerke mit Wasserstoff oder Methan relevanter werden.<sup>68</sup> Die NOW GmbH ist eine Programmgesellschaft, welche Förderprogramme für Wasserstofftechnologien, wie z.B. das ressortübergreifende Programm zur Innovation von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, vergibt.<sup>69</sup> Dabei identifiziert die NOW GmbH eine Zunahme der erneuerbaren Energien um den Faktor sechs bis zum Jahr 2050 und geht von einer installierten Leistung von 600 MW aus. Das Verhältnis von Photovoltaik zu Onshore-Windenergie zu Offshore-Windenergie liegt dabei bei neun zu fünf zu eins.<sup>70</sup> Siemens Energy erklärt sich klar gegen einen perfekt funktionierenden grünen Hochlauf aus. Zu Beginn der Hochlaufphase werden nicht alle Kapazitäten im Energiesystem vorhanden sein. Engpässe müssen durch andere Wasserstoffarten ausgeglichen werden und sukzessive ersetzt werden.<sup>71</sup> Somit sind erneuerbare Energien die Grundlage für ein treibhausgasneutrales und zukunftsfähiges Energiesystem mit Wasserstoff. Sie müssen aber erst schrittweise aufgebaut werden. Ohne einen adäquaten Ausbau und eine entsprechende Versorgungssicherheit, auch in Engpässen, ist ein Wachstum schwierig. Die Funktionen und der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft bilden demnach eine Übereinstimmung mit dem Wachstum der erneuerbaren Energien in Deutschland.

Diese Arbeit orientiert sich dabei an der Berechnung der NOW GmbH. In der Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland geht die NOW GmbH von einer Entwicklung der Leistung von erneuerbaren Energien von ca. 440 GW im Jahr 2040 aus.<sup>72</sup> Diese 440 GW installierte Leistung stellen dabei den Ausbau nach Plan dar. Die Variante überdurchschnittliches Wachstum versinnbildlicht den Ausbau nach Plan plus einen zusätzlichen Ausbau von 25%. Hierbei entstehen ca. 550 GW installierte Leistung im Jahr 2040. Eine Stagnation des Ausbaus basiert auf dem aktuellen Stand von Ende 2020 mit 132,1 GW.<sup>73</sup> Dabei wird angenommen, dass der aktuelle Stand von 2020 noch max. 50%

---

<sup>68</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEde, 2018, S.67ff.

<sup>69</sup> Vgl. NOW GmbH, Wasserstoff und Brennstoffzelle, o.J., o.S.

<sup>70</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEde, 2018, S.67f.

<sup>71</sup> Vgl. Adam, P. et al, Wasserstoffinfrastruktur, 2020, S.25.

<sup>72</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEde, 2018, S.68.

<sup>73</sup> Vgl. UBA, Erneuerbare Energien in Deutschland, 2021, S.10.

bis 2040 erweitert wird. Dies bedeutet eine installierte Leistung von 198,15 GW im Jahr 2040. Die Ausprägungen sind somit:

1. Überdurchschnittliches Wachstum
2. Wachstum nach Plan
3. Stagnation des Ausbaus

### 3.3.3 Verfügbarkeit von Rohstoffen

In der Wasserstoffwirtschaft werden insbesondere für den Elektrolyseprozess kritische Rohstoffe benötigt. Die NOW GmbH hat dabei die vier Metalle Scandium, Platin, Iridium und Titan gesondert in der Kritikalität betrachtet, wobei für Scandium und Titan keine direkten Risiken vorhanden sind.<sup>74</sup> Eine entsprechende Kritikalitätsanalyse ist dabei nicht direkt durchführbar. Dies hat den Hintergrund, dass bei der Förderung von Iridium und Scandium keine klare Datenlage besteht. Erkennbar ist, dass bei den vier Rohstoffen von 2006 bis 2016 die Rohstoffpreise starken Schwankungen unterworfen waren. Der einzige Rohstoff, der dabei im Preis dauerhaft und nachhaltig gesunken ist, ist Titan.

Iridium wird in der PEM-Elektrolyse für die Beschichtung der Anoden benötigt.<sup>75</sup> Dabei ist die Menge des benötigten Iridiums nicht gesetzt und kann anhand der Studie von 0,667g/kW auf 0,05g/kW in 2035 gesenkt werden. Es gibt dabei keine direkten Substitute für Iridium. Ein Mindestmaß muss vorhanden sein. Iridium ist eines der seltensten Metalle der Erde. Es ist auf Platz 82 der weltweit am wenigsten vorkommenden Metalle. Daher können nur geringe Mengen gefördert werden. Das Metall wird von der NOW GmbH als kritisch eingestuft. Die Aussagen über die Entwicklung in konservativen und innovativen Szenarien unterscheiden sich stark. Für das Jahr 2040 bestehen hierbei Unterschiede im Iridium Bedarf in Deutschland von 200 kg pro Jahr zu 2100 kg pro Jahr. Weiterhin bestehen hierbei aufgrund der Seltenheit und Verfügbarkeit starke Monopole. Ca. 85% der weltweiten Förderung kommen aus Südafrika.<sup>76</sup>

Platin wird ebenfalls zur Beschichtung der Elektroden innerhalb der PEM-Elektrolyse verwendet. Die konservative Bedarfsrechnung gibt dabei 0,333 g/kW an und die innovative 0,0375 g/kW. Wie bei Iridium wird zukünftig wahrscheinlich die Bedarfsmenge

<sup>74</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S. 126ff.

<sup>75</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S. 126ff.

<sup>76</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S. 126ff.

zurückgehen. Ab dem Jahr 2046 wird der deutsche Bedarf für die Elektrolyse auf 1,3 t angesetzt. Pro Jahr werden ca. 190 t Platin gefördert. Es entsteht daher eine enorme Diskrepanz, allerdings überschreitet heutzutage schon die Nachfrage das Angebot. In der Studie wird der Bedarf an Brennstoffzellen nicht einberechnet. Platin wird dabei in diversen Branchen eingesetzt, aber insbesondere in: Autoabgaskatalysatoren (36%), Schmuck (35%), Rohstoffinvestments (10%), Chemische Katalysatoren (6%) und Sonstigen Branchen (13%), wie z.B. Elektronikindustrie, Medizintechnik, Petrochemie, etc.<sup>77</sup>

Ähnlich wie beim Iridium unterscheiden sich die Bedarfe in den Szenarien immens. Im Jahr 2040 liegt der Bedarf im innovativen Szenario bei ca. 100 kg pro Jahr und im konservativen bei 1050 kg. Weitere Ähnlichkeiten bestehen bei der Allokation und in der Kritikalität. Sie ist bei Platin zwar leicht geringer als bei Iridium, aber dennoch vorhanden. Wie bei Iridium wird größtenteils in Südafrika gefördert. Es wird von der Studie der NOW GmbH als kritisch eingestuft.<sup>78</sup> Vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt werden andere Materialien als kritisch eingestuft.<sup>79</sup> Diese Materialien werden insbesondere für die Elektrolyse-Technologien verwendet. Kritisch zu betrachten sind dabei Nickel, Kalium, Platin, Iridium, Lithium, Kobalt, Dysprosium und Neodym. Nickel und Kalium sind relevant für die alkalische Elektrolyse. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat Rohstoffe für die HTEL nicht betrachtet, da sie noch nicht in der großskaligen Anwendung betrieben wird.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieser Schlüsselfaktor verworfen, da eine Rohstoffknappheit aktuell je nach Rohstoff bis min. 2038<sup>80</sup> nicht vorhanden sein wird. Des Weiteren werden bis dahin Fortschritte in der Metallurgie, die Wiederverwendung von Materialien und die Verbesserung in der Langlebigkeit und Nutzung von Produkten die Nutzung effizienter gestalten.<sup>81</sup> Zusätzlich kann eine Optimierung der Förderung und Fördermenge einen entscheidenden Einfluss auf die jährliche Produktion und demnach auf die aktuellen Prognosen haben.

---

<sup>77</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S. 126ff.

<sup>78</sup> Vgl. NOW GmbH, Studie IndWEDe, 2018, S. 126ff.

<sup>79</sup> Vgl. DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2, 2020, S.32ff.

<sup>80</sup> Vgl. DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2, 2020, S.33f.

<sup>81</sup> Vgl. DLR, Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2, 2020, S.33f.

### 3.3.4 Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie

Damit Wasserstoff sich langfristig in der deutschen Wirtschaft etablieren kann, muss er sich branchenübergreifend verbreiten. Die Kernbranchen sind dabei Stahl (Direktreduktion), Energiewirtschaft (Speichermedium besonders für Überschussstrom und Wärme), Chemie (Ammoniak, Methanol, Raffination), Zementindustrie (Vermeidung von CO<sub>2</sub> in der Herstellung) und Transport (PKW, LKW, Züge, Flugzeuge).<sup>82</sup> Der Schlüsselfaktor bestimmt dabei, wie stark die Branchendurchdringung von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie ist. Hierbei wird Wasserstoff in Prozessen angewendet, die vorher durch andere Materialien und Energieträger besetzt wurden oder in verstärktem Maß in Prozessen, in denen vorher schon Wasserstoff genutzt wurde. Ziel ist es, dass Wasserstoff und insbesondere nachhaltiger Wasserstoff über die gesamte Wertschöpfungskette und verschiedene Sektoren übergreifend genutzt werden. Eine derartige Branchendurchdringung kann bisher unbekannte Synergieeffekte, Lernkurven und Fixkostendegressionen erzeugen. Unterschiede in den Ansichten der Literatur bestehen dabei in der Stärke der Branchendurchdringung. Das Handelsblatt warnt davor, das gesamte System auf Wasserstoff umzustellen und rät eher in Einzelprozesse und Anwendungsgebiete mit großem Potenzial zu investieren. Dies gilt insbesondere für nachhaltig erzeugten Wasserstoff. Fokusgebiete sind dabei, Industrieanwendungen, Treibstoff für Flugzeuge und Schiffe und allgemeiner Schwerlastverkehr.<sup>83</sup> Die Fragestellung, die dabei entsteht, ist, ob Wasserstoff in den einzelnen Anwendungsgebieten generell genutzt werden kann oder ob ein wirklich effektiver, nachhaltiger Vorteil im Prozess entsteht. Wasserstoff sollte nach Meinung des Handelsblatts nicht als Universallösung gesehen werden, sondern erst nach sorgfältiger Analyse angewendet werden. Wärmeerzeugung sei beispielsweise deutlich effizienter über eine Wärmepumpe. Diese verbraucht nur ein Sechstel des Stroms für die gleiche Wärmeleistung wie Power-to-gas. In der Industrie hingegen sei Wasserstoff fast ohne reale Alternativen.<sup>84</sup> Das BMWi sieht ebenfalls den Erfolg von Wasserstoff insbesondere in der Industrie. Es klassifiziert gasförmige Energieträger in Industrieanwendungen, insbesondere stofflich, als unverzichtbar. Chancen bilden sich dabei in stofflichen Anwendungen

---

<sup>82</sup> Siehe Anhang 3: Mögliche Einsatzbereiche von Wasserstoff.

<sup>83</sup> Vgl. Handelsblatt, Hoffnung Wasserstoff, 2019, S.4.

<sup>84</sup> Vgl. Handelsblatt, Hoffnung Wasserstoff, 2019, S.4.

vor allem für grünen und blauen Wasserstoff.<sup>85</sup> Die Chemie- und Petrochemie-Branche, sowie Industrieanwendungen sind unter den Top drei der größten Abnehmer von Erdgas in Deutschland. Hier bietet sich klares Potenzial für die Emissionsminderung durch Wasserstoff, insbesondere aus grüner Erzeugung.<sup>86</sup> In Branchen in denen bisher Wasserstoff aus grauer Erzeugung genutzt wird, kann grüner und blauer Wasserstoff ebenfalls einen klaren Emissionsvorteil bieten und zur CO<sub>2</sub>-Neutralität beitragen. CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich dabei nicht ganz vermeiden, aber können deutlich verringert werden.<sup>87</sup> So sind 50% der Emissionen in der Zementindustrie, aufgrund der Herstellungsprozesse, vorhanden. Regulatorien, die eine Standardisierung erstellen, müssen dabei übergreifend getroffen werden, um Wasserstoff langfristig zu etablieren. Hintergrund ist, dass, um Synergieeffekte zu erzeugen, ein klarer Standard herrschen muss, an dem sich die Akteure der Branchen orientieren können.<sup>88</sup> Dies gilt ebenfalls nicht nur für die heimische Erzeugung, sondern auch für Importe. Das Ziel ist es, Erdgas in den substituierbaren Prozessen nach und nach zu ersetzen.<sup>89</sup> Die EU-Kommission hat Wasserstoff langfristig als tragende Säule für den Green Deal identifiziert. Er soll als Schnittstelle zwischen elektrischen und stofflichen Prozessen fungieren und Anwendungsgebiete übergreifend verbinden. Vorteilhaft sind dabei die Speichermöglichkeiten, die bei der Nutzung von erneuerbaren Energien oftmals nachteilig sind. Die vielfältige Nutzung wird dabei von der seit 1975 steigenden Nachfrage unterstrichen. Diese hat sich bis heute verdreifacht.<sup>90</sup> Demnach ist eine branchenübergreifende Nutzung von Wasserstoff ein anzustrebendes Ziel und ein wichtiger Schlüsselfaktor hin zur CO<sub>2</sub>-Neutralität. Hürden und Argumentationsnotwendigkeit bestehen nach wie vor. Dennoch bietet eine branchenweite Nutzung klare Vorteile für das gesamte deutsche System, sowohl energetisch als auch stofflich.

Die Ausprägungen sind:

1. Starke Branchendurchdringung
2. Moderate Branchendurchdringung

---

<sup>85</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.15ff.

<sup>86</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.15ff.

<sup>87</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.17.

<sup>88</sup> Vgl. BDEW, Roadmap Gas, 2020, S. 9.

<sup>89</sup> Vgl. BDEW, EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, 2020, S.10; Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.21.

<sup>90</sup> Vgl. Kruse, M., Wedemeier, J., Potenzial grüner Wasserstoff, 2021, S.26ff. in Wirtschaftsdienst.

### 3. Schwache Branchendurchdringung

Eine starke Branchendurchdringung versinnbildlicht einen Einsatz in allen Branchen mit starker und nachhaltiger Durchdringung. Wasserstoff gilt dabei als klares Substitut für bisher genutzte Produkte, wie Erdgas. Eine moderate Branchendurchdringung bedeutet, dass Wasserstoff ebenfalls als Substitut gilt, aber dass sich in den Branchen Wasserstoff und fossile Brennstoffe in gleichen Anteilen entwickeln. Eine schwache Durchdringung erfolgt, wenn Wasserstoff sich nicht durchdringend gegen fossile Brennstoffe behaupten kann. Hierbei wird zwar auch in größeren Anwendungen genutzt, aber fossile Brennstoffe bleiben vorherrschend.

#### 3.3.5 Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten

Innerhalb des Aufbaus einer deutschen Wasserstoffwirtschaft muss die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden. Dazu zählt neben der Technologieentwicklung auch die -fertigung. Es ist abzusehen, dass sich mittel- bis langfristig signifikante Bedarfe für Wasserstoff ergeben.<sup>91</sup> Eine Produktion von Wasserstofftechnologien kann dabei in verschiedene Sektoren aufgeteilt werden. Es werden direkte und indirekte Produktionen entstehen. Direkte Produktionen sind dabei diejenigen, welche sich rein mit Wasserstoff beschäftigen und sich auf diese Branche konzentrieren. Indirekte Produktionen verweilen in verschiedenen Branchen. Beispielhaft könnte hierbei der Maschinenbau<sup>92</sup> stehen, der auch branchenübergreifend Komponenten produzieren kann. Ein langfristig zu verfolgendes Ziel sollte dabei sein, durch den Wechsel auf Wasserstoff keine Wirtschaftszweige zu schwächen oder einen dauerhaften Schaden an der deutschen Wirtschaft zu verursachen. Es sollte eher eine Stärkung der Branchen und Zulieferer in den Fokus gesetzt werden, sodass Deutschland gestärkt aus dem systemübergreifenden Wandel hervorgeht. Hierfür sind in Deutschland umfassende Potenziale bereits vorhanden.<sup>93</sup> Die Ausprägungen sind:

1. Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
2. Teiltechnologien

---

<sup>91</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

<sup>92</sup> Vgl. Kruse, M., Wedemeier, J., Potenzial grüner Wasserstoff, 2021, S.31 Wirtschaftsdienst.

<sup>93</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.94; Ebd. S.98.

### 3. Nischenanteile

Eine Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette platziert Deutschland als eines der fortschrittlichsten Länder in der Entwicklung von Wasserstofftechnologien. Innerhalb Deutschlands werden hierbei Technologien entwickelt und produziert, die Wasserstoff herstellen, distribuieren und weiterverarbeiten. Die Weiterverarbeitung kann dabei in verschiedenen Branchen und Gebieten erfolgen. Deutschland ist somit einer der Hauptakteure in Bezug auf Wasserstofftechnologien in der Zukunft. Hierbei werden im Idealfall viele Arbeitsplätze geschaffen und es erfolgt ein klares Umsatzwachstum. Teiltechnologien bedeutet, dass Deutschland zwar eines der Produktionsländer für Wasserstoff wird, aber nur in Bezug auf spezifische Teilgebiete. Hierbei erfolgt eine Konzentration auf Teiltechnologien und nicht über die gesamte Wertschöpfungskette. Nischenanteile platziert Deutschland hinter anderen Ländern. Hierbei werden in Deutschland nur wenige Teilprodukte in Bezug auf Wasserstofftechnologien produziert. Demnach muss der Großteil der Technologien importiert werden.

#### 3.3.6 Technologischer Fortschritt

Der technologische Fortschritt innerhalb der Einzeltechnologien, die in einer Wasserstoffwirtschaft benötigt werden, ist ein entscheidender Indikator für die Entwicklung der Gesamtbranche. Die Ausprägungen sind:

1. Disruptiver, erfolgreicher Durchbruch
2. Stetige Steigerung
3. Stagnation

Dabei können neue Entwicklungen verschiedenen Teilgebiete beeinflussen. Beispielhaft kann Wasserstoff nicht nur durch Elektrolyse grün erzeugt werden. Selbst innerhalb der bereits bestehenden Elektrolyse-Verfahren gibt es noch Unterschiede in z.B. Wirkungsgrad, Kosten und dem allgemeinen Entwicklungsgrad der Technologie.<sup>94</sup> Demnach hat der technologische Fortschritt hierbei einen direkten Einfluss auf die Entwicklung einer Teiltechnologie und somit auf die Entwicklung und Förderung von Wasserstoff im

---

<sup>94</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.26f.; Ebd. S.32.

Allgemeinen. Langfristig werden sich ebenfalls durch die verstärkte Nutzung Skaleneffekte bilden, die die Technologien günstiger und eine einfachere Beschaffung ermöglichen.

Klare Unterschiede bilden sich hierbei auch in der bereits bestehenden Herstellung von Wasserstoff per Dampfreformierung und der Elektrolyse auf Industrieniveau im Allgemeinen. Die Dampfreformierung wird bereits industriell genutzt und bildet einen Großteil des Marktes ab, auch wenn sich die Abscheidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen noch auf kleinerem Niveau und zumeist in Demonstrationsvorhaben stattfindet.<sup>95</sup> Auf dieser Basis wird angenommen, dass ein disruptiver technologischer Fortschritt insbesondere grünen und türkisen Wasserstoff fördert, da beide Verfahren industriell noch nicht erprobt sind. Blauer Wasserstoff wird hierbei leicht gehemmt. Bereits bestehende Verfahren wie die Dampfreformierung werden im weiteren Verlauf aufgrund der Emissionsentwicklung nicht weitergeführt. Eine stetige Steigerung fördert ebenfalls grünen und türkisen Wasserstoff aber in schwächerem Ausmaß. Eine technologische Stagnation hingegen fördert blauen Wasserstoff und hat einen hemmenden Einfluss gegenüber grünen und türkisen Wasserstoff. Innerhalb des technologischen Fortschritts wird die wirtschaftliche Skalierbarkeit und deren Einfluss auf die deutsche Wirtschaft miteinberechnet.

### **3.3.7 Preisstabilität für den Endverbraucher**

Laut dem BMWi ist grüner Wasserstoff noch nicht wirtschaftlich. Die gilt sowohl für Erzeugung und Weiterverarbeitung.<sup>96</sup> Wirtschaftlich kann nachhaltiger Wasserstoff erst bei Nutzung im großen Maßstab, also auf industrieller Basis, werden. Zur Zielerreichung sind Kostendegressionen, Anlagen in entsprechender Größenordnung und eine breite Marktakzeptanz notwendig. Eine direkte Substitution ist nach aktuellem Stand ebenfalls nicht wirtschaftlich. Grundlage dafür sind insbesondere die hohen Investitionskosten und Abgaben bzw. Umlagen.<sup>97</sup> Weiterhin sind Energiepreise volatil.<sup>98</sup> Es sollte innerhalb der Zielerreichung vermieden werden, Wasserstoff als reinen Kostentreiber anzusehen, sondern als Notwendigkeit auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>-Neutralität. Wasserstoff ist daher als

---

<sup>95</sup> Vgl. DVGW, Wasserstoff, 2019, S.4ff.

<sup>96</sup> Vgl. Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020, S.6ff.

<sup>97</sup> Vgl. Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020, S.6ff.

<sup>98</sup> Vgl. BMWi, Die Energie der Zukunft, 2021, S.156ff.

meritorisches Gut zu klassifizieren, welches einem höheren Nutzen, also der Minderung von Emissionen zu Gunsten der Umwelt, dient. Im Allgemeinen werden die Güter aufgrund der positiven Effekte politisch beeinflusst. Dennoch ist eine Erhöhung der Preise nur bis zu einem gewissen Punkt nachvollziehbar. Wobei dieser Punkt nicht klar definiert werden kann. Problematisch wird eine Erhöhung der Preise insbesondere für Bürger und Industrie. Ein negativer Einfluss bewirkt dabei beim Bürger, dass der gesellschaftliche Konsens hin zur Technologie argumentativ schwerer nachvollziehbar ist. Hierbei können Kosten gegen einen ökologischen Vorteil aufgewogen werden. Im Nachgang kann diese Wirkung einen Einfluss auf eine mögliche Wahlentscheidung der Regierungsbildung durch die Gesellschaft haben. Die notwendigen Kosten der Substitution von fossilen Energieträgern sind daher eine komplexe Problematik, die nicht klar definiert werden kann.

Anlagen-Fixkosten und Volllaststunden sind Stand 2021 immer noch ein entscheidender Kostentreiber.<sup>99</sup> Je nach Anlagentyp, z.B. bei Elektrolyse-Anlagen, unterscheiden sich die Nutzungsparameter, wie Wirkungsgrad, Anlaufzeit, Lebensdauer, Verbrauchskosten und Erstinvestitionskosten.<sup>100</sup> Eine mögliche Kostenentwicklung bietet viele Potenziale. Optimierungen in der Kostenstruktur können dabei durch verschiedene Faktoren erreicht werden:<sup>101</sup> Erhöhung der technischen Lebensdauer, Verringerung der Betriebs- und Wartungskosten, Steigerung des Wirkungsgrades oder der allgemeinen Weiterentwicklungen zur Nutzung im industriellen Maßstab.

Nach Annahme von Energy Brainpool werden sich die jährlichen Fixkosten für Annahmen in Richtung 2040 deutlich verringern. Im zweiten Schritt sind ebenfalls die variablen Kosten zu betrachten. Diese sind pro Herstellungsmethodik der Technologie unterschiedlich und weisen verschiedene Kostenstrukturen und -treiber auf. Weiterhin werden sich für fossile Energieträger, insbesondere fossiles Erdgas, stark steigende Kosten entwickeln. Dies gilt besonders vor dem Hintergrund von möglicher Erdgas- und CO<sub>2</sub>-Bepreisung durch die Politik. Von 2030 bis 2040 erfährt Elektrolysegas einen Kostenvorteil

---

<sup>99</sup> Vgl. Energy Brainpool, Wettbewerbsfähigkeit, 2018, S.1ff.

<sup>100</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.26ff.

<sup>101</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.26ff.

gegenüber fossilem Erdgas. Relevant hierfür sind Kostendegressionen durch kontinuierliche Investitionen, günstiger Strombezug und die Fokussierung der Klimaziele.<sup>102</sup>

Vom Hydrogen Council geht die Erwartung aus, dass Wasserstoff von 2020 bis 2050 zunächst relevant für den Verkehr wird und dann Einzug in die anderen Anwendungsgebiete findet. Ab 2030 wird die Wasserstoffproduktion und -verteilung somit nach und nach günstiger. Es werden mehr Anwendungen wettbewerbsfähiger und der Preis von Wasserstoff sinkt sukzessive. Bis 2050 können die meisten der möglichen Anwendungen mit Wasserstoff funktionieren.<sup>103</sup> Lernraten unterstützen diesen Prozess nachhaltig.

Ebenso wie Erdgaspreise<sup>104</sup> schwanken werden, werden Wasserstoffpreise schwanken. Da die Endverbraucher, je nach Prozess und Anwendung, alternativlos sind, werden Energiepreisschwankungen, unabhängig vom Energieträger, notwendigerweise akzeptiert. Strompreise privater Haushalte sind bereits in Deutschland weltweit am höchsten.<sup>105</sup> Die Energiepreise sind von 1996 bis 2019 langfristig gestiegen.<sup>106</sup> Die Erhöhung liegt bei ca. 66% zwischen 1996 und 2019. Die Kraftstoffpreise haben sich ebenfalls dauerhaft gesteigert und befinden sich seit 1972, mit Ausnahme der Finanzkrise, auf einem kontinuierlichen Aufstieg.<sup>107</sup> Dasselbe gilt für die durchschnittliche Stromrechnung eines beispielhaften drei-Personen-Haushalts in Deutschland und des Industriestrompreises.<sup>108</sup> Preiserhöhungen finden demnach bereits in den letzten 20 Jahren kontinuierlich statt und dennoch ist der Endenergieverbrauch relativ gleichgeblieben.<sup>109</sup> Aus diesen Gründen wird der Schlüsselfaktor verworfen und im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

### 3.3.8 Politisch strategische Ausrichtung

Ein politischer Rahmen ist zwangsläufig notwendig, um einen Markt für nachhaltige Gase zu schaffen. Den Hintergrund bildet dabei die Zielsetzung der Bundesregierung und der europäischen Union bis 2050 klimaneutral zu werden. Die Prämissen liegen in

<sup>102</sup> Vgl. Vgl. Energy Brainpool, Wettbewerbsfähigkeit, 2018, S.4ff.

<sup>103</sup> Vgl. Hydrogen Council, Path to competitiveness, 2020, S.10ff.

<sup>104</sup> Vgl. Prognos, Kosten und Transformationspfade, 2020, Seite 41.

<sup>105</sup> Vgl. Statista, Dossier Strom- und Energiepreise, 2021, S.2.

<sup>106</sup> Vgl. Statista, Dossier Strom- und Energiepreise, 2021, S.8.

<sup>107</sup> Vgl. Statista, Dossier Strom- und Energiepreise, 2021, S. 10f.

<sup>108</sup> Vgl. Statista, Dossier Strom- und Energiepreise, 2021, S.17; Ebd. S.27ff.

<sup>109</sup> Vgl. UBA, Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, 2021, o.S.

Quellenoffenheit, Technologieoffenheit und Anwendungsoffenheit. Klare Anreize für die Nutzung von Wasserstoff bilden die Grundlage für die politische Rahmenbildung.<sup>110</sup> Weiterhin muss Konsens in der Benennung und Definition der Wasserstoffarten und deren Standardisierung herrschen. Die Nationale Wasserstoffstrategie bildet dabei den ersten Schritt in der politischen Laufbahn hin zur Wasserstoffwirtschaft. Weiterhin muss eine zentrale Kommunikation aller notwendigen Akteure und Sektoren durch die Bundesregierung erfolgen. Im weiteren Verlauf müssen in Zusammenhang mit dem Ausbau von Wasserstoff auch die notwendigen Kapazitäten der erneuerbaren Energien ausgebaut werden. Im Allgemeinen müssen auch die negativen Anreize, die gegen eine Nutzung von Wasserstoff sprechen, schrittweise abgebaut oder minimiert werden. Bei der Distribution im System werden auch Herkunftsnachweise für Wasserstoffarten und -farben immer relevanter, um den Wasserstoff europaweit zu handeln. Wasserstoff muss dabei konsequent politisch durch Gesetze und strategisch, z.B. durch die Bundesnetzagentur im Ausbau von Gas-Anlagen, miteinbezogen werden. Die Genehmigung und der dadurch entstehende bürokratische Aufwand sollten möglichst minimiert werden.<sup>111</sup> Wasserstoff bietet somit in der politisch strategischen Dimension diverse Anknüpfungspunkte. Die Maßnahmen aus der Nationalen Wasserstoffstrategie teilen sich in die folgenden übergeordneten Bereiche auf:<sup>112</sup>

- Erzeugung von Wasserstoff
- Verkehr
- Industrie
- Wärme
- Infrastruktur/Versorgung
- Forschung, Bildung und Innovation
- Europäischer Handlungsbedarf
- Internationaler Wasserstoffmarkt und außenwirtschaftliche Partnerschaften

---

<sup>110</sup> Vgl. BDEW, Roadmap Gas, 2020, S.9.

<sup>111</sup> Vgl. IN4CLIMATE.NRW, Schlüssel Wasserstoff, 2019, S.11ff.

<sup>112</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, S.17ff.; Ebd. S.19ff.; Ebd. S.21ff.; Ebd. S.23ff.; Ebd. S.26ff.

Wasserstoffstrategien bilden den Start der Implementierung.<sup>113</sup> Anreize können im System dabei z.B. durch Steuererleichterungen, die Nutzung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten, Einspeisungsquoten oder -richtlinien oder Normung gegeben werden. Mittel- bis langfristig muss Wasserstoff in das System klar eingegliedert werden, um eine möglichst einfache und unkomplizierte Nutzung auf verschiedenen Ebenen in den einzelnen Sektoren zu ermöglichen. Anhand der europäischen Wasserstoffstrategie lässt sich ableiten, dass im Markt bis 2030 europaweit bereits 40 GW Elektrolysekapazität bereitgestellt werden soll.<sup>114</sup> Demnach muss ein Großteil der politischen Technologieentwicklung und strategischen Positionierung kurzfristig eingeleitet werden, um rechtzeitig ein entsprechendes Anreizsystem hervorzurufen. Neutrale oder negativ konnotierte Maßnahmen und Anreize bilden dabei den gegenteiligen Entwurf zur Klimaneutralität ab und hemmen dementsprechend die wirtschaftliche Entwicklung. Die Ausprägungen sind:

1. Pro
2. Neutral
3. Kontra

Die Ausrichtungen zeigen dabei einen Unterschied in den Maßnahmen und Anreizen der Bundesregierung. Eine Ausrichtung pro Wasserstoff beinhaltet eine Nutzung des gesamten Maßnahmenkatalogs in starkem Ausmaß. Eine neutrale Ausrichtung fokussiert sich nur auf Teilgebiete, die moderat aber nicht konzentriert genutzt werden. Eine konträre Ausrichtung erzeugt bürokratische Hürden in Bezug auf Wasserstoff und fokussiert keine Erleichterungen auf die Nutzung und Verbreitung der Technologien.

### **3.3.9 Arbeitsplatzentwicklung**

Arbeitsplätze sind ein übergreifender Faktor für die Funktion und den Gesundheitszustand einer Wirtschaft. Innerhalb der Wasserstoffwirtschaft werden nicht nur direkte Arbeitsplätze beeinflusst, sondern auch indirekte, die der Branche zuliefern. Diese Teilbranchen müssen nicht zwangsläufig in der Energie- oder verarbeitenden Branche entstehen. Beispielhaft könnte eine Teilentwicklung von Maschinen oder Einzelprodukten sein, die

---

<sup>113</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.19.

<sup>114</sup> Vgl. Kruse, M., Wedemeier, J, Potenzial grüner Wasserstoff, 2021, S.27 in Wirtschaftsdienst.

für Brennstoffzellen oder den allgemeinen Maschinenbau für Wasserstoff in Deutschland bereits vorhanden sind oder gegründet werden.

Die Energiewirtschaft kann in klare Sektoren gegliedert werden:<sup>115</sup>

- 217.000 Personen in
  - Elektrizitätserzeugung, -übertragung, -handel und -verteilung
  - Gas- und Fernwärmeversorgung
  - Kohlenbergbau und -veredelung
  - Gewinnung von Erdöl und Erdgas
  - Mineralölverarbeitung
- 150.000 Personen in
  - Betrieb und Wartung von erneuerbaren Energien
  - Bereitstellung von energetisch genutzter Biomasse und Biokraftstoffen

Weiterhin ist ein Arbeitsplatzzuwachs davon abhängig, wo die Wertschöpfung entsteht. Es besteht die Möglichkeit, dass bis 2030 bis zu 11.000 Arbeitsplätze direkt und indirekt in der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse entstehen.<sup>116</sup> Bei einer entsprechenden Nutzung von Importen kann allerdings eine signifikante Verschlechterung von Arbeitsplätzen entstehen.<sup>117</sup> Nach dem Wuppertal Institut hat der Grad der inländischen Wasserstoffversorgung den höchsten Einfluss auf die Entwicklung von Wasserstoffarbeitsplätzen. Branchen, die dabei direkt vertreten sind, sind z.B. Elektrolyse, Wind- und Solarenergie und die Stromerzeugung insbesondere für Wasserstoff. Der notwendige Strom schafft dabei zusätzlich Arbeitsplätze. Bis 2050 ergibt sich eine Steigerung um weitere 2.000 Arbeitsplätze in der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse. Der geringe Zuwachs basiert auf Skaleneffekten und sinkenden Investitionskosten und demnach Auswirkungen auf die Beschäftigtenanzahl pro GW Leistungszubau. Innerhalb der Betrachtungen des Wuppertal Instituts entstehen Unterschiede in den Szenarien. Insbesondere in Szenarien mit sehr hohem Dekarbonisierungsanteil entstehen viele Arbeitsplätze. Diese Auswirkungen basieren direkt auf erhöhter Nachfrage nach Wasserstoff. Die Arbeitsplätze verteilen sich über verschiedene Sektoren. Die Höhe liegt bei bis zu 822.000 bis 2050. Relevant sind dabei besonders Wasserstoffspeicherung und Ausbau von

---

<sup>115</sup> Vgl. BMWi, Die Energie der Zukunft, 2021, S. 233.

<sup>116</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.109ff.

<sup>117</sup> Vgl. Ifeu et al., Effizienz im Gebäudesektor, 2018, S.90f.

erneuerbaren Energien.<sup>118</sup> Die Ludwig-Böllhoff-Systemtechnik ermittelt dabei einen Zuwachs von Arbeitsplätzen von Wasserstoff-Anlagen bei 15.000-220.000, je nach Szenario, bis 2050.<sup>119</sup> Da innerhalb der Faktoren Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie und Produktion und Entwicklung von Wasserstofftechnologien und -komponenten ebenfalls indirekt Arbeitsplätze und deren Entwicklung vorhanden sind, wird der Faktor Arbeitsplatzentwicklung nicht weiter verfolgt.

### **3.3.10 Infrastrukturelle Entwicklung der deutschen Wasserstoffwirtschaft**

Die deutsche Wasserstoffwirtschaft benötigt eine direkte Einbindung in das Energie- und Industriesystem. Hierbei ist insbesondere die Verteilung, Verfügbarkeit vor Ort und die Einfachheit der Beschaffung wichtig für den Endverbraucher. Große Anlagen werden aktuell meist direkt vor Ort, durch z.B. eine eigene Elektrolyseanlage, versorgt. In der Zukunft werden aber zunächst mehr Anlagen versorgt werden, die sich zudem auch noch weitläufiger verteilen.<sup>120</sup> Eine notwendige Verteilung kann dabei einen preislichen Unterschied machen. Der sogenannte letzte Kilometer kann bei dezentralisierten Nutzern ca. 50% der Kosten ausmachen.<sup>121</sup> Die möglichen Optionen zur Verteilung sind dabei Verteilung von stark komprimiertem Wasserstoff als Gas, die Verteilung als flüssiger Wasserstoff oder per Pipeline. Weltweit gesehen, wird Wasserstoff in 95% der Anwendungen direkt vor Ort produziert und nicht weiter verteilt. Nur in 5% der Fälle wird er transportiert und gehandelt.<sup>122</sup> Weiterhin besteht die Möglichkeit von direkten lokalen Lösungen, z.B. Erzeugung bei Tankstellen direkt vor Ort per Elektrolyse. Im Gegensatz dazu steht die dezentrale Erzeugung. Innerhalb der Analyse der Wasserstoffstudie NRW wird Wasserstoff z.B. dezentral in windreichen Regionen im Norden Deutschlands hergestellt und deutschlandweit verteilt.<sup>123</sup> Nach dem FCH JU werden sich zukünftig Hydrogen Valleys bilden. Diese sollen den ersten Schritt von Pilotvorhaben zur industriellen Massennutzung bilden. Hydrogen Valleys sind definiert als:<sup>124</sup>

<sup>118</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.109ff.

<sup>119</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoffstudie NRW, 2019, S.148f.

<sup>120</sup> Vgl. Hydrogen Council, Path to competitiveness, 2020, S.28.

<sup>121</sup> Vgl. Hydrogen Council, Path to competitiveness, 2020, S.28.

<sup>122</sup> Vgl. FfE, Regionalisierung, 2019, S.23.

<sup>123</sup> Vgl. MWIDE; Wasserstoffstudie NRW, 2019, S.94; Kruse, M., Wedemeier, J., Potenzial grüner Wasserstoff, 2021, S.30f. in Wirtschaftsdienst.

<sup>124</sup> Vgl. FCH JU, Hydrogen Valleys, 2021, S.13ff.

1. Großer Maßstab jenseits von Demonstrationsvorhaben und min. 10 Mio. Euro Investment
2. Zulieferung von min. zwei Sektoren
3. Einbindung von mehreren Schritten in der Wertschöpfungskette, wie z.B. Produktion, Speicherung, Transport und Abnahme
4. Aktivitäten die geographisch lokale und regionale bis hin zu internationalem Ausmaß abdecken

Für die dauerhafte Einspeisung im Erdgasnetz bilden sich technische Restriktionen. Stand 2021 dürfen bis zu 10% Wasserstoff in das deutsche Erdgasnetz eingespeist werden. Die Restriktionen bestehen dabei zumeist nicht in der Pipeline-Infrastruktur, sondern in den nachfolgenden Komponenten.<sup>125</sup> Je nach Komponente besteht daher eine Wasserstofftoleranz innerhalb des Verteilnetzes. In den Industrienetzen wird allerdings eine sehr hohe Konzentration von Wasserstoff gefordert, um die Funktionalität von Prozessen zu gewährleisten.<sup>126</sup>

Innerhalb der Betrachtung der Infrastruktur wird die internationale Distribution zu Drittländern nicht miteinbezogen, da sie bereits im Schlüsselfaktor Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung näher erläutert wird. Demnach basiert dieser Schlüsselfaktor nur auf der nationalen Zentralisierung bzw. Dezentralisierung der Infrastruktur. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wasserstoff-Distribution komplex ist und eine Entwicklung dementsprechend schwer absehbar. Im Rahmen der Arbeit wird vermutet, dass sich ein Großteil der nationalen Versorgung, insbesondere im industriellen Rahmen, weiter lokal genutzt wird, um Transportkosten, den Bau von langen Pipelines und Richtlinien in der Einspeisung in das Erdgasnetz zu umgehen. Im Rahmen der Distribution von Wasserstoff werden sich, je nach Anwendung unterschiedliche Wege ergeben. Fraglich ist dabei, ob sich zuerst eine Infrastruktur zur Entstehung eines Bedarfs ergeben muss oder sich die Infrastruktur aus dem Bedarf ergibt. Im Rahmen der Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Infrastruktur aus dem Bedarf ergibt und somit die Förderung des Bedarfs relevanter ist als die Fokussierung der Infrastruktur. Daher wird der Faktor verworfen und indirekt z.B. durch die politische

---

<sup>125</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.10f.

<sup>126</sup> Vgl. IEA, The Future of Hydrogen, 2019, S.70f.

Orientierung bedient, welche eine große Einflussnahme auf die Regulierung der Infrastruktur innehat.

### 3.3.11 Öffentliche Fördermittel

Die öffentlichen Fördermittel sind ein entscheidender Faktor für die Möglichkeiten, die einer Technologie oder einem Forschungsfeld zur Verfügung stehen. Die öffentlichen Fördermittel für Forschung sind auf einem Höchststand. In Deutschland werden pro Jahr ca. 3% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) für das Forschungsbudget bereitgestellt. Innerhalb der EU stellt Deutschland 31% der Ausgaben für Forschung und Entwicklung.<sup>127</sup> Europa ist dabei auch in einer führenden Rolle zur Etablierung von Wasserstoffprojekten. 55% der weltweiten Projekte befinden sich in Europa.<sup>128</sup> Die öffentlichen Fördermittel sind daher ein immer wichtiger werdender Faktor in einem dynamischen Umfeld. Dies gilt insbesondere für forschungsintensive Schlüsseltechnologien, die in der Wasserstoffherzeugung und -nutzung benötigt werden. Demnach sind das Wachstum und die Effizienz der Branche direkt von den öffentlichen Mitteln abhängig. Insbesondere die Wasserstoffforschung hat sich dabei im letzten Jahrzehnt immer weiter intensiviert.<sup>129</sup> Hierbei wird nicht ein Teilgebiet von Wasserstoff favorisiert, sondern die Forschung verbessert diverse Segmente und Faktoren über die gesamte Wertschöpfungskette und auch Projekte, die sich indirekt mit CO<sub>2</sub>-Minderung beschäftigen, wie z.B.:<sup>130</sup>

- Grundlagenforschung
- Brennstoffzellen
- Wasserstoffspeicher und -transport
- Power-To-X
- Wasserstoffherzeugung
- Systemische Ansätze
- Sonstige

In der nationalen Wasserstoffstrategie spricht sich die Bundesregierung dafür aus, dass zukünftige Innovation auf einer Investition in gegenwärtige Forschung basiert.<sup>131</sup>

<sup>127</sup> Vgl. BMBF, Bildung und Forschung, 2020, S.7.

<sup>128</sup> Vgl. Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021, S.6.

<sup>129</sup> Vgl. BMWi, Bundesbericht Energieforschung, 2021, S.89.

<sup>130</sup> Vgl. BMWi, Bundesbericht Energieforschung, 2021, S.89.

<sup>131</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.14.

Innerhalb der EU sticht dabei deutlich das Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) heraus, welches 844 Mio. Euro in mehr als 220 Projekte zwischen 2008 und 2020 investiert hat.<sup>132</sup> In Anhang eins werden die genauen Forschungsfördermittel und Aufteilungen noch einmal detailliert aufgezeigt und prozentual berechnet. Der Faktor fokussiert sich auf öffentliche Fördermittel, da diese sich zunächst klar separieren und anrechnen lassen und die Fördermittel aus der Industrie vernetzter und schwerer identifizierbar sind, wohingegen öffentliche Fördermittel durch die Berichte der Bundesregierung klar zurechenbar sind. Die Ausprägungen des Schlüsselfaktors beziehen sich auf eine Entwicklung der Fördermittel bis zum Jahr 2021 in einer Staffelung. Die Ausprägungen sind:

1. Steigendes Niveau
2. Gleichbleibendes Niveau
3. Sinkendes Niveau

Die Entwicklung bezieht sich dabei insbesondere auf das Wachstum der öffentlichen Fördergelder von 2012 bis 2020, welches ebenfalls in Anhang eins ersichtlich ist. Innerhalb des Faktors sind die reinen Fördermittel einberechnet, ohne weitere monetäre Förderungen, wie z.B. Subventionen. Hintergrund ist, dass die politischen Maßnahmen, wie Steuerensenkungen für Akteure der Branche oder auch Subventionen, in den Faktor acht politisch strategische Ausrichtung miteinbezogen werden. Daher basiert Faktor elf rein auf öffentlichen Fördermitteln, um eine doppelte Einberechnung zu vermeiden.

### **3.3.12 Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung**

Es ist eine klare Zielsetzung der deutschen Bundesregierung international für Wasserstoff zusammenzuarbeiten. Dabei sollen zunächst Kooperationen aufgebaut und immer weiter vertieft werden. Besonderer Fokus liegt im Aufbau von Wasserstoffmärkten, der Entwicklung von Technologie und der Produktionsumstellung auf nachhaltige Energieträger.<sup>133</sup> Dies soll ebenfalls unterstützend auf die Dekarbonisierung der Partnerländer wirken. Bereits bestehende Energiepartnerschaften können hierfür genutzt werden, beispielsweise in Form von IRENA oder IEA. Deutsche Entwicklungsarbeit wird gesondert

---

<sup>132</sup> Vgl. FCH JU, Hydrogen Roadmap Europe, 2019, S.60.

<sup>133</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.27.

berücksichtigt, um die Partnerländer ebenfalls miteinzubeziehen, aber jedoch ohne eine Ausnutzung notwendiger Wassersreserven. Nachhaltigkeit wird über die gesamte Wertschöpfungskette fokussiert.<sup>134</sup>

Nach einer Studie von Greenpeace ist eine lokale Erzeugung bei günstigen Bedingungen für nachhaltige Energie sinnvoll. Dennoch potenzieren sich bei der Zusammenarbeit zwischen weit entfernten Ländern die Transportkosten. Die Erhöhung durch einen Schiffs-transport kann dabei bei 50-150% der Gesamtkosten liegen. Transportvarianten sind divers. Wasserstoff kann in verschiedenen Aggregatzuständen transportiert werden oder wahlweise vor dem Transport umgewandelt werden. Weiterführend muss der Energieträger dann noch vor Ort verteilt werden, um zur Anwendung zu gelangen. Nach Analyse der Wissenschaftlichen Dienste kann das Preisniveau bei Import daher vergleichbar sein wie bei nationaler Erzeugung. Möglicherweise ist es sogar höher.<sup>135</sup>

Die Reichweite von Importmengen ist divers. Innerhalb der Studie vom Institut für Energie- und Umweltforschung für Agora Energiewende reichen die Werte zum Import von Power-to-gas in 2040 von wenigen einstelligen TWh bis zu 200 TWh. Auf Basis dieser Analyse ist eine Kooperation schwer einschätzbar.<sup>136</sup> Nach der Studie besteht eine Importabhängigkeit bereits, da bereits 2016 ca. 64% des deutschen Energiebedarfs aus dem Ausland importiert wurden. Bereits damals waren das mehr als zehn Prozentpunkte mehr als im europäischen Durchschnitt. Die Nettoimportquote von Erdgas lag bei 91,2%. Die Importe kamen dabei größtenteils aus Russland. Weiterführend ist zu prüfen, welcher Art diese Kooperationen sind. Agora Energiewende regt eine kritische Betrachtungsweise an. Wasserstoff aus Nordafrika ist bezüglich der Verteilungsstrategie schwer einschätzbar. Zur deutschen Nutzung müssten langfristige Lieferverträge bestehen und Deutschland müsste vermutlich helfen die Anlagen vor Ort mitaufzubauen. Wahlweise besteht die Möglichkeit, dass Investoren den Markt besetzen. Dabei würden die synthetischen Energieträger in Hinblick auf die freie Marktwirtschaft, international frei verfügbar sein. Hierbei könnte ein massiver Preisanstieg die Folge sein.<sup>137</sup>

---

<sup>134</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.27f.

<sup>135</sup> Vgl. Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020, S.10.

<sup>136</sup> Vgl. Ifeu et al., Effizienz im Gebäudesektor, 2018, S.84.

<sup>137</sup> Vgl. Ifeu et al., Effizienz im Gebäudesektor, 2018, S.90.

Das Forschungszentrum Jülich nimmt einen internationalen Handel an. Wasserstoff kann dabei als Reingas und weiterverarbeitet, z.B. in Form von synthetischem Methan oder liquiden Energieträgern, importiert werden. Das Importpotenzial für energetischen Wasserstoff liegt bei ca. 443 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a). Ca. 357 TWh/a werden jeweils von synthetischem Methan und Power-to-liquid importiert.<sup>138</sup> Das BMWi sieht Deutschland weiterhin als großen Energieimporteuer. Hintergrund dafür sind Produktionskostenvorteile in wind- und sonnenreichen Regionen außerhalb Deutschlands. Vorteile bieten sich für die deutsche Wirtschaft zudem in dem Aufbau der Anlagen vor Ort.<sup>139</sup>

Laut Guidehouse werden Gasnetze innerhalb der EU und zu den EU-Grenzen weiterhin eine Schlüsselrolle in der EU-weiten Energieversorgung spielen. Dies gilt für Gas- und LNG-Verteilzentren und ebenso für nachhaltige, fossile und dekarbonisierte Gase. Die Gas-Infrastruktur verteilt dabei 25% des Primärenergieverbrauchs der EU. Das Gas-System soll dabei eine Speichermöglichkeit, insbesondere zur Weiterverarbeitung von erneuerbaren Energien bieten. 25% des benötigten Gases kommen aus der EU. Der Rest kommt aus Russland, Norwegen und Nord-Afrika.<sup>140</sup> Die Ausprägungen des Faktors werden somit international, für den europäischen Kontinent und ganz ohne Kooperationen getroffen:

1. Internationale Kooperationen
2. Europäische Kooperationen
3. Einzelkämpfer

Innerhalb der internationalen Kooperationen bilden sich Kooperationen, die sowohl innerhalb als auch über die europäischen Grenzen hinaus funktionieren. Klare Handelspartnerschaften sind die Folge. Hierbei wird unterstellt, dass der Wasserstoff insbesondere in den Nordafrikanischen Staaten grün hergestellt wird und in Ländern wie Russland oder Norwegen blau.<sup>141</sup> Internationale Kooperationen haben somit eine Mischung aus grünem und blauem Wasserstoff als Grundlage. Eine europäische Kooperation hingegen bezieht insbesondere, aufgrund der bestehenden Handelsbeziehungen<sup>142</sup>, die beiden Länder

---

<sup>138</sup> Vgl. FCH Jülich, Wege für die Energiewende, 2020, S.6.

<sup>139</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.8.

<sup>140</sup> Vgl. Guidehouse, Gas Decarbonisation Pathways 2020-2050, 2020, S.41; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15; Ebd. S.58.

<sup>141</sup> Vgl. Handelsblatt, Hoffnung Wasserstoff, 2019, S.18.

<sup>142</sup> Vgl. Bukold, Dr. S., Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020, S.43.

Russland und Norwegen ein, welche den Fokus auf blauem Wasserstoff gesetzt haben. In der dritten Ausprägung ist Deutschland ein Einzelkämpfer und nur minimale Mengen von Wasserstoff werden importiert. Aufgrund der notwendigen Energieunabhängigkeit entsteht in diesem Fall eine grüne Wasserstoffversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien.

### **3.3.13 Bewahrung einer nicht direkt von anderen Staaten abhängigen Energieversorgung**

Eine erhöhte heimische Wasserstoffherstellung hat direkten Einfluss auf die Abhängigkeit von Energieimporten, aus der EU und von Drittländern.<sup>143</sup> Weiterhin bietet eine heimische Produktion den Vorteil der Arbeitsplatzschaffung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette und insbesondere der direkten Wasserstofferzeugung.<sup>144</sup> Demgegenüber steht der höhere Strombedarf im Allgemeinen und für erneuerbare Energien im Besonderen. Grüner Wasserstoff kann aktuell nur durch erneuerbaren Strom auf industriellem Niveau erzeugt werden. Es bietet sich für Deutschland die Chance die aktuelle Energieabhängigkeit zu überwinden und eine heimische Versorgung zu entwickeln.<sup>145</sup> Mineralöl wird zu 100% importiert und Erdgas zu 99%.<sup>146</sup> Diese Abhängigkeit ist bei Preisschwankungen auf dem Weltmarkt direkt spürbar. Durch den Ausbau von erneuerbaren Energien und Wasserstoff, der aus diesen hergestellt wird, kann sich das Abhängigkeitsverhältnis ändern. Dies gilt insbesondere bei Wasserstoff als möglichem Erdgassubstitut, da sich hier die Lieferstruktur und Wertschöpfungsketten aktuell erst bilden. Weiterhin sind die Energievorkommen in Deutschland und die Fläche zum Ausbau erneuerbarer Energieträger begrenzt.<sup>147</sup> Demnach wird eine Abhängigkeit bestehen bleiben. Die Lieferketten werden sich zwar neu bilden, aber eine Marktorientierung wird hier wahrscheinlicher als eine forcierte Unabhängigkeit von anderen Ländern durch den Staat. Im Allgemeinen ist die Energieabhängigkeit seit 2000 stark in Deutschland angestiegen.<sup>148</sup> Daher bestehen bereits starke Abhängigkeiten zu anderen Ländern, ohne die vermehrte Nutzung von Wasserstoff, insbesondere in grüner Form. Dieser Schlüsselfaktor wird demnach als

<sup>143</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.94.

<sup>144</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.98.

<sup>145</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.16.

<sup>146</sup> Vgl. UBA, Primärenergiegewinnung und -importe, 2021, o.S.

<sup>147</sup> Vgl. BMWi, Energiedaten: Gesamtausgabe, o.J., o.S.

<sup>148</sup> Vgl. Statista, Abhängigkeit von Energieimporten in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2019, 2021, o.S.

irrelevanter angesehen als z.B. die Bildung von internationalen Kooperationen. Daher wird er nicht weiterverfolgt.

### **3.3.14 Betriebssicherheit bei Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff**

Das Explosionspotenzial von Wasserstoff ist eine allgegenwärtige Charakteristik des Gases. Für die Explosion muss der Wasserstoffanteil in der Luft mehr als 4% betragen.<sup>149</sup> Durch diese Eigenschaften eignet sich Wasserstoff für Verbrennungsmotoren, erzeugt aber auch Risiken.<sup>150</sup> Die Vermutung liegt nahe, dass Wasserstoff bei möglichen Leckagen in der Infrastruktur Auswirkungen auf die Atmosphäre haben könnte oder zur Explosion neigt.<sup>151</sup> Durchschnittlich ca. 2% werden dabei über Herstellung, Konditionierung und Transport an die Umwelt abgegeben. Nach einer Studie des Forschungszentrum Jülich ist der Einfluss bzw. das Schadpotenzial einer Wasserstoffwirtschaft auf die Atmosphäre und den stratosphärischen Ozonabbau als gering zu bewerten.<sup>152</sup>

Eine direkte Verbrennung von Wasserstoff ist nur mit einer Durchmischung eines Oxidators, im Normalfall Sauerstoff, und einer Zündquelle über 560 °C möglich. Wenn Wasserstoff verbrennt, ist die Flamme kaum sichtbar und emittiert kaum Wärmestrahlung. Objekte in der direkten Umgebung fangen daher schlechter Feuer und mögliche Verbrennungen fallen nicht so stark aus.<sup>153</sup> Weiterhin ist es nicht selbstentzündlich, brandfördernd, giftig, ätzend oder radioaktiv. Es besteht keine Gefährdung von Wasser oder eine direkte, negative Einwirkung auf Pflanzen oder Menschen. Wasserstofftanks beinhalten keinen Sauerstoff. Bei Verbrauch wird auch keine Luft, bzw. Sauerstoff in den Tank einströmen. Dies bildet einen direkten Unterschied bspw. zu einem Benzintank. Bei Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff entstehen reines Wasser und Wärme und insbesondere kein CO<sub>2</sub>.<sup>154</sup> Selbst die Diffusion, also dass Wasserstoff als kleinstes Molekül

---

<sup>149</sup> Vgl. Handelsblatt, Hoffnung Wasserstoff, 2019, S.33; DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, 2011, S.12.

<sup>150</sup> Vgl. Feck, T., Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust, 2009, S.13.

<sup>151</sup> Vgl. Feck, T., Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust, 2009, S.18.

<sup>152</sup> Vgl. Feck, T., Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust, 2009, S.145ff.

<sup>153</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, 2011, S.12ff.

<sup>154</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, 2011, S.12ff.

durch seinen Schutztank hindurch diffundiert und nach außen gelangt, ist kein direktes Problem in der Speicherung. Seit über 100 Jahren wird Wasserstoff in Stahlflaschen gelagert. Problematiken innerhalb von Pipelines, die mehrere hundert Meter lang sind, entstehen eher durch Wasserstoffversprödung. Dies bedeutet, dass Wasserstoff-Moleküle in z.B. in Metalle hineindiffundieren. Dadurch kann eine Versprödung des Materials entstehen. Bisher hat dieses Phänomen in weltweit über 2.000 km Wasserstoff Industrie-Leitungen noch nicht zu Problemen geführt. In der Auslegung von Material für den Bau von Pipelines oder in direktem Zusammenhang mit der Nutzung von Wasserstoff wird die Wasserstoffversprödung berücksichtigt. Der Effekt ist, je nach Material, stärker oder schwächer.<sup>155</sup>

Innerhalb geschlossener Räume, wie z.B. Garagen oder Parkhäusern, reichen die gesetzlich erforderlichen Luftwechselraten aus, ein gefährliches Gemisch zu vermeiden. Weiterhin haben Automobilhersteller Mechanismen eingebaut, die den Einsatz von Wasserstoff in Fahrzeugen sicherer machen. Zunächst sind die Fahrzeuge an den notwendigen Stellen vollständig verdichtet. Im Fall eines Brandes, wird der Wasserstoff durch eine Entlastungsventil nach unten weggeblasen, um eine Verbrennung im Feuer zu erwirken. Er soll direkt verbrennen, bevor er sich zu einem Explosionsgemisch wandeln kann.<sup>156</sup> In Unfallsituationen haben Wasserstofftanks direkte Vorteile gegenüber Benzintanks. Zunächst ist Wasserstoff leichter als Luft und verflüchtigt sich daher. Wohingegen Benzin beispielsweise am Boden verweilt. Weiterhin sind die Tanks, bedingt durch die inneren hohen Drücke, stabiler als Benzintanks. Demnach ist das Risiko bei Unfällen als gering einzuschätzen.<sup>157</sup> Weiterhin sind bisher keine Problematiken bei Tankstellen erkennbar. Eine Gefährdung in der Chemie-Branche ist ebenfalls nicht erkennbar. Alle Unfälle befinden sich in gleichem Maß wie mit anderen brennbaren Materialien.<sup>158</sup>

Zusammenfassend hat Wasserstoff daher kein erhöhtes Sicherheitsrisiko, insbesondere gegenüber Erdgas. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Schlüsselfaktor daher verworfen.

---

<sup>155</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011, S.12ff.

<sup>156</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011, S.13ff.

<sup>157</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011, S.13ff.

<sup>158</sup> Vgl. DWV, Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011, S.13ff.

### 3.3.15 Stör- und Extremereignisse

Plötzliche Änderungen sind ein wichtiger Faktor in der Zukunftsbetrachtung. Diese Diskontinuitäten erlauben in der Zukunftsentwicklung Raum für plötzliche, unerwartbare Abweichungen.<sup>159</sup> Es entstehen immer wieder Ereignisse, die den Verlauf der Zukunft maßgeblich beeinflussen und vorher nicht direkt absehbar waren. Diese Ereignisse können die technologische Entwicklung und den Wandel hin zu Wasserstoffwirtschaft, sowohl verstärken und beschleunigen als auch hemmen und verlangsamen oder sogar beenden. Beeinflussende Vorkommnisse stehen dabei in direkten Zusammenhang mit dem Klimawandel, der die Ursache für den Umschwung hin zu Wasserstoff bildet. Förderliche Ereignisse beinhalten dabei eine Erschwerung des Klimawandels durch Ereignisse, wie z.B. extrem heiße Sommer oder milde Winter, allgemein steigende Temperaturen oder diverse Ereignisse, die den Klimawandel negativ beeinflussen. Eine neutrale Ausprägung geht davon aus, dass keine besonderen Vorkommnisse entstehen, die eine bestimmte Auswirkung erzeugen. Ereignisse gegen den Klimawandel entstehen beispielsweise durch Entwarnungen der klimatischen Entwicklungen oder disruptive nachhaltige Technologien. Demnach wird Wasserstoff als übergreifender Energieträger, insbesondere für die Einbindung und Speicherung erneuerbare Energien im Energiesystem, irrelevant. Ereignisse müssen dabei vorher nicht abzusehen sein und extreme Auswirkungen erzeugen. Die Ausprägungen sind:

1. Förderliche Ereignisse
2. Neutrale Ereignisse
3. Konträre Ereignisse

### 3.3.16 Gesellschaftlicher Konsens

In der deutschen Gesellschaft vertreten die Bürger unterschiedliche Meinungen zu Wasserstoff und seiner Fortentwicklung in der deutschen Wirtschaft. Der gesellschaftliche Konsens und demnach die öffentliche Meinung bestimmen dabei maßgeblich die Politik und die Industrie. Sollte sich die Meinung daher in eine Richtung manifestieren, kann dies die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft beeinflussen. Meinungen können dabei übergeordnet verschiedene Ausrichtung annehmen. Unabhängig von dem politischen

---

<sup>159</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.26.

Wahlverhalten der Bürger wird daher der gesellschaftliche Konsens mit den folgenden Ausprägungen manifestiert:

1. Überwiegend pro Wasserstoff
2. Neutral Wasserstoff
3. Konträre oder gespaltene Haltung

Die Akzeptanz der Bevölkerung ist eine Voraussetzung für den Erfolg der Energiewende.<sup>160</sup> Dies gilt insbesondere für den Ausbau des Stromnetzes, jedoch kann die erhöhte Nutzung von Gasnetzen die Akzeptanz der Bevölkerung steigern. Sollte die Akzeptanz der Bevölkerung nicht vorhanden sein, kann dies zu erheblichen Verzögerungen, z.B. beim Ausbau des gesamten Energienetzes führen. Grundlegend wird die Energiewende im Allgemeinen überwiegend positiv angesehen.<sup>161</sup> Bei regionalen Projekten kann dies aber abweichen. Dies gilt zwar überwiegend für den Ausbau des Stromnetzes kann aber ebenfalls auf den Ausbau des Wasserstoffnetzes angewendet werden. Die Bevölkerung hat insbesondere bei regionalen Projekten Einfluss auf den Ausbau. Daher spricht sich das Kopernikus Projekt für eine Einbindung der Gesellschaft bereits in den Technologieentwicklungsprozess aus.<sup>162</sup> Dies gilt insbesondere dafür, um die gesamte Akteurslandschaft in den Aufbauprozess miteinzubinden und zu vermeiden, zunächst Investitionen zu tätigen, die dann aufgrund von mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz wieder rückgebaut werden müssen. Weiterhin nimmt das Kopernikus Projekt an, dass die Gesellschaft aktuell noch kein fundiertes Wissen und Bewusstsein über die Technologien hat. Demnach kommt den interdisziplinären und gesellschaftlichen Dialog eine hohe Bedeutung zu. Der niedrige technologische Entwicklungsstand erschwert die Absehbarkeit des gesellschaftlichen Konsenses in Bezug auf Wasserstofftechnologien. Faktoren, die Wasserstofftechnologien negativ beeinflussen, sind dabei z.B. mangelnde Absehbarkeit von Risiken und Gefahren, die Nutzung von Räumen für Anlagen in der direkten Nähe zu Wohnflächen und ökologische Fragestellungen zur Technologie.<sup>163</sup> Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft ist eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz einer der Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Dekarbonisierung.<sup>164</sup> Die Ziele der EU-Klimaneutralität können somit nur erreicht werden, wenn die richtigen Rahmenbedingungen

---

<sup>160</sup> Vgl. Frontier Economics et al., Wert der Gasinfrastruktur, 2017, S.49ff.

<sup>161</sup> Vgl. Frontier Economics et al., Wert der Gasinfrastruktur, 2017, S.49ff.

<sup>162</sup> Vgl. Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 2. Roadmap Power-to-X, 2019, S.63.

<sup>163</sup> Vgl. Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 2. Roadmap Power-to-X, 2019, S.63ff.

<sup>164</sup> Vgl. BDEW, EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, 2020, S.4.

für die Sozialverträglichkeit, eine sichere Energieversorgung und die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie geschaffen werden.<sup>165</sup> Insbesondere bei Technologien, wie dem blauen Wasserstoff, ist eine gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie in Bezug auf die Umweltverträglichkeit entscheidend für die dauerhafte Nutzung.<sup>166</sup> Innerhalb des gesellschaftlichen Konsenses ist eine Einwirkung von volatilen und besonders steigenden Preisen relevant. Da diese bereits im Faktor Preisstabilität für den Endverbraucher betrachtet wurde, wird sie hier nicht erneut diskutiert.

Eine Zusammenfassung aller genutzten Schlüsselfaktoren und deren Ausprägungen ist in Anhang 6 einsehbar.

## **4 Bestimmung der Wechselwirkungen**

### **4.1 Grundannahmen in der Bestimmung der Wechselwirkungen**

Im Nachgang an die oben erarbeiteten Schlüsselfaktoren entsteht die Bestimmung der Wechselwirkungen. Dabei werden zur Vereinfachung der Systemgrenzen die folgenden Grundannahmen getroffen:

- Das Wertesystem der Gesellschaft wird sich weiter Richtung Nachhaltigkeit orientieren. Dies gilt insbesondere bei einer Gesellschaftsform, welche pro Wasserstoff orientiert ist.
- Der Bedarf an Wasserstoff ist je nach Erzeugungsart, also grüner, blauer oder türkiser Erzeugung gleich in 2040. Es ändert sich dabei lediglich die Erzeugung der notwendigen Bedarfsmenge.
- Es gibt keinen Einfluss von Faktoren auf den Faktor Störereignisse. Der Faktor kann nur beeinflussen, aber nicht beeinflusst werden.
- Europäische Kooperationen fokussieren blauen Wasserstoff.
- Internationale Kooperationen fokussieren blauen und grünen Wasserstoff.
- Ein disruptiver technologischer Durchbruch kann nicht erzwungen werden. Er kann maximal indirekt beeinflusst werden.

Zur Vereinfachung werden die Schlüsselfaktoren im ScenarioWizard und teilweise in den folgenden Kapiteln umbenannt. Die genaue Umbenennung der Faktoren im Text ist in

---

<sup>165</sup> Vgl. BDEW, EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, 2020, S.4.

<sup>166</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.8.

Anhang neun einsehbar und die Anpassung der Faktoren im ScenarioWizard in Anhang zehn.

## **4.2 Bestimmung der Wechselwirkungen**

In den folgenden Kapiteln werden die Wechselwirkungen der einzelnen Schlüsselfaktoren zueinander näher bestimmt. Dabei werden die Einflusswirkungen jeweils eines Schlüsselfaktors auf die restlichen wiedergegeben. In dieser Reihenfolge gibt es eine Ausnahme. Die Einflüsse des Faktors neun und die Einflüsse auf den Faktor neun werden alle bei Faktor neun in Kapitel 4.2.9 beschrieben. In den Punkten, wo keine eindeutige Aussage aus der Literatur entnommen werden kann, werden Annahmen getroffen.

### **4.2.1 Einflüsse des Faktors Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland**

Im Rahmen der Wasserstoffentwicklung und der damit entstandenen Prognosen ergeben sich unterschiedliche Annahmen an den zukünftigen Bedarf. Die Prognosen beziehen sich dabei meistens auf das Jahr 2050 und nicht das Jahr 2040 und auf Europa und nicht nur Deutschland. Dabei werden oftmals einzelne Teilbereiche anstatt der deutsche Gesamtmarkt betrachtet. Die Arbeit orientiert sich an der Berechnung des Wasserstoff-Bedarfs anhand der Roadmap des Fraunhofer Instituts. Diese nimmt je nach Szenario an, dass im Jahr 2050 402-645 TWh Wasserstoff benötigt werden.<sup>167</sup> Zur Vereinfachung wird im Rahmen der Arbeit daher der Wert 500 TWh für das Jahr 2050 angenommen. Im Jahr 2020 lag der nationale Bedarf ca. bei 55 TWh.<sup>168</sup> Auch wenn der Bedarf sich vermutlich nicht linear entwickeln wird, wird im Rahmen der Arbeit zur Vereinfachung angenommen, dass er sich linear entwickelt. Somit müssten bei 445 TWh Differenz im Bedarf zwischen 2021 und 2050 jedes Jahr ca. 14,83 TWh Wasserstoffbedarf mehr entstehen. Daher ergibt sich für das Jahr 2040 der Bedarf von ca. 351,6 TWh. Die Bundesregierung geht dabei beispielsweise als Meilenstein für den Bedarf 2030 von 90-110 TWh aus.<sup>169</sup> Der Bedarf ist dabei für alle Erzeugungsvarianten derselbe. Es wird weiterhin angenommen, dass bei der Erzeugung von türkischem Wasserstoff erneuerbare Energien für

---

<sup>167</sup> Vgl. Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.9.

<sup>168</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.10.

<sup>169</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.5.

Versorgung des Hochtemperaturreaktors genutzt werden und dass der entstandene Kohlenstoff weiter industriell genutzt wird.

Der Einfluss einer grün dominierenden Variante des Faktors eins ist zunächst anders zu betrachten als die Varianten blau oder türkis. Für grünen Wasserstoff bestehen keine direkten Anreize im Markt.<sup>170</sup> Nach aktuellem Stand ist die grüne Variante noch teurer und wird erst durch Skaleneffekte wettbewerbstauglich.<sup>171</sup> Eine grün dominierende Variante schafft allerdings aufgrund der Wertschöpfungskette einen Bedarf für erneuerbare Energien. Die grün dominierende Variante hat daher eine direkte Wechselbeziehung mit Faktor zwei. Blauer und türkiser Wasserstoff hingegen basieren auf Erdgas. In der Vision der Bundesregierung werden Blau und Türkis eher für den Markthochlauf der Wasserstoffindustrie relevant.<sup>172</sup> Ab einem gewissen Punkt soll grüner Wasserstoff dann übernehmen. Dieser Punkt ist aber nicht klar definiert. Somit kann sich der Markt ohne direkte Anreize zunächst relativ frei entwickeln. Bei einer Fokussierung auf blauen Wasserstoff besteht die Gefahr von Anbindungs-Effekten, welche den Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern eher erschweren als vereinfachen.<sup>173</sup> Eine Stagnation hingegen wirkt hemmend für die grüne Variante. Türkiser Wasserstoff hingegen schafft geringere Bedarfe für erneuerbare Energien, da drei bis fünfmal weniger Strom benötigt wird als für die Elektrolyse der gleichen Wasserstoffmenge.<sup>174</sup> Demnach muss ein überdurchschnittliches Wachstum der erneuerbaren Energien erfolgen, falls sich eine blau dominierende Wasserstoffausprägung abzeichnet. Wenn sich eine grün dominierende Variante entwickelt, wirkt sich das eher neutral auf das überdurchschnittliche Wachstum aus. Die grüne Variante setzt sich in diesem Fall bereits von alleine durch. Demnach kann der Ausbau nach Plan erfolgen.

Türkiser Wasserstoff wirkt aufgrund seiner weiteren Nutzung von Kohlenstoff als Nebenprodukt fördernder auf die Branchendurchdringung als blauer und grüner Wasserstoff.<sup>175</sup> Hierbei gilt anzumerken, dass grüner und türkiser Wasserstoff sich aktuell noch nicht auf dem gleichen industriellen Niveau befinden, wie grauer Wasserstoff. Dennoch

---

<sup>170</sup> Vgl. CEA et al., HySpeedInnovation, 2020, S.16.

<sup>171</sup> Vgl. BDEW, Roadmap Gas, 2020, S.17.

<sup>172</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3; BDEW, Roadmap Gas, 2020, S.12f.

<sup>173</sup> Vgl. IKEM, Wasserstoff - Farbenlehre, 2020, S.8f.

<sup>174</sup> Vgl. IEA, The Future of Hydrogen, 2019, S.41.

<sup>175</sup> Vgl. BDEW, Roadmap Gas, 2020, S.12; Fraunhofer IEE, Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem, , 2020, S.19.

kann festgehalten werden, dass eine schwache Branchendurchdringung von Wasserstoff generell einen hemmenden Einfluss auf alle Varianten hat, da sich hier nur eine kleine Interessensgemeinschaft für Wasserstoff bildet.

Problematisch kann weiterhin die Speicherung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von blauem Wasserstoff werden, wenn aktuelle Anlaufprobleme langfristig nicht gelöst werden.<sup>176</sup>

Eine Produktion von Komponenten in Deutschland entwickelt sich zusammen mit der Dominanz der jeweiligen Variante. Eine Unterscheidung der Einflüsse ist daher ähnlich in der Betrachtungsweise. Innerhalb der Arbeit wird die Annahme getroffen, dass sich eine grün dominante Variante dabei leicht unterscheidet, da in Deutschland bereits eine Industrie für den Ausbau von erneuerbaren Energien vorhanden ist. Eine grüne Wasserstoffwirtschaft bildet einen Anschluss an die Wertschöpfungskette der bereits bestehenden Industrie. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass sich die Ausprägungen auf eine Produktion deutscher Komponenten mit Nischenanteilen hemmend auswirkt, da angenommen wird, dass sich der Bedarf an Wasserstoff sukzessive erhöht.<sup>177</sup> Dies basiert auf der Annahme, dass Komponenten nur mit Mehraufwand importiert werden müssen und komplexere Wertschöpfungsketten im Import von Komponenten vorhanden sind.

Innerhalb der einzelnen dominanten Auswirkungen ergeben sich fördernde Einflüsse auf die jeweiligen Varianten des technologischen Fortschrittes. Generell hat jede Ausprägung einen fördernden Einfluss auf den technologischen Fortschritt, da Wasserstoff als solches einer Förderung bedarf, beispielsweise in der Sektorkupplung. Es wird dabei angenommen, dass eine Stagnation insbesondere blauem Wasserstoff neutral gegenübersteht und die anderen beiden Varianten hemmt. Dies basiert auf der Grundlage, dass blauer Wasserstoff auf dem bereits erprobten grauen Wasserstoff beruht, welcher aktuell den Großteil des Marktanteils in der Herstellung besetzt.<sup>178</sup>

Der Einfluss auf die politische Ausrichtung kann dabei einen signifikanten Unterschied ergeben. Sollte grüner Wasserstoff durch politische Maßnahmen kostengünstiger werden, ergibt sich dadurch ein großer Vorteil gegenüber klimaschädlichen Verfahren.<sup>179</sup> Des Weiteren sieht die deutsche Wasserstoffstrategie nur grünen Wasserstoff als dauerhaft nachhaltig an, auch wenn türkis und blau für den Markthochlauf vermutet werden. Die

---

<sup>176</sup> Vgl. Bukold, Dr. S., Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020, S.49.

<sup>177</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

<sup>178</sup> Vgl. Ausfelder, Dr. F., Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.85.

<sup>179</sup> Vgl. Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021, S.13.

deutsche Bundesregierung erkennt ebenfalls an, dass sich ein europäischer Markt für türkisen und blauen Wasserstoff bilden kann.<sup>180</sup> Dieser Markt wird in erster Linie aufgrund der erhöhten Emissionsabgabe nicht direkt forciert. Eine grün dominierende Variante erzeugt damit eine besonders fördernde Wirkung auf eine pro Wasserstoff orientierte Politik.

Das Einflusschema von Faktor eins auf sieben orientiert sich ebenfalls an der aktuellen Forschungsnotwendigkeit. Ein steigendes Niveau der Fördermittel wird im Rahmen der Emissionspolitik insbesondere grünem und türkisen Wasserstoff zugeordnet. Blauer Wasserstoff hingegen wird dabei, aufgrund der bereits ausgebauten Erdgasinfrastruktur und der Emissionsentwicklung weniger gefördert. Bei grünem Wasserstoff ist die Herstellung der Elektrolyse zwar etabliert, aber nicht auf hochindustriellem Niveau oder in vergleichbaren Wirkungsgraden. Relevant könnten hier insbesondere die SOEC oder PEM werden.<sup>181</sup> Türkiser Wasserstoff befindet sich aktuell noch in der Pilotphase.<sup>182</sup> Die Technologie gilt als vielversprechend, allerdings ist der Wirkungsgrad aktuell noch deutlich schlechter als bei der blauen Variante.<sup>183</sup> Blauer Wasserstoff benötigt die Lagerung von CO<sub>2</sub>, um als treibhausgasarm angesehen zu werden. Die Lagerung erfolgt dabei in Gesteinsschichten, welche Aquifere genannt werden. Auch hier besteht noch Forschungsbedarf.<sup>184</sup> Zusammengefasst sind alle drei Technologien im weiteren Verlauf der Energiewende von Forschung und demnach auch öffentlichen Fördermitteln abhängig. Die Abhängigkeit bei grünem und türkischem Wasserstoff ist größer.

Innerhalb der internationalen Kooperationen ergibt sich ein klares Bild. Ein Großteil der aktuellen weltweiten Wasserstoffstrategien basiert auf der Annahme, Wasserstoff als Energieträger zu nutzen, um Emissionen zu mindern.<sup>185</sup> Da im Kapitel der Ausprägungserklärung bereits darauf verwiesen wurde, dass eine internationale Kooperation besonders die Förderung von grünem und blauem Wasserstoff verspricht, wird hier ein stark fördernder Einfluss angenommen. Im Gegensatz bilden sich für blauen Wasserstoff eher europäische Kooperationen, da bereits eine bestehende Lieferkette, auf Basis von Erdgas, vorhanden ist. Das Einzelkämpfertum hingegen fördert insbesondere wieder die grüne

---

<sup>180</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.2f.

<sup>181</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.16.

<sup>182</sup> Vgl. Bukold, Dr. S., Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020, S.10.

<sup>183</sup> Vgl. Fraunhofer IEE, Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem, 2020, S.19.

<sup>184</sup> Vgl. Bukold, Dr. S., Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020, S.10.

<sup>185</sup> Vgl. Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021, S.6; Ebd. S.8.

Variante, da sich die nationale Wasserstoffstrategie für die Nachhaltigkeit von grünem Wasserstoff ausspricht. Durch den kommenden Kohle- und Atomausstieg in der Energiewirtschaft wird zukünftig ein großer Anteil der Energieerzeugung auf erneuerbaren Energien basieren. Die Stärke der Förderung ist hierbei kleiner als bei internationalen Kooperationen, da weniger Synergieeffekte durch begrenzte nationale Ressourcen entstehen.<sup>186</sup> Der Einfluss der Varianten auf den gesellschaftlichen Konsens ist stark. Eine Gesellschaft, die immer mehr nach nachhaltigen Werten strebt, wird eine dauerhaft blaue Variante nicht akzeptieren. Hierbei gilt die oben getroffene Grundannahme, dass sich das Wertesystem der Gesellschaft zunehmend Richtung Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Auch wenn diese Ansicht zwiespalten ist, da beispielsweise Arbeitsplätze in der blauen Wasserstoffindustrie eine mögliche akzeptierte Notwendigkeit sein können. Auf Basis der Grundannahme der Werteorientierung Richtung Nachhaltigkeit ergibt sich für die blau dominierende Variante ein hemmender Einfluss auf den positiv orientierten gesellschaftlichen Konsens. Grüner und türkiser Wasserstoff hingegen beeinflussen die pro orientierte Grundhaltung der Gesellschaft fördernd.

#### **4.2.2 Einflüsse des Faktors Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor**

Zunächst kann gesagt werden, dass ein Ausbau der erneuerbaren Energien in einem zukünftigen Energiesystem mit Treibhausgasneutralität notwendig ist und die vielversprechendsten Technologien dabei Wind- und Solarkraft sind. Die Prognosen für den Ausbau im Jahr 2030 sind dabei sehr unterschiedlich, beispielhaft reichen sie von 390-481 TWh, je nach Quelle.<sup>187</sup> Um gegen grauen Wasserstoff wettbewerbsfähig zu werden, müssen erneuerbare Energien deutlich ausgebaut werden. Der Ausbau muss dabei gleichzeitig mit den Elektrolyseuren erfolgen. Diese können ab rund 40 GW Leistung in Europa kompetitiven Wasserstoff in Wettbewerb zum bisher genutzten grauen Wasserstoff werden.<sup>188</sup> Die Gasnachfrage ist dabei abhängig vom Ausbau der erneuerbaren Energien.<sup>189</sup> Eine grün dominierende Variante kann deutlich einfacher entstehen, wenn genug Strom durch

---

<sup>186</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.2; BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.4; Bundesregierung, Von der Kohle hin zur Zukunft, o.J., o.S.

<sup>187</sup> Vgl. Agora Energiewende, Stromnetze, 2018, S.14ff.; BEE, BEE-Szenario 2030, 2020, S.4ff.; Ebd. S.8.

<sup>188</sup> Vgl. Hydrogen Council, Path to competitiveness, 2020, S.71.

<sup>189</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.7.

erneuerbare Energien verfügbar ist. Daher gilt hier ein stark fördernder Einfluss auf die grün dominierende Variante. Blau und Türkis hingegen profitieren eher von einer Stagnation des Ausbaus, da dann auf Erdgas zurückgegriffen werden muss, um den Bedarf an Wasserstoff im Energiesystem zu begegnen. Relevant für komplett nachhaltigen Wasserstoff ist somit, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien wieder an Wachstum aufnimmt und die Stagnation von 2018-2020 rückläufig wird.<sup>190</sup>

Der Einfluss von Faktor zwei auf Faktor drei basiert auf der Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbarem Strom. Bei einer erhöhten Verfügbarkeit entstehen Kostenvorteile für Großabnehmer. Erneuerbare sind dabei auf dem Weg kurzfristig<sup>191</sup> die Energieversorgung mit günstigem Strom zu verbessern und langfristig<sup>192</sup> die günstigste Energiequelle zu werden. Ohne sie als zentrale Energiequelle ist auf Dauer keine CO<sub>2</sub>-freie Stromversorgung möglich.<sup>193</sup> Demnach bilden sich auch auf lange Sicht enorme Kostenvorteile Wasserstoff aus grüner Erzeugung.<sup>194</sup> Nach aktuellem Stand ist grüner Wasserstoff noch zwei bis drei mal teurer als blauer Wasserstoff, aber dies kann sich über die Betrachtungsperiode, insbesondere durch den erneuerbaren Energieausbau, ändern. Günstige Preise, sowohl für Strom, als auch daraus resultierenden Wasserstoff, fördern die Branchendurchdringung massiv.

Zur Produktion von erneuerbaren Energien und deren Technologien haben sich bereits diverse Unternehmen in Deutschland angesiedelt. Ein Ausbau von erneuerbaren Energien bedingt daher eine Förderung der ansässigen Unternehmen in Bezug auf die Auftragslage. Demnach entstehen durch den Ausbau Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette der erneuerbaren Energien und somit auch in der deutschen Produktion von Wasserstofftechnologien.<sup>195</sup> Ein mangelnder Ausbau kann dabei zu einer Erschwerung der Wasserstoffindustrieentwicklung in Deutschland führen. Somit könnten die Bedarfe in kleinerem Maß entstehen. Geringere Bedarfe würden dabei kleinere Eigenproduktionen von Unternehmen in Deutschland fördern, da bedingt durch eine kleinere Branche, geringere wirtschaftliche Anreize für Unternehmen vorhanden sind, in den Markt einzusteigen.

---

<sup>190</sup> Vgl. Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, Monitoringbericht 2020, 2021, S.81ff.: Ebd. S.84.

<sup>191</sup> Vgl. BEE, Argumente für die Energie der Zukunft, 2017, S.19.

<sup>192</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.16f.

<sup>193</sup> Vgl. UBA, Strommarkt und Klimaschutz, 2021, S.241.

<sup>194</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.16f.

<sup>195</sup> Vgl. Bundesanzeiger, Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, 2020, S.3f.

Auf Basis von sektorübergreifender Programmen, wie z.B. dem nationalen Dekarbonisierungsprogramm oder den Reallaboren der Energiewende, wird die Forschung Richtung erneuerbarer Energie gestärkt.<sup>196</sup> Somit können Synergieeffekte im gesamten System entstehen. Ein Ausbau der erneuerbaren Energien ist dabei eine indirekte Grundvoraussetzung im Bereich der Forschung, um das Langzeitziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. Somit korreliert ein Ausbau der erneuerbaren im überdurchschnittlichen Ausmaß mit Steigerung des technologischen Fortschritts und wachsenden Fördermitteln. Da im Bereich der erneuerbaren Energien eher die notwendigen Ausbaukapazitäten relevant sind, richtet sich die Forschung in diesem Bereich größtenteils an die Sektorkupplung mit anderen Bereichen. Beispielhaft hierfür können die Reallabore der Energiewende stehen, welche sich deutlich in Richtung Sektorkupplung orientieren.<sup>197</sup> Ein Ausbau der erneuerbaren Energien versinnbildlicht somit einen generellen Umschwung der Gesellschaft hin zur CO<sub>2</sub>-Neutralität.

Die Politik bildet den Grundrahmen für die Förderung im Energiesystem und besonders für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Der Einbezug von Anreizsystemen zum Ausbau der erneuerbaren drückt dabei mehr aus als reinen Kapazitätswachst. In der Szenariobildung des Umweltbundesamtes ergeben sich beispielsweise für die erzeugten Szenarien mit Fördersystemen für erneuerbare Energien deutliche andere Ergebnisse als für welche ohne.<sup>198</sup> Dies basiert auf der Grundannahme, dass Fördersystemen mehr zugrunde liegt als kostengünstiger Kapazitätswachst. Vielmehr werden hierbei, durch die politische Richtungsweisung, Präferenzen für die Gesamtausrichtung des Energiesystems auf verschiedenen Ebenen gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher davon ausgegangen, dass ein Ausbau der erneuerbaren Energien eine politisch strategische Ausrichtung für den Klimaschutz darstellt. Eine Stagnation hingegen fördert eine Haltung gegen Wasserstoff.

Bei einem Ausbau von erneuerbaren Energien wird die Verarbeitung innerhalb der Wertschöpfungskette relevanter. Wasserstoff trägt dazu bei, Emissionen zu sparen. Dafür muss der Wasserstoff allerdings emissionsarm hergestellt werden. Dies geschieht mit erneuerbaren Energien. Demnach erzeugt ein Ausbau der erneuerbaren Energien innerhalb der Wasserstoff-Wertschöpfungskette steigende öffentliche Fördermittel. Diese können

---

<sup>196</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.14.

<sup>197</sup> Vgl. BMWi, Gewinner des Ideenwettbewerbs, ohne Jahr, S.1ff.

<sup>198</sup> Vgl. UBA, Strommarkt und Klimaschutz, 2021, S.243.

sich dann mit der grünen Erzeugung von Wasserstoff, der Verteilung und der Speicherung auseinandersetzen.

Ein Ausbau im Bereich der erneuerbaren Energien gibt Deutschland eine erhöhte Unabhängigkeit von anderen Staaten in der Energiewirtschaft. Dies gilt insbesondere für europäische Kooperationen bzw. Kooperationen auf dem europäischen Kontinent, da hier durch die direkte Anbindung ein Großteil der aktuellen Importe entstehen. Ein Wachstum der erneuerbaren Energien in Deutschland bildet dabei die Grundlage für die dauerhafte Versorgung mit grünem Wasserstoff. Eine Stagnation hingegen fördert die Bildung von Kooperationen unter der Prämisse, dass grüner Wasserstoff benötigt wird, um nachhaltige CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. Da die internationalen Kooperationen in dieser Arbeit ebenfalls auf grünem Wasserstoff beruhen, können hier bei einem überdurchschnittlichen Ausbau Synergieeffekte entstehen, allerdings weniger stark.

Der Einfluss auf den gesellschaftlichen Konsens hängt davon ab, was mit dem Ausbau einhergeht. Erhöhte Steuern z.B. könnten die gesellschaftliche Meinung gegenüber erneuerbaren Energieträgern negativ beeinflussen. Günstigerer Strom durch erneuerbare Energien hingegen könnte positive Auswirkungen bieten. Wahlweise besteht auch die Möglichkeit, dass Bürger sich insbesondere gegen Onshore-Windenergie stellen, da sie einen direkten geographischen Einfluss für Bürger bietet. Zwar werden auch Solarkraft, Biomasse und Offshore-Windenergie in einem gesamtheitlichen Ausbau steigen, aber Onshore-Windkraft hat aktuell den höchsten Anteil an der erneuerbaren Versorgung. Dieser Status wird sich in einem Ausbau nicht komplett ändern.<sup>199</sup>

Im Rahmen der Arbeit wird angenommen, dass ein erhöhter Ausbau der erneuerbaren Energien, aufgrund von sinkenden Strompreisen und dem wachsenden Nachhaltigkeitsgedanken den gesellschaftlichen Konsens hin zu Wasserstoff fördert. Eine Stagnation hingegen fördert eine konträre oder gesplante Haltung.

#### **4.2.3 Einflüsse des Faktors Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie**

Eine starke Branchendurchdringung fördert in erster Linie die Dominanz von blauem Wasserstoff. Dies basiert auf der Annahme, dass dieser am einfachsten in den notwendigen Kapazitäten bis zum Jahr 2040 ausgebaut werden kann. Die anderen beiden

---

<sup>199</sup> Vgl. UBA, Erneuerbare Energien in Deutschland, 2021, S.7.

Technologien werden schwächer gefördert. Türkiser Wasserstoff muss sich erst ausgehend vom aktuell geprägten Forschungsniveau<sup>200</sup> industriell etablieren und grüner Wasserstoff benötigt deutlich ausgebaute Kapazitäten in der erneuerbaren Energieerzeugung. Eine schwache Branchendurchdringung ist dabei nicht zielführend, um grünen Wasserstoff auszubauen. Schwache Branchenbedarfe werden daher blau oder türkis befriedigt. Eine starke Branchendurchdringung fördert den Ausbau von erneuerbaren Energien, da in Summe mehr Wasserstoff benötigt wird, selbst wenn die dominierende Variante nicht grüner Wasserstoff ist. Dies ist zunächst die Grundannahme des Einflusses der Branchendurchdringung. Grundsätzlich funktioniert der Ausbau der erneuerbaren Energieträger, aber für das Gesamtsystem und nicht nur für Wasserstoff. Daher hat eine Stagnation zwar einen Einfluss auf den grünen Energieausbau, aber keinen extremen. Bei allen drei Wasserstofffarben werden allerdings Bedarfe zu Gunsten der grünen Wasserstoffherzeugung geschaffen. Selbst bei der Dominanz von blauem Wasserstoff kann die Erzeugungsquote von grünem Wasserstoff vom bisherigen einstelligen Prozentbereich<sup>201</sup> auf beispielhaft 30% anwachsen. Daher entsteht im Allgemeinen ein fördernder Einfluss der Branchendurchdringung auf die erneuerbaren Energieträger.

Eine starke Branchendurchdringung in Deutschland vereinfacht die Produktion innerhalb der Wertschöpfungskette dahingehend, dass die Lieferketten und die geographischen Abstände deutlich minimiert werden. Demnach bilden sich lokale Cluster, welche die Technologie erzeugen und verbrauchen. Grundannahme der Cluster ist es, große Teile der Wertschöpfungskette abzubilden, mehrere Sektoren anzubinden und in großen Zahlen Regionen anzubinden.<sup>202</sup> Die Markteintrittsbarrieren vereinfachen sich durch den lokalen Bedarf ebenfalls. Bei einer geringen Branchendurchdringung ist es für die Teilnehmer im Markt einfacher, die Technologie aus dem Ausland zu importieren. Größere Anwendungen hingegen fördern die Spezialisierung von nationalen Firmen, die dann insbesondere auch unter dem gleichen Recht und der gleichen Währung agieren.

Eine starke Branchendurchdringung schafft einen wirtschaftlich lukrativen Erzeugungsmarkt. Durch diesen Anreiz forschen Unternehmen umfangreicher. Demnach werden größere Forschungskapazitäten aufgewandt, um einen Wettbewerbsvorteil zu erhalten.

---

<sup>200</sup> Vgl. MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.15.

<sup>201</sup> Vgl. Adam, P. et al., Wasserstoffinfrastruktur, 2020, S.7; BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.10.

<sup>202</sup> Vgl. FCH JU, Hydrogen Valleys, 2021, S.13.

Der technologische Fortschritt und daher auch der Innovationsdruck steigen mit Marktgröße und mit Anzahl der Marktteilnehmer. Daher entsteht ein deutlich fördernder Einfluss auf die stetige Steigerung des technologischen Fortschritts. Disruptiver Fortschritt wird hierbei zwar gefördert, kann aber nicht erzwungen werden. Dies wird dadurch bedingt, dass sich mehr Unternehmen mit Wasserstoff auseinandersetzen, Darin besteht seine Disruption. Eine schwache Branchendurchdringung fördert dabei eine Stagnation des technologischen Fortschritts.

Durch eine erhöhte Branchendurchdringung bzw. je nach Höhe der Branchendurchdringung vergrößert sich der Lobbyismus im Land erheblich. Daher steigt der Einfluss der Wirtschaft auf die Politik. Eine starke Branchendurchdringung erhöht damit den Einfluss auf die Politik und das dahinterliegende Anreiz- und Kontrollsystem, wie z.B. bei Gesetzen, Normen, Richtlinien etc. Eine schwache Branchendurchdringung erzeugt eher Anreizsysteme für die bisher genutzten Energieträger. Hierbei lohnt es sich nicht, Ressourcen für Wasserstoff politisch zu etablieren.

Weiterhin steigern sich auf dieser Basis die öffentlichen Fördergelder, da ein erhöhter Bedarf zur Forschung und Verbesserung durch von wirtschaftlichen Interessen vorliegt.<sup>203</sup> Eine schwache Branchendurchdringung fördert somit sinkende Fördermittel.

Eine starke Branchendurchdringung in Deutschland macht den deutschen Markt interessant für Handelspartner, insbesondere aus dem internationalen Ausland. Innerhalb von europäischen Kooperationen entsteht, aufgrund von begrenzteren Kapazitäten, ein geringer fördernder Einfluss. Eine schwache Branchendurchdringung fördert daher das Einzelkämpfertum.

Eine starke Branchendurchdringung lässt durch die wachsenden Bedarfe Arbeitsplätze entstehen. Dies fördert in einfacher Weise eine pro Wasserstoff orientierte Gesellschaft und klimatische Ansichten. Dies basiert insbesondere auf sinkenden Preisen bei erhöhten Bedarfen in verschiedenen Sektoren. Eine schwache Durchdringung hingegen lässt keine Fixkostendegression und Skaleneffekte<sup>204</sup> zu, da sich Wasserstoff dann eher als Nischenprodukt etabliert. Ein Heimatmarkt für Wasserstoff ist daher im Markthochlauf unumgänglich.

---

<sup>203</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3; Ebd. S.7.

<sup>204</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.6.

#### 4.2.4 Einflüsse des Faktors Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten

Eine höhere Rate der Produktion von Technologien über die Wertschöpfungskette<sup>205</sup> vereinfacht die Nutzung von Wasserstoff in Deutschland. Die Marktbarrieren für den Einstieg in den Markt sind geringer, da ein großer Markt in der Herstellung von Komponenten bereits in Deutschland besteht. Demnach ist auch die Verhandlungssprache im Bereich der Komponentenerstellung vorwiegend Deutsch und es ergeben sich deutsche bzw. europäische Standards.

Im Rahmen der Arbeit wird davon ausgegangen, dass eine erhöhte deutsche Produktion und Wettbewerbsfähigkeit in der Komponentenerstellung für Wasserstoff alle drei Varianten fördert. Hintergrund dafür ist, dass sich Lieferketten vereinfachen und nationale Lieferanten die Produktion von Wasserstoff positiv unterstützen. Da bereits eine Grundlage in der deutschen Industrie für die Erzeugung von Komponenten für die erneuerbaren Energien und deren Wertschöpfungskette vorhanden ist, wird angenommen, dass die grüne Variante minimal mehr gefördert wird, als die blauen und türkisen Varianten.

Die vorwiegende Produktion von Wasserstofftechnologien in Deutschland erzeugt demnach auch Bedarfe auf Seiten der erneuerbaren Energien.<sup>206</sup> Je einfacher und besser Wasserstofftechnologien in Deutschland produziert werden können, desto mehr Synergieeffekte entstehen über die verbundenen Branchen entlang der Wertschöpfungskette. Zu dieser Wertschöpfungskette gehören ebenfalls die erneuerbaren Energien. Eine starke Produktion von Technologien in Deutschland hat daher einen fördernden Einfluss auf den Ausbau der erneuerbaren Energien.

Eine Branchendurchdringung von Wasserstofftechnologien wird durch etablierte Technologieführerschaft ebenfalls einfacher, da sich die Technologie einfacher in den Branchen implementieren lässt. Hierbei lassen sich ebenfalls Synergieeffekte auf nationaler Basis schaffen. Je größer die Produktion von Komponenten in Deutschland ist, desto einfacher kann eine starke Branchendurchdringung über verschiedene Branchen hinweg erfolgen.

---

<sup>205</sup> Vgl. Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.95; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.67.

<sup>206</sup> Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.119.

Eine starke Produktionskultur und somit im besten Fall eine Technologieführerschaft basieren auf technologischer Innovation. Demnach erzeugt eine Produktionslandschaft in Deutschland einen hohen Innovationsdruck im Bereich Wasserstoff. Somit erhöht sich Anzahl der Personen und Unternehmen, welche sich mit Wasserstoff auseinandersetzen und ein technologischer Fortschritt wird wahrscheinlicher. Demnach fördert die Produktion von Wasserstofftechnologien den technologischen Fortschritt.

Dieser Zuwachs an Unternehmen im Bereich einer Technologieführerschaft fördert eine positive politische Meinungsbildung für Wasserstoff, da Arbeitsplätze geschaffen werden und erhöhte Steuereinnahmen durch deutsche Unternehmen entstehen. Eine Produktion im Bereich von Nischenanteilen hingegen zieht durch eine mangelnde politische Lobby keine Aufmerksamkeit auf sich. Die Hebelwirkung der Wasserstoffwirtschaft auf die politische Meinung verringert sich somit.

Eine Technologieführerschaft in der Produktion von Wasserstofftechnologien schafft Bedarfe und ein Momentum in der Industrie und demnach beeinflusst der Faktor die öffentliche Forschung und somit die öffentlichen Fördergelder umfangreich. Die politische strategische Orientierung wird ebenfalls positiv gefördert, wenn sich eine starke Produktionslandschaft in Deutschland bildet, da direkte Arbeitsplatz- und Beschäftigungseffekte vorhanden sind.<sup>207</sup> Insbesondere die Arbeitplatzeffekte bilden sich dabei in der Betrachtung der politischen Beeinflussung heraus. Des Weiteren entsteht die Förderung des Faktors durch die Bildung einer starken Wasserstoffindustrie in Deutschland. 36,4 Mrd. Euro können pro Jahr potenziell durch den Export von Power-to-X-Anlagen und die Produktion dieser entstehen. Power-to-X steht für Anlagen, welche Strom in andere Stoffe, wie z.B. Gase oder Wärme, umwandeln. Vereinfachend bedeutet dies einen Zuwachs von ca. 470.800 Arbeitsplätzen.<sup>208</sup> Aus dieser Betrachtung ergibt sich ebenfalls der Einfluss auf die öffentlichen Fördergelder, da diese weitestgehend auf der politischen Strategiewerichtung beruhen. Eine Technologieführerschaft würde somit einen starken Anreiz für die Steigerung der Fördergelder verursachen.

Bei einer deutschen Technologieführerschaft verringert sich der Kontakt zu Kooperationen, da Deutschland in der Lage ist, seine Bedarfe selber zu versorgen. Je geringer die deutsche Eigenversorgung mit Wasserstoffkomponenten und -technologien ist, desto

---

<sup>207</sup> Vgl. IW, *frontier economics*, Synthetische Energieträger, 2018, S.42; Wuppertal Institut, *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten*, 2020, S. 116ff.

<sup>208</sup> Vgl. IW, *frontier economics*, Synthetische Energieträger, 2018, S.42.

notwendiger werden internationale Kooperationen. Nischenanteile fördern somit internationale Kooperationen und hemmen das Einzelkämpfertum. Die Ausprägung Teilschnologien fördert alle Varianten gleich, da bei dieser Ausprägung, sowohl Inland und Ausland die Bedarfe befriedigen können.

Die öffentliche Meinung wird ebenfalls durch die Bildung einer starken Produktionslandschaft von Wasserstofftechnologien beeinflusst, da sich insbesondere Arbeitsplätze<sup>209</sup> bilden und sich weltweit etablierte Technologieunternehmen in Deutschland niederlassen. Ziel der Bundesregierung ist es, dass sich das Technologiewachstum nicht nur regional fokussiert, sondern deutschlandweit wächst.<sup>210</sup> Demnach entsteht keine geographische Diskrepanz in der deutschen Wirtschaft und ein positives Wachstum über die Produktion der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette fördert die gesellschaftliche Ansicht zu Wasserstoff deutschlandweit.

#### **4.2.5 Einflüsse des Faktors Technologischer Fortschritt**

Der Einfluss eines disruptiven Fortschritts ist, aufgrund der notwendigen technologischen Skalierung, insbesondere bei grünem und türkischem Wasserstoff vorhanden. Blauer Wasserstoff hingegen profitiert eher von der technologischen Stagnation. Die stetige Steigerung fördert ebenfalls grünen und türkisen Wasserstoff.

Es wird davon ausgegangen, dass ein disruptiver Durchbruch, also grüner Wasserstoff, den größten Einfluss auf den Ausbau der erneuerbaren Energien hat, allerdings kann er nicht geplant entstehen. Generell kann festgehalten werden, dass die erneuerbaren Energien nicht stark abhängig von technologischem Fortschritt sind. Relevant sind eher die Kapazitäten im Markt. Demnach hemmt eine technologische Stagnation die erneuerbaren Energien weniger als reine Wasserstofftechnologien.

Für den Umfang der Branchendurchdringung hingegen sieht es anders aus. Ein disruptiver Wandel ist per Definition nicht erzwingbar. Er hat zwar einen starken förderlichen Einfluss auf die Branchendurchdringung, da er die Branche maßgeblich verändern wird, basiert aber auf einem hohen Risiko. Daher werden die positiven Einflüsse von disruptivem Wandel und stetiger Steigerung in diesem Fall gleich bewertet. Die Stagnation des technologischen Fortschritts fördert eine schwache Branchendurchdringung.

---

<sup>209</sup> Vgl. IW, frontier economics, Synthetische Energieträger, 2018, S. 42; Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S. 116ff.

<sup>210</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.7f.

Dies gilt ebenfalls für den Einfluss auf die deutsche Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten. Hierbei ist allerdings entscheidend, wo genau die Innovation entstanden ist. Sollte sie im Ausland entstanden sein, kann dies einen unterschiedlichen Einfluss erzeugen. Bei diesem Einfluss wird daher davon ausgegangen, dass die Innovationen des Faktors Technologischer Fortschritt in Deutschland stattfinden. Die Einflüsse der deutschen Forschungslandschaft auf die Produktion von Technologien im eigenen Land ist daher naheliegend.

Innerhalb des Einflusses auf die politische Landschaft und deren Strategieentwicklung beeinflusst der technologische Fortschritt die Politik anhand des Aufbaus und der Kommunikation einer gemeinsamen Wissensbasis. Ziel ist es, Wissenschaft für die Politik aufzuarbeiten und beispielweise durch Fachausschüsse zugänglich zu machen. Weiterhin verstärken technologische Neuerungen, die insbesondere in Deutschland entstehen, den Technologiestandort Deutschland. Positive Neuerungen fördern die positive politische Ansicht zu Wasserstoff, wobei die Stagnation des technologischen Fortschritts eher die konträre Sichtweise zur Technologie fördert.

In der Arbeit wird die Annahme getroffen, dass ein technologischer Fortschritt und daraus entstehendes wirtschaftliches Wachstum steigende Fördergelder verursacht. Ein ausbleibender technologischer Fortschritt hingegen, fördert sinkende Fördermittel.

Disruptive Neuerungen auf grüner Basis fördern im Rahmen der Arbeit die internationale Zusammenarbeit und das Einzelkämpfertum, da beide auf grünem Wasserstoff basieren. Eine stetige Steigerung fördert eher EU-Kooperationen. Bei einer Stagnation des technologischen Fortschritts steigern sich die europäischen und internationalen Entwicklungskooperationen besonders stark. Die Stagnation bedingt die Notwendigkeit sich im Ausland zu orientieren, um die Innovation in der Wasserstofftechnologie voranzutreiben.

Deutschland kann auf Basis des technologischen Fortschritts die gesellschaftliche Meinungsbildung, ähnlich wie die politische, durch wissenschaftliche Publikationen und ein nachfolgendes Wirtschaftswachstum durch Wasserstoff nachhaltig beeinflussen. Stetige und disruptive Fortschritte fördern das Vertrauen der Gesellschaft in die Wasserstofftechnologie stärken dabei die pro Wasserstoffausrichtung der Gesellschaft, wohingegen eine Stagnation die konträre und gespaltene Haltung fördert.

#### 4.2.6 Einflüsse des Faktors Politisch strategische Ausrichtung

Der Einfluss der Politik auf die einzelnen Wasserstoffarten orientiert sich insbesondere anhand der strategischen Ausrichtung. Relevant hierfür ist demnach die Nationale Wasserstoffstrategie, anhand derer sich die politischen Maßnahmen in den kommenden Jahren orientieren werden. Eine dauerhafte Nachhaltigkeit entsteht hierbei nach Meinung der Bundesregierung nur bei grünem Wasserstoff.<sup>211</sup> Dennoch werden insbesondere für den Markthochlauf auch türkiser und blauer Wasserstoff gehandelt werden. Der Zeitrahmen entsteht hierbei zunächst bis ca. 2030. Eine politische Ausrichtung wird demnach insbesondere die grüne Herstellung fördern, aber für den Markthochlauf auch blau und türkis miteinbeziehen müssen. Eine neutrale politische Ausrichtung hingegen hat keinen Einfluss und eine konträre Ausrichtung hemmt jegliche Form von Wasserstoff.

Eine in Richtung Wasserstoff orientierte Politik schafft einen direkten Bedarf für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Netzentwicklungspläne Strom und Gas werden indirekt durch die Politik über die Bundesnetzagentur erstellt und veröffentlicht. Die Bundesnetzagentur arbeitet hierbei mit Betreibern von Wasserstoffanlagen zusammen, um Elektrolysekapazitäten aufzubauen.<sup>212</sup> Des Weiteren wurden die erneuerbaren Energien durch die Zielsetzung der Treibhausneutralität bis 2050 und den Ausstieg aus der Atomkraft gefördert.<sup>213</sup> Demnach besteht ein direkter Einfluss der Politik auf den Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Politik spricht sich dabei bereits aktuell dafür aus, die Wirtschaft beim Markthochlauf von Wasserstoff zu unterstützen.<sup>214</sup> Hierbei werden die Rahmenbedingungen für private Investitionen geschaffen, die die allgemeine Nutzung, den Transport und die Erzeugung auf nachhaltiger Basis verbessern. Des Weiteren wird der Markthochlauf für Technologien von Wasserstoff in Deutschland gefördert.<sup>215</sup>

Die Unterstützung der Bundesregierung für den kommenden Markthochlauf bzw. die Branchendurchdringung und die Produktion von Wasserstoffkomponenten in Deutschland ist demnach bereits klar geregelt. Innerhalb der Forschungsanstrengungen hat die politische Ausrichtung klare Möglichkeiten zur Beeinflussung. Die öffentlichen Fördermittel basieren auf der strategisch politischen Ausrichtung der Bundesregierung. Eine

<sup>211</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.1ff.

<sup>212</sup> Vgl. Bundesnetzagentur, Regulierung von Wasserstoffnetzen, 2020, S.39f.

<sup>213</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3; Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, Monitoringbericht 2020, 2021, S.45.

<sup>214</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

<sup>215</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.5.

positive politische Meinung gegenüber Wasserstoff kann eine deutsche Produktionslandschaft, z.B. auf Basis von bürokratischen Hürden oder Gründungsanreizen, vereinfachen. Eine konträre Haltung hingegen erschwert eben jene Gründungen und die Rahmenbedingungen und somit das Wachstum einer deutschen Produktionslandschaft.

Die Faktoren Technologischer Fortschritt und Öffentliche Fördermittel werden direkt durch die Forschungs- und Bildungspolitik der Politik beeinflusst. Die Politik hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Verteilung von Forschungsbudgets. In den vergangenen Jahren wurden diese zu Gunsten von Wasserstoff verteilt. Die Fördersumme ist auf einem aktuellen Höchststand.<sup>216</sup> Ein Teil des technologischen Fortschritts basiert demnach auf der politischen Ausrichtung. Der weitere Teil wird insbesondere durch die Industrie gefördert. Die öffentlichen Fördermittel und der technologische Fortschritt sind daher von der politischen Meinungsbildung abhängig. Weiterhin hat die Politik auch einen direkten Einfluss auf die Auswahl des Lehrmaterials an Schulen.

Eine positiv orientierte politische Ausrichtung für Wasserstoff ist relevant für die Bildung von Kooperationen jenseits des eigenen Landes. Insbesondere die Betrachtung von Markteintrittsbarrieren bildet hier ein Handlungsfeld der Politik ab. Stand 2021 vermutet die Bundesregierung, dass die bereits bestehende Energieabhängigkeit von anderen Staaten vorhanden bleibt. Dabei wird die vorhandene europäische Infrastruktur besonders herausgebildet.<sup>217</sup> Für internationale Partnerschaften in Zusammenhang mit Wasserstoff werden ca. zwei Mrd. Euro von der Bundesregierung zur Verfügung gestellt.<sup>218</sup> Generell ist es notwendig, bei internationalen Partnerschaften klare Standards für die Branche zu schaffen. Der Rahmen für die Zusammenarbeit kann demnach für die ganze EU etabliert werden. Eine konträre Haltung hingegen hemmt Wasserstoff im Allgemeinen.

Der Einfluss der Politik auf den gesellschaftlichen Konsens für Wasserstoff basiert in erster Linie auf der Information der Bürger und der Bildung von Gesetzen. Wasserstoff wird dabei z.B. in die politische Debatte mitaufgenommen und kann bei zukünftigen Wahlen ein direktes Wahlkampfthema werden. Die CDU/CSU und die SPD haben es beispielsweise bereits in ihr Wahlprogramm zur Wahl 2021 aufgenommen.<sup>219</sup> Eine

---

<sup>216</sup> Siehe Anhang 1: Übersicht öffentliche Fördermittel.

<sup>217</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.12.

<sup>218</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

<sup>219</sup> Vgl. SPD, Aus Respekt vor deiner Zukunft, 2021, S.4; CDU, CSU, Das Programm für Stabilität und Erneuerung, 2021, S.10.

Richtung Wasserstoff orientierte Politik fördert demnach eine überwiegend pro Wasserstoff orientierte Gesellschaft.

#### **4.2.7 Einflüsse des Faktors Öffentliche Fördermittel**

Da die Bundesregierung den Fokus auf grünen Wasserstoff legt, liegt ein förderlicher Einfluss insbesondere auf die grün dominierende Variante vor. Dennoch werden für den Markthochlauf ebenfalls die blaue und türkise Variante gefördert, aber aufgrund der Emissionserzeugung in geringeren Maß. Sinkende Fördermittel haben einen hemmenden Einfluss auf alle Ausprägungen. Im Rahmen der Arbeit wird davon ausgegangen, dass bei steigenden Fördermitteln eine Korrelation zu erhöhter Innovation entsteht.

Demnach muss sich die Erzeugung durch erneuerbare Energien dementsprechend anpassen. Im Rahmen zur Umsetzung der Wasserstoffstrategie stehen diverse Projekte zur Verfügung, um den Markthochlauf und damit auch die Branchendurchdringung zu unterstützen. Der Beginn erfolgte mit den Reallaboren der Energiewende, welche als Transfer der theoretischen Forschung in reale Anwendungen dienen sollte. Im Zukunftspaket des Koalitionsausschusses vom 03.06.2020 werden mehr als 7 Mrd. Euro für den nationalen Markthochlauf von Wasserstoff eingeplant.<sup>220</sup> Die Bundesregierung spricht sich dabei dafür aus, dass der Bedarf mittel- bis langfristig deutlich steigen wird.

Eine starke Branchendurchdringung wird somit wahrscheinlicher, je mehr öffentliche Fördergelder zur Verfügung stehen. Sinkende Fördermittel erschweren den technologischen Fortschritt und fördern eher eine schwache Branchendurchdringung.

Diese Förderungen haben ebenfalls einen indirekten Einfluss auf die Produktion von Komponenten in Deutschland, da sie die Forschung, die Bedarfe und die Ansiedelungen von Technologieunternehmen in Deutschland fördern. Der Einfluss der öffentlichen Fördermittel auf den technologischen Fortschritt wird als fördernd angenommen. Demnach erhöht sich die Chance auf technologischen Fortschritt mit steigenden Fördermitteln und schwindet mit sinkenden Fördermitteln. Diese Wechselwirkung ist in der Realität nicht zwingend notwendig, im Rahmen der Arbeit wird sie aber angenommen.

Die Wissenschaft und dementsprechend auch die Forschung, welche auf Grundlage der öffentlichen Fördermittel basiert, hat die Aufgabe, Wissen zu generieren und an die

---

<sup>220</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

Gesellschaft und Politik zu verbreiten.<sup>221</sup> Eine Einbindung der Politik kann dabei auf verschiedenen Wegen erfolgen. Beispielhaft für die wissenschaftliche Einbindung der Politik stehen das Büro für Technikfolgenabschätzung des deutschen Bundestages<sup>222</sup> und die Wissenschaftlichen Dienste.<sup>223</sup> Diese übergeben neue wissenschaftliche Erkenntnisse an die Politik. Erhöhte Fördermittel bedingen dabei grundlegend die Forschungsmöglichkeiten und fördern wissenschaftliche Erkenntnisse. Somit ist ein fördernder Einfluss der öffentlichen Fördermittel auf die Politik bei steigenden Fördermitteln gegeben. Sinkende Fördermittel hemmen den technologischen Fortschritt bzw. die Forschung an Wasserstoff. Demnach erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass mit steigenden Fördermitteln ein Innovationsstandort in Deutschland einher geht.

Deutschlands Wandel zu einem etablierten Land in der Wasserstoffproduktion- und -verarbeitung ist ein enormer politischer Anreiz, da Arbeitsplätze geschaffen werden und erhöhte Steuereinnahmen erfolgen können. Demnach ist Innovation ein relevanter Faktor hin zur Wasserstoffwirtschaft. Ein steigendes Niveau der Fördermittel wird dabei in Verbindung zu wachsender Innovation gesetzt. Diese Korrelation ist nicht strikt, wird aber im Rahmen dieser Wechselwirkung angenommen.

Ein Innovationsstandort fördert den Handel und demnach auch Kooperationen über die nationalen Grenzen hinaus. Da Kooperationen Synergieeffekte hervorrufen, fördert ein steigendes Forschungsbudget der öffentlichen Fördermittel die Effekte einer Kooperation.

Steigende Fördermittel erhöhen die Forschungsmöglichkeiten durch z.B. Anlagen oder Mitarbeiter dahingehend, dass z.B. mehr wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht werden können. Auf dieser Basis entsteht eine gebildeterere und aufgeschlossenerere Gesellschaft. Ein Mangel an Forschung erhöht eine konträre oder gespaltene Haltung aufgrund von Unwissenheit. Die Energieagentur.NRW stellt klar heraus, dass es zielführend für die Energiewende ist, über ihre Notwendigkeit und die Sinnhaftigkeit für das Klima, besonders bei Akzeptanzproblemen, aufzuklären.<sup>224</sup> Dabei spielt Wasserstoff als möglicher nachhaltiger Energieträger eine direkte Rolle.

---

<sup>221</sup> Vgl. BMBF, Wissenschaft mit der und für die Gesellschaft, o.J., o.S.

<sup>222</sup> Vgl. TAB, Über uns, o.J., o.S.; Deutscher Bundestag, Die Wissenschaftlichen Dienste, o.J., o.S.

<sup>223</sup> Vgl. Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020, S.1ff.

<sup>224</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Europäische Ansätze, 2020, S.8.

#### **4.2.8 Einflüsse des Faktors Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung**

Stand 2020 wird Wasserstoff bisher in nur 5% der Erzeugungsmenge weltweit gehandelt. Der Großteil wird erzeugt und ohne weiteren Transport verbraucht.<sup>225</sup> Vorwiegend werden bei internationalen Kooperationen die Länder Russland und Norwegen für blauen Wasserstoff oder die Nordafrikanischen Staaten grüne Erzeugung genannt.<sup>226</sup> Im Rahmen der Arbeit wird davon ausgegangen, dass bei einem Import von Wasserstoff dieselben technischen Standards wie in Deutschland herrschen.<sup>227</sup> Wasserstoff ist weltweit einer der Schlüsselfaktoren zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens, was sich insbesondere auch in der steigenden Veröffentlichung von Wasserstoffstrategien erkennen lässt.<sup>228</sup> Ein Zusammenspiel in der Erreichung der gemeinsamen Ziele ist daher mehr als wahrscheinlich. Worin sich die Strategien allerdings unterscheiden ist die Art der Zielerreichung. Die Strategien unterscheiden sich durch Faktoren, wie z.B. Fokus auf grünem Wasserstoff, auf fossilen Energieträgern basierendem Wasserstoff, Kombinationen von Wasserstoffarten, Leistungskapazitäten für Elektrolysen etc.<sup>229</sup> Es angenommen, dass internationale Kooperationen eher mit Nordafrikanischen Staaten und grünem und blauem Wasserstoff zusammenhängen und europäische Kooperationen insbesondere den Fokus auf bisherigen Energieträgerlieferanten wie Russland und Norwegen<sup>230</sup> und somit blauem Wasserstoff suchen. Diese beiden Länder werden aufgrund Ihrer direkten geographischen Angrenzung als europäische Kooperationen gezählt. In beiden Varianten wird vermutet, dass sich Deutschland in der eigenen Erzeugung anhand der Kooperation, zumindest für den Markthochlauf, orientiert.<sup>231</sup>

Bei einer Einzelkämpfervariante wird die Erzeugung auf Basis von erneuerbaren Energien und damit grün stattfinden. Diese Variante wird im Rahmen der Analyse, aufgrund der nationalen Wasserstoffstrategie, bei den anderen Varianten mitaufgegriffen, aber nur in der Einzelkämpfer-Variante ist sie vollkommen auf Basis von deutschen Energieherstellung möglich. Internationale Kooperationen haben dabei, aufgrund der u.a. grünen

---

<sup>225</sup> Vgl. Bundesnetzagentur, Regulierung von Wasserstoffnetzen, 2020, S.16.

<sup>226</sup> Vgl. Bundesnetzagentur, Regulierung von Wasserstoffnetzen, 2020, S.16.

<sup>227</sup> Vgl. adelphie consult et al., Grüner Wasserstoff, 2019, S.6f.

<sup>228</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.19.

<sup>229</sup> Vgl. IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020, S.19.

<sup>230</sup> Vgl. adelphie consult et al., Grüner Wasserstoff, 2019, S.16; Wuppertal Institut, Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020, S.44.

<sup>231</sup> Vgl. BMWi, Nationale Wasserstoffstrategie, 2020, S.3.

Wasserstofffokussierung, des international wachsenden Bedarfs und des entstehenden Netzwerks einen minimal fördernden Einfluss auf den überdurchschnittlichen Ausbau der erneuerbaren Energien. Europäische Kooperationen hemmen diesen, auf Basis von blauer Wasserstofforientierung und stehen einem Ausbau nach Plan neutral gegenüber. Dieser kann zwar international beeinflusst werden kann, aber die Entscheidung der Zielsetzung am erneuerbaren Energieausbau wird durch die deutsche Regierung getroffen.

Im Rahmen der Branchendurchdringung in Deutschland vereinfachen Kooperationen die Herstellung und erzeugen einen geringeren Einkaufspreis für Wasserstoff.<sup>232</sup> Das Potenzial zur Herstellung liegt hierbei aufgrund der geographischen Bedingungen für die Energieerzeugung durch Wind und Sonne in Nordafrika höher als in Deutschland.<sup>233</sup> Energieimporte haben somit auch in einem dekarbonisierten Energiesystem eine Daseinsberechtigung.<sup>234</sup> Ein Einzelkämpfertum hingegen hemmt die Branchendurchdringung aufgrund der geringeren Möglichkeiten.

Bei der Produktion von Komponenten in Deutschland hingegen verhält es sich anders. Beim Einzelkämpfertum wird angenommen, dass die Produktion von Komponenten eher in Deutschland stattfindet, als im Ausland. Die Bedarfe sind zwar hier geringer, aber es kann sich eine nationale Komponentenproduktion in verschiedenem Ausmaß entlang der Wertschöpfungskette bilden. Die Bedarfe an Teiltechnologien hingegen werden national und international befriedigt. Der Einfluss von Kooperationen hemmt die Technologieführerschaft von Deutschland im internationalen Kontext, da hierbei Ressourcen verteilt werden.

Der technologische Fortschritt hingegen wird auf Basis der internationalen Kooperationen positiv beeinflusst. Die disruptive Ausprägung wird dabei von internationalen Kooperationen gefördert und die stetige Steigerung von europäischen Kooperationen. Das Einzelkämpfertum hemmt den technologischen Fortschritt nicht, aber fördert ihn nur minimal.

Internationale Kooperationen können die Energiewende aufgrund der größeren Ressourcenverfügbarkeit deutlich vereinfachen. Aufgrund der benötigten Ressourcen zur Umsetzung hemmen die Kooperationen die konträre Ausrichtung, fördern aber die Orientierung der Politik pro Wasserstoff, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung,

---

<sup>232</sup> Vgl. IW, Synthetische Kraftstoffe, 2021, S.37.

<sup>233</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Gestehungskosten von PtX-Produkten, 2019, S.4.

<sup>234</sup> Vgl. IW, frontier economics, Synthetische Energieträger, 2018, S.66.

Speicherung und Verteilung von Wasserstoff haben. Das Einzelkämpfertum hemmt dabei diese Haltung der Politik, da weniger Ressourcen zur Verfügung stehen und Deutschland alles national anpassen muss.

Bei internationalen Kooperationen steigen die öffentlichen Fördermittel in erster Linie. So hat die EU im neuen Forschungsprogramm Horizon Europe ab dem 01.01.2021 eine neue jährliche Fördersumme in Höhe von ca. 10,7 Mrd. Euro beschlossen.<sup>235</sup> Damit ist es das weltweit größte Forschungsprogramm. Deutschland selbst hatte in 2017 Forschungsausgaben von ca. 16,6 Mrd. Euro. Je nach Einsatzgebiet können sie einen entscheidenden Unterschied in den benötigten Forschungsausgaben machen. Im Rahmen von internationalen Kooperationen könnten ähnliche Forschungsprogramme Ressourcen kombinieren und steigende Budgets in der Forschung für Wasserstoff bedingen.

Der Einfluss der internationalen Kooperationen kann die Entwicklung von Wasserstoff und daher auch die gesellschaftliche Meinungsbildung klar beeinflussen. 90% der Befragten im Nachhaltigkeitsbarometer 2018 unterstützen die Energiewende, aber nur 53% finden, dass sie gut umgesetzt wird.<sup>236</sup> Demnach sind 47% der Befragten der Meinung, dass eine mangelhafte Umsetzung der Energiewende vorliegt. Hierbei können internationale Kooperationen, in und außerhalb Europas, unterstützen. Im Rahmen der Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Kooperationen erfolgreich verlaufen und demnach eine positive Auswirkung auf die Gesellschaft haben. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Gesellschaft grünen Wasserstoff aufgrund des Nachhaltigkeitsaspekts bevorzugt. Der Einfluss des Einzelkämpfertums ist hierbei differenziert zu betrachten. Es entstehen zwar Arbeitsplätze in Deutschland und die Erzeugung ist auf grüner Basis und demnach nachhaltig geplant, dennoch ist die Herausforderung für das Land und seine Bürger sehr groß. In der Einzelkämpfervariante wird daher davon ausgegangen, dass der Einfluss auf eine gesplante Gesellschaft größer ist, als auf eine pro Wasserstoff orientierte Gesellschaft.

#### **4.2.9 Einflüsse des Faktors Stör- und Extremereignisse**

Der Faktor Stör- und Extremereignisse wurde für die Diskontinuität und Dynamik innerhalb der Szenarien genutzt.<sup>237</sup> Demnach beeinflusst der Faktor sehr stark alle anderen

---

<sup>235</sup> Vgl. BDI, Forschung und Innovation, o.J., o.S.

<sup>236</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Europäische Ansätze, 2020, S.8.

<sup>237</sup> Vgl. IZT, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008, S.26.

Faktoren, wird aber selber nicht beeinflusst. Hervorzuheben ist, dass die Entwicklungen meist extreme Ausprägungen haben und die Ereignisse übergeordnet stattfinden. Dies gilt insbesondere für die förderlichen Ereignisse, wie z.B. Umweltkatastrophen. Diese finden unabhängig statt und haben extreme Auswirkungen. Der Klimawandel wird den Menschen hierbei visuell bewusst. Die förderlichen Ereignisse bieten dabei über alle Faktoren hinweg positive Einflüsse insbesondere auf die positiven Ausprägungen der anderen Faktoren. Dies bedeutet, dass die förderlichen Ereignisse in erster Linie das Wachstum hin zur Wasserstoffwirtschaft unterstützen und wenn mit extremer Ausprägung. Dies hat den Hintergrund, dass die förderlichen Ereignisse dahingehend geprägt sind, dass sie Menschen vereinen und die Notwendigkeit der Maßnahmen gegen den Klimawandel widerspiegeln. Eine Stagnation hingegen wird durch die förderlichen Ereignisse gehemmt. Dies gilt insbesondere für Faktor zwei bis zehn. Bei Faktor eins hingegen bilden förderliche Ereignisse für alle drei Ausprägungen fördernde Einflüsse. Neutrale Ereignisse hingegen bilden die Verbindung zwischen den beiden Extremen. Hierbei finden keine Einflüsse auf keinen der Faktoren statt. Der Status Quo zum Klimawandel wird dabei eingehalten. Demnach bilden sich keine Einflüsse in positive oder negative Richtung. Konträre Ereignisse hingegen sind komplexer und beeinflussen die Faktoren unterschiedlicher. Sie bilden das Gegenstück zu den förderlichen Ereignissen.

#### **4.2.10 Einflüsse des Faktors Gesellschaftlicher Konsens**

Innerhalb der Betrachtung der Beeinflussung des Gesellschaftlichen Konsenses auf die anderen Faktoren stehen insbesondere die gesellschaftlichen Wertevorstellung und demnach auch die Einstellung zum Klimawandel und der Energiewende im Vordergrund.<sup>238</sup> Die Aufklärung der Bevölkerung ist dabei ein entscheidender Faktor zur Beeinflussung der öffentlichen Meinung zu jedweder Ausprägung der Energiewende.<sup>239</sup> Bei der Beeinflussung von Faktor zehn auf Faktor eins ist wichtig, ob die Gesellschaft in einem Markthochlauf blauen Wasserstoff akzeptiert oder nicht.<sup>240</sup> Die Auswirkungen der gesellschaftlichen Meinungen sind generell hoch, wobei die Akzeptanz sich, auf Basis der hohen Akzeptanz der Energiewende, vermutlich eher Richtung grünem Wasserstoff

---

<sup>238</sup> Vgl. BDEW, EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, 2020, S.4.

<sup>239</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Europäische Ansätze, 2020, S.8.

<sup>240</sup> Vgl. BMWi, Dialogprozess Gas 2030, 2019, S.8.

manifestieren wird.<sup>241</sup> Im Rahmen der Analyse wirkt die Beeinflussung daher bei allen Faktoren hoch. Frontier economics et al. konstatiert, dass der Einfluss der gesellschaftlichen Akzeptanz die Energiewende verhindern kann.<sup>242</sup> Die Nutzung von nachhaltigem Gas kann hierbei einen Lösungsansatz bieten.

Bei dem Ausbau von erneuerbaren Energien bestehen Ähnlichkeiten. Eine informierte Gesellschaft hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Ausbau der erneuerbaren Energien. Eine überwiegend pro Wasserstoff orientierte Gesellschaft wird mit hoher Wahrscheinlichkeit den Ausbau von erneuerbaren Energien fördern. Gegenteilig steht hierzu die konträre Ausrichtung, die den Ausbau im Jahr 2020 zu einem Mindestmaß gedrängt hat. Der allgemeine Anteil der Erneuerbaren am Bruttostromverbrauch ist auf ein Hoch in 2020 gestiegen, aber der Ausbau für das Jahr 2020 am Beispiel der Onshore-Windenergie war auf einem sehr niedrigen Niveau.<sup>243</sup> Die Akzeptanz der Gesellschaft ist insbesondere für den Ausbau der Windenergie an Land entscheidend.<sup>244</sup>

Innerhalb der Branchendurchdringung und der Produktion von Wasserstoffkomponenten in Deutschland kann der gesellschaftliche Konsens einen direkten Einfluss ausüben. Innerhalb der Arbeit wird die Annahme getroffen, dass Bürger, welche Richtung Wasserstoff orientiert sind, sich weiter mit der Thematik auseinandersetzen. Sie fördern wissenschaftliche Publikationen hierzu und treten im Allgemeinen für die Energiewende und die Dekarbonisierung durch Wasserstoff ein. Dadurch entsteht der Schluss, dass ebenjene Menschen gewillter sind, in der Branche zu arbeiten, insbesondere als Fachkraft. Bei einer Orientierung pro Wasserstoff der Gesellschaft würde demnach ein Fachkräftemangel geschwächt werden oder eventuell sogar ganz ausbleiben. Bei einer Übereinstimmung der Wertvorstellung der Gesellschaft mit der Vision einer Wasserstoffwirtschaft wäre auch eine hohe intrinsische Motivation der Arbeitnehmer vorhanden. Die Wertevorstellung ist weiterhin entscheidend für das Konsumverhalten der Bürger. Bei einer positiven Orientierung würde Wasserstoffprodukte eher gekauft und in den Alltag integriert werden, z.B. in Form von Brennstoffzellenfahrzeugen. Eine konträre Ausrichtung hingegen würde eher Boykotte fördern.

---

<sup>241</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Europäische Ansätze, 2020, S.8.

<sup>242</sup> Vgl. frontier economics et al., Wert der Gasinfrastruktur, 2017, S.52.

<sup>243</sup> Vgl. UBA, Erneuerbare Energien in Deutschland, 2021, S.6; Ebd. S.9; Statista, Dossier Energiewende in Deutschland, 2021, S.18.

<sup>244</sup> Vgl. Prognos AG, Kosten und Transformationspfade, 2020, S.11.

Für die Auswirkungen auf den technologischen Fortschritt und die politische Ausrichtung ist der gesellschaftliche Konsens ebenso relevant. Bei einer positiven Ausprägung beschäftigen sich die Menschen mehr mit Wasserstoff und unterstützen jene, die den Wandel hin zu Wasserstoff vorantreiben. Beispielhaft können bei dem technologischem Fortschritt Arbeitsplätze innerhalb der Forschung entstehen oder die Gesellschaft kann Richtung Wasserstoff orientierte politische Parteien wählen.

Im weiteren Sinn kann die Gesellschaft die politische Ausrichtung auch durch Demonstrationen, Boykotte oder Streiks erwirken. Da die öffentlichen Fördermittel durch die Politik budgetiert werden und diese auf dem gesellschaftlichen Konsens beruht, ist der Einfluss klar vorhanden. Wasserstoff-Kooperationen werden von der Politik organisiert. Bei einer konträren Haltung wird angenommen, dass Wasserstoff im Allgemeinen, unabhängig von der Kooperationsform, abgelehnt wird.

Der Einfluss der Gesellschaft auf den Einbezug von internationalen Kooperationen ist stark wertabhängig. Wenn sich die gesellschaftliche Meinung für Wasserstoff orientiert beispielsweise in Verbindung mit einer nachhaltigen Zukunft, werden internationale Kooperationen mit grüner Wasserstoffversorgung deutlich gefördert. Bei einem Einbezug von europäischen Kooperationen, welche auf blauem Wasserstoff basieren, könnte eine nachhaltig orientierte Gesellschaft anders reagieren. Möglicherweise könnten Streiks, Boykotte oder eine zukünftige politische Umorientierung die Folge sein. Grundlagenproblem der Energiewende ist es, die Gesellschaft miteinzubeziehen.<sup>245</sup> Im Rahmen der Arbeit wird von einer nachhaltig orientierten Gesellschaft ausgegangen, die insbesondere grünen Wasserstoff und die daraus resultierenden Kooperationen unterstützt.

In Anhang 15 können die einzelnen Bestimmungen der Wechselwirkungen eingesehen werden.

## **5 Analyse der entstandenen Szenarien**

### **5.1 Aktiv-Passiv-Summen Diagramm**

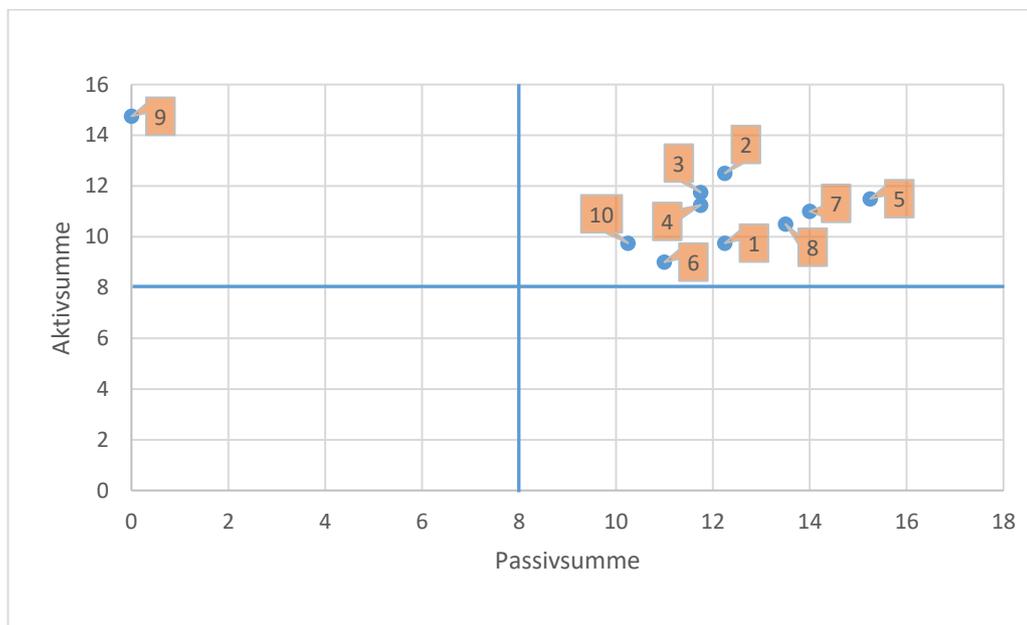
Innerhalb der Szenarien beeinflussen nicht alle Schlüsselfaktoren in gleichem Maße. Dies ist eine Besonderheit der Szenario-Entwicklung mit der CIB. Bedingt durch die einzelnen Wechselwirkungen der Schlüsselfaktoren untereinander bilden sich Faktoren, die

---

<sup>245</sup> Vgl. Energieagentur.NRW, Europäische Ansätze, 2020, S.8.

- stärker beeinflussen als beeinflusst werden -  $>8$  in Aktivsumme und  $8 >$  in Passivsumme
- die in ähnlichem Maß beeinflussen und beeinflusst werden -  $>8$  in Aktiv- und Passivsumme haben
- und welche die eher beeinflusst werden -  $<8$  in Aktivsumme und  $>8$  in Passivsumme.

**Abbildung 3: Aktiv-Passiv-Summen Diagramm der Schlüsselfaktoren**



Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Anhang 14

Jede Zahl versinnbildlicht hierbei den jeweiligen Faktor.<sup>246</sup> Hervorzuheben ist hierbei Faktor neun, der bewusst entwickelt wurde, damit er rein beeinflusst und nicht beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu werden die anderen Faktoren beeinflusst und beeinflussen selber in ähnlichem Verhältnis. Unterschiedlich ist jeweils die Aktiv- und Passivsumme. Weiterhin ist festzuhalten, dass sich bis auf Faktor neun keiner der Faktoren als dominante Einflussquelle herausstellt. Es sind alles relevante Faktoren, bei denen die Wechselwirkungen im System klar zusammenspielen.

Grundsätzlich sind alle Faktoren, bis auf Faktor neun, im Quadranten oben rechts eingeordnet. Demnach beeinflussen sie, werden aber auch in ähnlichem Maß beeinflusst.

<sup>246</sup> Siehe Anhang 6: Deskriptoren und ihre Ausprägungen; Siehe Anhang 14: Aktiv-Passiv-Summen-Diagramm Daten.

Faktor sechs und Faktor zehn beeinflussen dabei am wenigsten, werden aber auch am wenigsten beeinflusst. Faktor zwei hat am meisten Auswirkung auf andere Faktoren und wird mittelmäßig beeinflusst. Faktor fünf wird am meisten beeinflusst, beeinflusst aber nicht am meisten. Letztlich sind alle Deskriptoren systemrelevant und müssen demnach im Einzelnen betrachtet werden.

## 5.2 Gegenüberstellung der Szenarien

Die gebildeten Szenarien und deren Wirkungssummen sind in Anhang 11 einsehbar. Die Tableauform aus dem ScenarioWizard ist in Anhang 12 und 13 einsehbar. Im folgenden Diagramm werden diese Einzelansichten kombiniert.

**Abbildung 4: Detailansicht der entstandenen Szenarien**

Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Konsistenzwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wirkungstotale	168	167	142	141	115	114	56	63	70	77	86	93
<b>Grundlegende Ausrichtung des Szenarios</b>	<b>Erfolg der Wasserstoffwirtschaft</b>						<b>Scheitern der Wasserstoffwirtschaft</b>					
Faktor 1 Wasserstoffausprägung	Grün dominant						Blau dominant					
Faktor 2 Ausbau Erneuerbare Energien	Übermäßiges Wachstum						Stagnation des Ausbaus					
Faktor 3 Branchendurchdringung	Starke Branchendurchdringung						Schwache Branchendurchdringung					
Faktor 4 Produktion Wasserstofftechnologien	Technologieführerschaft in der gesamten Wertschöpfungskette						Nischenanteile					
Faktor 5 Technologischer Fortschritt	Disruptiv	Stetige Steigerung	Disruptiv	Stetige Steigerung	Disruptiv	Stetige Steigerung	Stagnation					
Faktor 6 Politisch strategische Ausrichtung	Pro						Kontra					
Faktor 7 Öffentliche Fördermittel	Steigendes Niveau						Sinkendes Niveau					
Faktor 8 Wasserstoffkooperationen	Internationale Kooperationen						Europäische Kooperationen	Internationale Kooperationen	Europäische Kooperationen	Internationale Kooperationen	Europäische Kooperationen	Europäische Kooperationen
Faktor 9 Stör- und Extremereignisse	Förderliche Ereignisse		Neutrale Ereignisse		Konträre Ereignisse		Förderliche Ereignisse		Neutrale Ereignisse		Konträre Ereignisse	
Faktor 10 Gesellschaftlicher Konsens	Überwiegend Pro Wasserstoff						Konträre oder gespaltene Haltung					

Quelle: Eigene Darstellung

In der ersten Auswertung des ScenarioWizard wird der Konsistenzwert und die Wirkungstotale jedes Szenario aufgezeigt.<sup>247</sup> Die eigentliche Tableauform schafft dabei eine visuelle Übersichtlichkeit aller Szenarien ohne jegliche Werte. Hierbei werden nur die Einzelausprägungen der Schlüsselfaktoren genannt. Innerhalb der Auswertung ist es zum Vergleich der Szenarien durchaus sinnvoll, die Szenarien und die einzelnen Parameter in einen visuellen und kalkulatorischen Vergleich zu stellen. Erkennbar ist, dass die Szenarien alle den gleichen Konsistenzwert null haben. Somit sind keine einzelnen logischen Inkonsistenzen sichtbar und die Szenarien sind in sich konsistent. Da sich die Konsistenzwerte nicht unterscheiden, muss die Wirkungstotale verglichen werden. Die

<sup>247</sup> Siehe Anhang 11: Anhang 11: Gebildete Szenarien mit dem ScenarioWizard.

Wirkungstotale ist bei Szenario eins bis sechs von 114 bis 168 angesiedelt, wobei die Szenarien immer Pärchen bilden. Somit haben Szenario eins und zwei, drei und vier und fünf und sechs jeweils sehr ähnliche Wirkungstotalen. Bei Szenario sieben bis zwölf ist die etwas unterschiedlicher. Generell ist die Wirkungstotale bei diesen Szenarien zwischen 56 und 93 und somit deutlich niedriger angesiedelt. Somit ist erkennbar, dass die Szenarien nicht so robust auf Veränderungen reagieren wie die ersten sechs Szenarien. In der Darstellung wurde ebenfalls die ungefähre Ausrichtung des Szenarios miteinbezogen. Sieben von zehn Schlüsselfaktoren haben pro Ausrichtung die gleiche Ausprägung. Aufgrund dieser relativ extremen Unterscheidung der entstandenen Szenarien wurde entweder der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft oder das Scheitern der Wasserstoffwirtschaft erkannt.

Generell muss hierbei festgehalten werden, dass der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft hierbei an folgenden Punkten festgelegt wird:

- Grüner Wasserstoff setzt sich durch und demnach entsteht der geringste Anteil an CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Die erneuerbare Energieerzeugung wächst überdurchschnittlich.
- Wasserstoff verteilt sich als Substitut für fossile Energieträger über alle Branchen hinweg in hohem Maß.
- Deutschland wird Technologieführer im Bereich der Wasserstoffkomponenten über die gesamte Wertschöpfungskette.
- Gesellschaft und Politik bekennen sich zum Wasserstoff als Nachfolge der fossilen Energieträger.

Demnach werden weniger Emissionen verursacht und die Stakeholder aus Industrie, Politik und Gesellschaft nehmen gemeinsam und geschlossen am Wandel teil. Dies schafft die Grundlage für den langfristigen Erfolg der Wasserstoffwirtschaft.

Das Scheitern der Wasserstoffwirtschaft ist dabei gegensätzlich zum Erfolg und wird an den folgenden Grundlagen festgemacht:

- Die Wasserstoffvarianten mit den höchsten Emissionen ist dominant.
- Der Ausbau der erneuerbaren Energien stagniert.
- Wasserstoff etabliert sich nicht über alle Branchen und wenn nur schwach. Fossile Energieträger bleiben somit vorherrschend.
- Es entsteht keine deutsche Produktionslandschaft von Wasserstoffkomponenten.

- Politik und Gesellschaft sind konträr oder gespalten in der Meinungsausrichtung bei Wasserstoff als neuem Energieträger.

Die Szenarien lassen sich daher in zwei ungefähre Ausrichtungen trennen. Auf der linken Seite der Abbildung entstehen Szenarien eins bis sechs, welche eine eher positivere Orientierung haben. Acht der zehn Schlüsselfaktoren haben die gleiche Ausprägung als Grundlage. Unterschiedliche Schlüsselfaktoren sind der technologische Fortschritt und die Stör- und Extremereignisse. Hierbei wird grüner Wasserstoff fokussiert. Es entsteht eine starke Branchendurchdringung und die Gesellschaft und Politik orientieren sich Richtung Wasserstoff. Diese Szenarien werden mit Erfolg der Wasserstoffwirtschaft betitelt. In diesen Szenarien wird die Energiewende in Verbindung mit Wasserstoff wahrscheinlicher.

### **5.3 Der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft**

Folgende Ausprägungen zeigen sich in Szenarien, die einen Erfolg der Wasserstoffwirtschaft widerspiegeln:

1. Grüner Wasserstoff dominiert
2. Überdurchschnittliches Wachstum der erneuerbaren Energien
3. Starke Branchendurchdringung von Wasserstoff
4. Technologieführerschaft in der gesamten Wertschöpfungskette
5. Disruptiv / Stetige Steigerung des technologischen Fortschritts
6. Pro Wasserstoff orientierte Politik
7. Steigendes Niveau der öffentlichen Fördermittel
8. Internationale Kooperationen
9. Förderliche, neutrale oder konträre Ereignisse
10. Überwiegend pro Wasserstoff orientierte Gesellschaft

Grüner Wasserstoff ist die vorherrschende Wasserstofffarbe im Markt und kann, aufgrund des überdurchschnittlichen Ausbaus an erneuerbaren Energien, auch in ausreichendem Maß hergestellt werden. Wasserstoff hat sich im weiteren Rahmen als Substitut für fossile Brennstoffe, wie z.B. Erdgas, in den verarbeitenden Branchen etabliert. In diesem Verlauf hat sich eine Produktion von Wasserstoffkomponenten und -technologien in Deutschland entwickelt. Diese Branche hat sich insofern durchgesetzt, als dass deutsche Unternehmen Technologieführer über die gesamte Wertschöpfungskette von

Wasserstoffkomponenten sind. Der Erfolg der Wasserstoffwirtschaft beruht dabei auf technologischem Fortschritt. In keinem der positiveren Szenarien bildet sich die Stagnation der Technologie aus. Somit kann festgehalten werden, dass ein Erfolg der Wasserstoffwirtschaft auf technologischer Innovation, disruptiv oder stetig, beruht. Die politisch strategische Ausrichtung ist über die ersten sechs Szenarien pro Wasserstoff orientiert. Eine politische Grundlage ist demnach ebenfalls klar vorhanden und es reicht nicht aus, sich nur neutral zu Wasserstoff zu orientieren. Dies versinnbildlicht sich auch in den steigenden Fördermitteln, die als Basis auf der strategisch politischen Ausrichtung beruhen. Weiterhin zeigt sich in keinem der Szenarios eine Orientierung als Einzelkämpfer-Ausprägung. Das bedeutet, dass Deutschland den Wandel hin zur funktionierenden Wasserstoffwirtschaft nicht allein schaffen kann und internationale Handelskooperationen relevant sind. Es reicht dabei nicht aus, sich rein europäisch zu orientieren. Allerdings muss auch festgehalten werden, dass neun der zwölf Szenarien eine internationale Kooperation enthalten und drei der neun Szenarien ein Scheitern der weitläufigen Wasserstoffwirtschaft beinhalten. Somit ist ein Erfolg der Wasserstoffwirtschaft mit internationalen Kooperationen wahrscheinlicher, aber muss nicht zwangsläufig erfolgen. Die sechs Szenarien, welche einen Erfolg erzeugen, haben aber grundsätzlich eine deutliche höhere Wirkungstotalität als die unerfolgreichen Szenarien. Die Stör- und Extremereignisse teilen sich in die einzelnen Szenariopaare:

- Förderliche Ereignisse – Szenarien eins und zwei; Szenarien sieben und acht
- Neutrale Ereignisse - Szenarien drei und vier; Szenarien neun und zehn
- Konträre Ereignisse - Szenarien fünf und sechs; Szenarien elf und zwölf

Dieser Faktor bildet eine Sondersituation. Grundlegend war der Faktor geplant, um eine äußere, unabhängige Dynamik in die Szenarioentwicklung zu integrieren. Da der Faktor nicht beeinflusst wird oder nur durch sehr große und langwierige Orientierung für oder gegen fossile Brennstoffe, erhält er im Rahmen der CIB keine Beeinflussung und beeinflusst nur selber. Im Vorhinein der Szenariobildung und CIB-Erstellung war die Vermutung, dass förderliche Ereignisse mit einer emissionsfreien oder -armen Versorgung von Wasserstoff korrelieren. Somit würden diese eher mit grüner Erzeugung von Wasserstoff, dem überdurchschnittlichen Ausbau von erneuerbaren Energien etc. verbunden werden. In den Szenarien sind sogar jene robust, in denen die Ausprägungen gegen die äußerliche, unabhängige, dynamische Entwicklung verlaufen. Es kommt eine klare Unterscheidung

der Szenarien in der Wirkungstotale zustande. Hierbei entsteht genau die Entwicklung, die im Vorhinein vermutet wurde. Förderliche Ereignisse führen eher zum Erfolg der Wasserstoffwirtschaft und konträre gegen ihn bzw. sind robuster gegen Änderungen. Zuletzt ist der gesellschaftliche Konsens klar orientiert. Hier wird, ähnlich wie beim politischen Faktor, klar, dass eine neutrale Orientierung nicht ausreicht. Somit muss die gesellschaftliche Akzeptanz für einen Wasserstoffausbau vorhanden sein, um einen Erfolg sicherzustellen.

Zusammengefasst sind somit die optimalsten Szenarien, in Bezug auf die Wirkungstotale, Szenario eins und zwei. Diese Szenarien sind am robustesten gegenüber äußerlichen Änderungen. Die Unterscheidung erfolgt hierbei nur durch den Faktor Technologischer Fortschritt, welcher disruptiv oder stetig steigend ist.

#### **5.4 Das Scheitern der Wasserstoffwirtschaft**

Die Ausprägungen sind:

1. Blauer Wasserstoff dominiert
2. Stagnation des Ausbaus der erneuerbaren Energien
3. Schwache Branchendurchdringung von Wasserstoff
4. Nischenanteile in der deutschen Produktion von Wasserstoffkomponenten
5. Stagnation des technologischen Fortschritts
6. Politik orientiert sich kontra Wasserstoff
7. Sinkendes Niveau der öffentlichen Fördermittel
8. Internationale oder europäische Kooperationen
9. Förderliche, neutrale oder konträre Ereignisse
10. Konträre oder gesplante Gesellschaft

Innerhalb der zweiten Szenarioausrichtung, dem Scheitern der Wasserstoffwirtschaft, entstehen die Ausprägungen eher gegensätzlich. Hierbei dominiert die blaue Wasserstoffvariante, welche im Rahmen der Arbeit den höchsten Emissionsausstoß hat. Vorherrschend ist eine Stagnation des Ausbaus im Bereich der erneuerbaren Energien. Diese beiden Ausprägungen erschweren oder verhindern eine Energiewende. Das zukünftige Energiesystem muss zu einem großen Teil auf erneuerbaren Energien beruhen, um Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Dies bedeutet ebenfalls, dass die Ziele zum Ausbau der erneuerbaren Energien nicht erreicht wurden. In Verbindung mit diesen Ausprägungen entsteht

eine schwache Branchendurchdringung von Wasserstoff. Somit werden die fossilen Brennstoffe und insbesondere Erdgas weiter genutzt und Wasserstoff wird nicht als Substitut angesehen. Gleichzeitig bildet sich eine deutsche Produktion von Wasserstoffkomponenten nur in Nischenanteilen. Technologische Innovationen bleiben in diesem Fall aus. Der technologische Fortschritt stagniert. Dies geht einher mit einer konträr orientierten Politikausrichtung, die sich gegen Wasserstoff stellt. Eine Wasserstoffentwicklung wird somit politisch erschwert. Anreize für Wasserstoff, wie z.B. Gesetze, Entbürokratisierung oder monetäre Gründungs- und Produktionsanreize, werden nicht eingeführt. Unter anderem sinken durch die mangelnde politische Orientierung die Fördergelder für Wasserstoff. Bei dem Faktor Wasserstoffkooperationen wird erkennbar, dass europäische Kooperationen nicht ausreichen, um zum Erfolg einer deutschen Wasserstoffwirtschaft zu führen. Das Einzelkämpfertum ist insbesondere in keinem Szenario vorgekommen. Somit müssen, wie bereits erwähnt, internationale Kooperationen entstehen, welche sich mit der Entwicklung, Distribution und Speicherung von Wasserstoff zielführend, lösungsorientiert und kurzfristig auseinandersetzen. Die Kurzfristigkeit liegt hierbei zunächst in der Bildung und Erstellung von Kooperations-Organisationen, welche die notwendige Entscheidungsmacht mit sich bringen, um den Wasserstoffwandel länderübergreifend starten zu können. Hierbei entsteht die gleiche Entwicklung im Rahmen der Störereignisse, wie bei dem Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft. Eine konträre Entwicklung der äußerlichen Ereignisse mit dem Scheitern der Wasserstoffwirtschaft hat eine höhere Wirkungstotalität als eine förderliche Entwicklung. Weiterhin ist die Gesellschaft hier konträr oder gespalten Richtung Wasserstoff orientiert. Dies bedeutet, dass entweder eine klare Anti-Haltung gegen den Wandel Richtung Wasserstoff besteht oder sich die Gesellschaft uneins ist, wodurch Entwicklungen hin zu Wasserstoff erschwert oder verzögert werden.

## **5.5 Chancen und Risiken**

Daraus ergeben sich verschiedene Chancen und Risiken für die Entwicklung der deutschen Wasserstoffwirtschaft. Relevant in der Analyse ist es, ebenfalls die Faktoren zu prüfen, welche sich nicht durchgesetzt haben in der Betrachtung.

Folgende Ausprägungen haben sich in keinem der Szenarien durchgesetzt:

**Tabelle 3: Faktorausprägungen inkonsistenter Szenarien**

No.	Faktor	Ausprägung inkonsistenter Szenarien
1	Wasserstoffausprägung	Türkis dominant
2	Ausbau erneuerbare Energie	Ausbau nach Plan
3	Branchendurchdringung	Moderate Branchendurchdringung
4	Produktion von Wasserstofftechnologien	Teiltechnologien
5	Technologischer Fortschritt	/
6	Politisch strategische Ausrichtung	Neutral
7	Öffentliche Fördermittel	Gleichbleibendes Niveau
8	Internationale Kooperationen	Einzelkämpfertum
9	Stör- und Extremereignisse	/
10	Gesellschaftlicher Konsens	Neutrale Haltung

Quelle: Eigene Darstellung

Besonders auffällig ist hierbei, dass sich die türkise Ausprägung nicht durchgesetzt hat. Die türkise Wasserstoffausrichtung hat viele Vorteile, wie z.B. die Herstellungskosten und die weitere Nutzbarkeit des entstandenen Kohlenstoffs. Aktuell befindet sich türkiser Wasserstoff noch auf Forschungsniveau. Mit einem entsprechenden technologischen Fortschritt zur Industriereife könnte aber eine vorteilhafte Erzeugungsvariante entstehen. Grundlage hierfür sind die öffentlichen Fördermittel und die gesellschaftliche, sowie politische Zustimmung. Auf dieser Basis könnte die Gewichtung hin zur türkisen Variante noch einmal angepasst werden. Dafür würde z.B. eine leichte Anpassung der Beeinflussungsparameter der anderen Faktoren, wie z.B. drei, fünf und sechs auf die türkise Ausrichtung ausreichen, um konsistente Szenarien zu erzeugen. Sollte die aktive Beeinflussung der türkisen Variante ebenfalls in gleichem Maß erhöht werden, ist türkiser Wasserstoff eine ernstzunehmende Alternative für die Zukunft, die mit viel Potenzial inne hat. Grundlegend ist diese Ansicht möglich, aber auch mit viel Unsicherheit verbunden. Das Verfahren und seine wirtschaftlichen und emissionstechnischen Konsequenzen sind aktuell nicht so stark erkennbar, wie z.B. bei grünem Wasserstoff. Türkiser Wasserstoff stellt somit eine mögliche Alternative dar, die aktuell von Akteuren im Markt noch nicht als solche erkannt wird. Mit der entsprechenden Forschung und Etablierung könnten hier zukünftig Chancen entstehen. Im Rahmen der Arbeit hat sich diese Variante auf Basis der zugrunde liegenden Literatur allerdings nicht durchgesetzt und wird daher nicht weiter betrachtet. Es wird die Empfehlung getroffen, türkisen Wasserstoff weiter zu erforschen und die mögliche Entwicklung zu analysieren.

Eine weitere Chance ist die disruptive Technologieentwicklung. Sie ist nicht erzwingbar, kann aber durch entsprechende Forschungsressourcen wahrscheinlicher werden. Die Ausprägung setzt sich bei der Hälfte der Szenarien mit Erfolg der Wasserstoffwirtschaft durch. Die Wirkungstotale ist mit 168, 142 und 115 dabei grundsätzlich sehr hoch und hat über die Gesamtverteilung bei Szenario eins sogar die höchste aller Szenarien. Somit besteht in ihr eine große Chance für den Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft. Weiterhin ist festzuhalten, dass sich die internationale Variante bei allen erfolgreichen Szenarien durchgesetzt hat, allerdings auch bei drei Szenarien mit dem Scheitern der Wasserstoffwirtschaft. Ein Erfolg muss demnach auf einer internationalen Kooperation basieren. Bei einem Erfolg kann darauf geschlossen werden, dass sich Wasserstoff international verbreiten wird. Diese Kooperationen breiten sich dabei über verschiedene Teilgebiete, wie z.B. die Forschung, die Distribution oder die Speicherung von Wasserstoff aus. Hierbei werden Synergieeffekte geschaffen, die über das gesamte Feld der erneuerbaren Energieversorgung und -verteilung entstehen. Wasserstoff bietet eine Möglichkeit fossile Brennstoffe, wie Erdgas oder Kohle, zu ersetzen. Die größte Chance ist es hierbei somit, Emissionen in großem Maß durch einen anderen Energieträger einzusparen. Dies funktioniert auch über die erfolgreichen Szenarien hinweg. Eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft entsteht immer im Zusammenhang von grünem Wasserstoff und einer starken Branchendurchdringung. Den Hintergrund dafür gibt zusätzlich ein überdurchschnittliches Wachstum der erneuerbaren Energien. Somit entsteht die Chance auf eine Minderung der Emissionsentwicklung über verschiedene Branchen hinweg in Verbindung mit einem wirtschaftlichen Wachstum.

Die Risiken ergeben sich insbesondere aus der gegenteiligen Entwicklung und den Szenarien sieben bis zwölf. Ein großes Risiko bzw. sogar eine Limitierung ist die Stagnation des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff, insbesondere ohne monetäre Anreize durch die Bundesregierung, ist abhängig von erneuerbarem Strom. Eine Stagnation, Verlangsamung des Ausbaus und sogar der Ausbau nach Plan, limitieren eine erfolgreiche und damit grüne Wasserstoffwirtschaft. Diesem Risiko muss dementsprechend entgegengewirkt werden.

Eine weitere Problematik besteht in der Technologieinnovation. Diese ist der zweite limitierende Faktor. Eine technologische Stagnation ist ähnlich wie der Ausbau der Erneuerbaren ein Risiko, welches dem Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft entgegensteht. Der

technologische Fortschritt ist in den Szenarien zum Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft, entweder disruptiv oder stetig steigend, vorhanden. In den scheiternden Szenarien allerdings nur mit einer Stagnation. Demnach besteht hier ein hohes Risiko. Im weiteren Verlauf könnte angenommen werden, dass Risiken durch die Stör- und Extremereignisse entstehen. Diese sind auch einflussreich. Dennoch setzt sich eine grüne Wasserstoffwirtschaft auch bei konträren Ereignissen durch. Hierbei entsteht sogar eine höhere Wirkungstotalität, als bei konträren Ereignissen und den Wandel gegen Wasserstoff.

Ein Risiko entsteht weiterhin in der gesellschaftlichen und politischen Überzeugung von Wandel hin zu Wasserstoff. Sowohl der gesellschaftliche Konsens, als auch der politische Konsens müssen von Wasserstoff überzeugt sein, damit kein Risiko entsteht, welches die Entwicklung hin zu einer Wasserstoffwirtschaft mindern kann.

## **6 Handlungsempfehlung**

Die Auswahl der Handlungsempfehlungen wird für verschiedene Parteien getroffen. Die Schlüsselfaktoren werden hauptsächlich durch drei Gruppen beeinflusst. Diese sind:

- Wirtschaft / Unternehmen
- Politik
- Gesellschaft

Ausprägungen, welche zu einem Erfolg der Wasserstoff führen könnten, liegt ein bestimmtes Verhalten der Akteure zu Grunde. Diese müssen hierbei einen klaren Einsatz für Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele zeigen und ihr Verhalten dementsprechend abändern. Moderate und neutrale Ausprägungen bzw. Verhalten haben sich in den Szenarien nicht durchgesetzt. Handlungsempfehlungen müssen daher eine gemeinsame Basis beinhalten. Die Maßnahmen müssen unverzüglich, schnell und umfangreich getroffen werden, um den Erfolg der Wasserstoffwirtschaft nicht zu gefährden. Dennoch gilt zu beachten, dass das Handeln durchdacht und langfristig geplant werden sollte. Die Umstellung ist aufwendig und komplex und wird sich daher über einen längeren Zeitraum entwickeln. Aktuell muss somit der Start im Markt, in der Politik und Gesellschaft erfolgen.

Die erste Ausprägung Dominanz von grünem Wasserstoff kann durch die Politik durch Anreizsysteme und Regelungen für die Wirtschaft beeinflusst werden. Generell könnten hierbei Gesetze und Schaffung eines politischen Grundrahmens für grünen Wasserstoff einen klaren Einfluss auf das Wachstum der Technologie haben. Hierbei sollte die

Gründung und Führung von Unternehmen für grünen Wasserstoff Vorrang vor anderen Varianten haben. Dabei muss die Elektrolyse nicht die einzige erfolgreiche Technologie sein. Es sollte auf Seiten von Wirtschaft und Politik Offenheit gegenüber anderen Verfahren herrschen, damit sich die sinnvollste und emissionsärmste Technologie durchsetzen kann. Nach aktuellem Stand und der Szenariobildung ist das die Elektrolyse. Wie bereits unter Kapitel 5.5 beschrieben, kann aber auch türkiser Wasserstoff seine Daseinsberechtigung unter den richtigen Bedingungen erhalten. Die Wirtschaft sollte ebenfalls grünen Wasserstoff als Fokus setzen, da zukünftig durchaus die Möglichkeit besteht, dass sich durch Nutzung von emissionsstarkem Wasserstoff, wie z.B. grauem oder blauem, Bepreisungen durch die Politik ergeben. Der Umstieg sollte daher möglichst zeitnah erfolgen.

Das überdurchschnittliche Wachstum von erneuerbaren Energien muss in einem Zusammenspiel von Wirtschaft, Politik und Gesellschaft organisiert werden. Grundsätzlich muss hierbei eine Vereinfachung der Standortauswahl und der zugrunde liegenden Ausschreibungen erfolgen. Die Wirtschaft muss hierbei möglichst den direkten Kontakt zur Politik suchen, um den überdurchschnittlichen Ausbau bestmöglich durchzuführen. Bürger- bzw. Kommunenbeteiligungen an den Windparks können hier ein Modell bilden, um den stagnierenden Ausbau wieder aufzunehmen und die Bürger mit in die Energiewende miteinzubeziehen.

Eine starke Branchendurchdringung von erneuerbarem Wasserstoff ist ein wichtiger Faktor in der Umsetzung der Wasserstoffwirtschaft. Wasserstoff muss dabei fossile Energieträger branchenübergreifend ersetzen. Relevant für diese Ausprägung ist die Schaffung von klaren Standards, Gesetzen und Anreizen im Markt. Die Wirtschaft hat hierbei die Aufgabe über die Branchen hinweg zu kommunizieren und Partnerschaften, z.B. in Form von Verbänden, zu bilden und zu vertiefen, die Wasserstoff als langfristigen Energieträger tiefgehend etablieren. Die Gesellschaft kann hierbei in Form von Fachkräften unterstützen, die den Wandel intrinsisch verfolgen und ihn mitgestalten.

Ähnliche Ansätze gelten bei der deutschen Technologieführerschaft in Form von Wasserstofftechnologien und -komponenten. Wasserstoff muss dabei als mehr als nur ein Trendprodukt behandelt werden. Es muss sich eine deutsche Produktionslandschaft etablieren, welche gemeinsame Standards einsetzt und in Deutschland einen Innovations- und Produktionsstandort von Wasserstofftechnologien aufbaut. Dabei reicht kein Fokus in

Teiltechnologien, sondern es muss eine Transformation hin zur Produktion von Wasserstofftechnologien über die gesamte Wertschöpfungskette entstehen. Hierbei können Gründungsinitiativen und -vereinfachungen eine Grundlage bilden. Der technologische Fortschritt steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Bildung des Innovationsstandorts Deutschland. Er wird grundsätzlich von Wirtschaft und Politik im Rahmen von privaten und öffentlichen Fördergeldern beeinflusst. Je mehr Menschen sich mit Erforschung der nachhaltigen Wasserstofftechnologie auseinandersetzen, desto wahrscheinlicher wird auch ein disruptiver Fortschritt. Wettbewerbe für Ideen, die Reallabore und Schaufenster der Energiewende können somit einen neuen Einblick geben und einen technologischen Fortschritt entstehen lassen.

Grundsätzlich gilt dabei eine positiv orientierte Ausrichtung der Politik als Basis. Die Politik muss sich eingehend und parteiübergreifend mit der Wasserstoffthematik auseinandersetzen und diese politisch fokussieren. Die Wirtschaft kann hierbei durch eine starke Lobby einen Einfluss auf die Politik ausüben. Aktuell besteht Wasserstoff bereits im Markt. Der Anteil muss sich noch erhöhen, aber die bestehenden Unternehmen können bereits eine Haltung gegenüber Politik bilden und Kontakte zur Politik entstehen lassen. Wirtschaft und Politik müssen innerhalb der Entwicklung gemeinsam für Wasserstoff einstehen und die notwendige Technologie vorantreiben. Dabei ist ein steigendes Niveau der Fördergelder unerlässlich für die Erforschung der Technologie. Programme, besonders zur Förderung von Wasserstoff als Energieträger, können hier einen entscheidenden Vorteil bilden.

Internationale Kooperationen sind für den Wandel ebenfalls notwendig. Zu beachten ist hierbei, dass die gemeinsamen Ressourcen möglichst fokussiert und effizient eingesetzt werden, um Mehrarbeit zu vermeiden und die Energiewende und den Wandel zu Wasserstoff international umzusetzen. Weiterhin kann die deutsche Wirtschaft hier durch den lokalen Aufbau von Anlagen vor Ort, z.B. in Nordafrika, direkte Hilfen schaffen, um Marktteilnehmer aufzubauen und langfristig zu binden. Generell sollte dabei eine politische Bürokratievereinfachung bestehen. Steuer- und Zollanreize können dabei einen entscheidenden Vorteil für die Wirtschaft bieten, sich international zu orientieren. Grundsätzlich muss dabei beachtet werden, den deutschen Wandel nicht ausschließlich aus Importen zu beziehen. Die Kooperationen können dabei für diverse Teilbereiche der Wertschöpfungskette entstehen. Insbesondere relevant, wie bereits im Schlüsselfaktor

erwähnt, sind die Entwicklung von Wasserstofftechnologien, die Speicherung und die Verteilung. Dabei können Kooperationen umfangreiche Synergieeffekte entstehen lassen, die einen Wandel auf nationaler Ebene vereinfachen und verkürzen.

Der Einfluss auf die Stör- und Extremereignisse ist nach Definition nicht gegeben. Dennoch besteht auch hier Handlungsbedarf in Form von allgemeiner Emissionseinsparung und nachhaltiger Energienutzung.

Abschließend sollte sich eine informierte und offene Gesellschaft bilden, die Wasserstoff als neuen Energieträger annimmt und den Wandel mitgestalten möchte. Die Bildung eines offenen politischen Diskurses ist grundlegend für die Meinungsbildung in der Gesellschaft. Unterstützend können hierbei Informationsprogramme für Bürger wirken. Die Gesellschaft sollte dabei in den Wandel miteinbezogen werden und nicht vor vollendete Tatsachen gestellt, um eine konträre Haltung zu vermeiden. Eine konträre oder gespaltene Gesellschaftsbildung sollte hierbei vermieden werden. Im Bestfall kann die Politik frühzeitig Bürger proaktiv in den Wandel miteinbeziehen. Offenheit und Transparenz sind dabei ein wichtiger Faktor. Eine gespaltene oder konträre Gesellschaft birgt sonst das Risiko den Wandel abzulehnen. Gesellschaftlich besteht dabei eine Informationsnotwendigkeit.

## **7 Kritische Reflexion und wissenschaftliche Weiterführung**

Vorteilhaft ist bei der CIB, dass sie verschiedene Sichtweisen in einem kohärenten System vereint. Die zunächst nicht klar definierten Wechselwirkungen in einem komplexen System können so aufgedeckt werden. Ebenfalls ist die Methodik nicht dazu gedacht, Werte nur anhand vergangener Entwicklungen weiterzuführen, sondern eine dynamische Entwicklung miteinzubringen. Grundsätzlich kann die CIB dabei sehr komplex werden, je mehr Schlüsselfaktoren und Ausprägungen benutzt werden. Ob dies direkt Vorteile bietet, ist nicht klar ersichtlich. Je größer die Matrix wird, desto unübersichtlicher ist sie und desto schwerer wird es eine größere Menge an Schlüsselfaktoren und den gleichen Grundbedingungen und -annahmen zu vereinen. Im Allgemeinen verbindet sie ebenfalls die Subjektivität derjenigen, die sie ausfüllen. Innerhalb der Nutzung der CIB wird immer eine Grundlage auf Basis von Subjektivität geschaffen. Diese kann nie ganz ausgeschlossen und nur möglichst minimiert werden. Die Subjektivität besteht entweder durch die

Experten selbst oder durch die Wahl der Literatur und die Nutzung oder Nichtnutzung der jeweiligen literarischen Argumentation.

Innerhalb der Arbeit wurde nur eine Methodik verwendet. Um weitere Untersuchungen durchzuführen, könnten noch andere Methodiken genutzt werden, um die Ergebnisse noch tiefergehend zu prüfen oder vor der Methodikuntersuchung bereits Faktoren zu identifizieren, die das Gesamtsystem weitestgehend beeinflussen. Ebenfalls wurde nur ein Szenariotyp genutzt. Hierbei lag die literarische Prüfung im Vordergrund. Weiterführend könnten die Ergebnisse der Literaturuntersuchung noch mit einem Expertengremium abgeglichen werden, um die Ergebnisse näher zu beleuchten. Ebenfalls wurden in der Methodik Grundannahmen an die Szenariogestaltung getroffen. Wasserstofffarben und deren Verwendung oder im Allgemeinen die Parameter der Methodik können hierbei auch anders ausgelegt werden. Die Werte wurden von -3 bis +3 definiert, könnten aber auch noch detaillierter oder in einem anderen Maßstab getroffen werden. Weiterhin ergeben sich mit dem ScenarioWizard auch noch weitere Optionen zur Gewichtung und Nutzung der Szenarien im Nachgang. Im Allgemeinen wurden die Annahmen an die Arbeit aus verschiedenen Gründen getroffen und durchgeführt. Eine größere Menge an Schlüsselfaktoren, eine weitere Nutzung von zusätzlichen Experteninterviews oder noch weitere nachfolgende Methodiken und Anpassungen könnten schnell über den Bearbeitungsrahmen einer Masterarbeit hinausgehen.

Die Szenarioanalyse ist ein probates Mittel, um mit Unsicherheiten in der Zukunft umzugehen. Dies ist im Rahmen der Arbeit gelungen. Allerdings können die Unsicherheiten nicht komplett minimiert werden. Weitere Methodiken könnten helfen, noch detailliertere Auswertungen zu erschließen. Im weiteren Verlauf könnten beispielsweise Werte, wie z.B. die Berechnung der Nachfrage, das Bevölkerungs- und Energiewachstum oder andere Einzelparameter im System genauer betrachtet werden, um das Gesamtsystem detaillierter zu gestalten.

## **8 Fazit**

In der Arbeit wurden zehn Schlüsselfaktoren erarbeitet, die die Transformation zur deutschen Wasserstoffwirtschaft maßgeblich beeinflussen. Die Szenarien haben aufgezeigt, unter welchem Zusammenspiel dieser Faktoren ein Erfolg oder ein Scheitern der Wasserstoffwirtschaft entstehen kann. Zur Beantwortung der Forschungsfrage kann festgehalten

werden, dass sich die konsistenten Szenarien in sechs erfolgreiche und sechs scheiternde Szenarien aufteilen, wobei die erfolgreichen eine höhere Robustheit aufweisen. Das optimalste Szenario bietet dabei Szenario eins, wobei Szenario zwei fast genauso robust und konsistent ist. Die Szenarien tendieren somit in zwei verschiedene Richtungen. Die Chancen und Risiken bilden sich anhand dieser Basis. Übergeordnet ist erkennbar, dass sich jede Ausprägung Richtung CO<sub>2</sub>-Neutralität orientieren muss, um einen Erfolg der Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen. So ist beispielsweise die grüne in den erfolgreichen und die blaue Wasserstoffausprägung in den scheiternden Szenarien durchgängig vertreten. Zu türkischem Wasserstoff kann aktuell noch keine klare Empfehlung ausgesprochen werden. Hierbei besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Der Wandel ist in jedem Fall zeitintensiv und bedarf umfangreicher Zusammenarbeit auf allen Ebenen von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Für die Einhaltung des 1,5°C-Ziels des Pariser Abkommens und die Transformation der Wasserstoffwirtschaft bis 2040 muss die Umsetzung zeitnah und systematisch erfolgen. Es war deutlich zu erkennen, dass eine moderate oder neutrale Haltung nicht ausreicht, um eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft zu gewährleisten und Wasserstoff als branchenübergreifendes Substitut für fossile Energieträger zu etablieren. Diese Herangehensweise wird ebenfalls beim überdurchschnittlichen Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig, welcher eine Limitierung für nachhaltigen Wasserstoff darstellt. Deutschland muss bei der Transformation eine Pionierrolle einnehmen. Dies muss über die Steigerung öffentlicher Fördermittel, eine politische Priorisierung und Bildung internationaler Kooperationen über den europäischen Raum hinaus erreicht werden. Weiterhin muss sich in Deutschland eine übergreifende Produktionslandschaft von Wasserstoffkomponenten und -technologien bilden, um den Wandel zu erreichen. Zusätzlich ist festzuhalten, dass technologisch noch Innovationsdruck besteht. Die Arbeit hat die Grundlage geschaffen richtungsweisende Zusammenhänge und Einflussfaktoren zu analysieren und zu identifizieren. Dabei konnte eine erste Handlungsempfehlung getroffen werden. Grundsätzlich sind die Energiewende und der Wandel hin zu Wasserstoff komplexe Thematiken und bedürfen noch tiefgreifenderer Forschung aus verschiedenen Betrachtungswinkeln. Diese Arbeit bildet dabei die Grundlage einer möglichen Entwicklung von verschiedenen Faktoren ab und kann als Basis für die weiterführende Erarbeitung der Thematik genutzt werden.

## Anhang

### Anhang 1: Übersicht öffentliche Fördermittel

Fördermittel des Bundes im Bereich Sektorkopplung und Wasserstoff nach Sektor in den Jahren 2018 und 2019 (in Millionen Euro)			
	2018	2019	2020
Grundlagenforschung	17,36	17,78	35,99
Brennstoffzellen	13,81	14,31	15,17
Wasserstoffspeicher und -transport	4,9	5,73	4,1
Power-To-X	1,06	1,33	1,35
Wasserstoffherzeugung	4,21	1,13	0,97
Systemische Ansätze	0,33	0,46	0,43
Sonstige	0,85	0,09	1,13
<b>Summe</b>	<b>42,52</b>	<b>40,83</b>	<b>59,14</b>

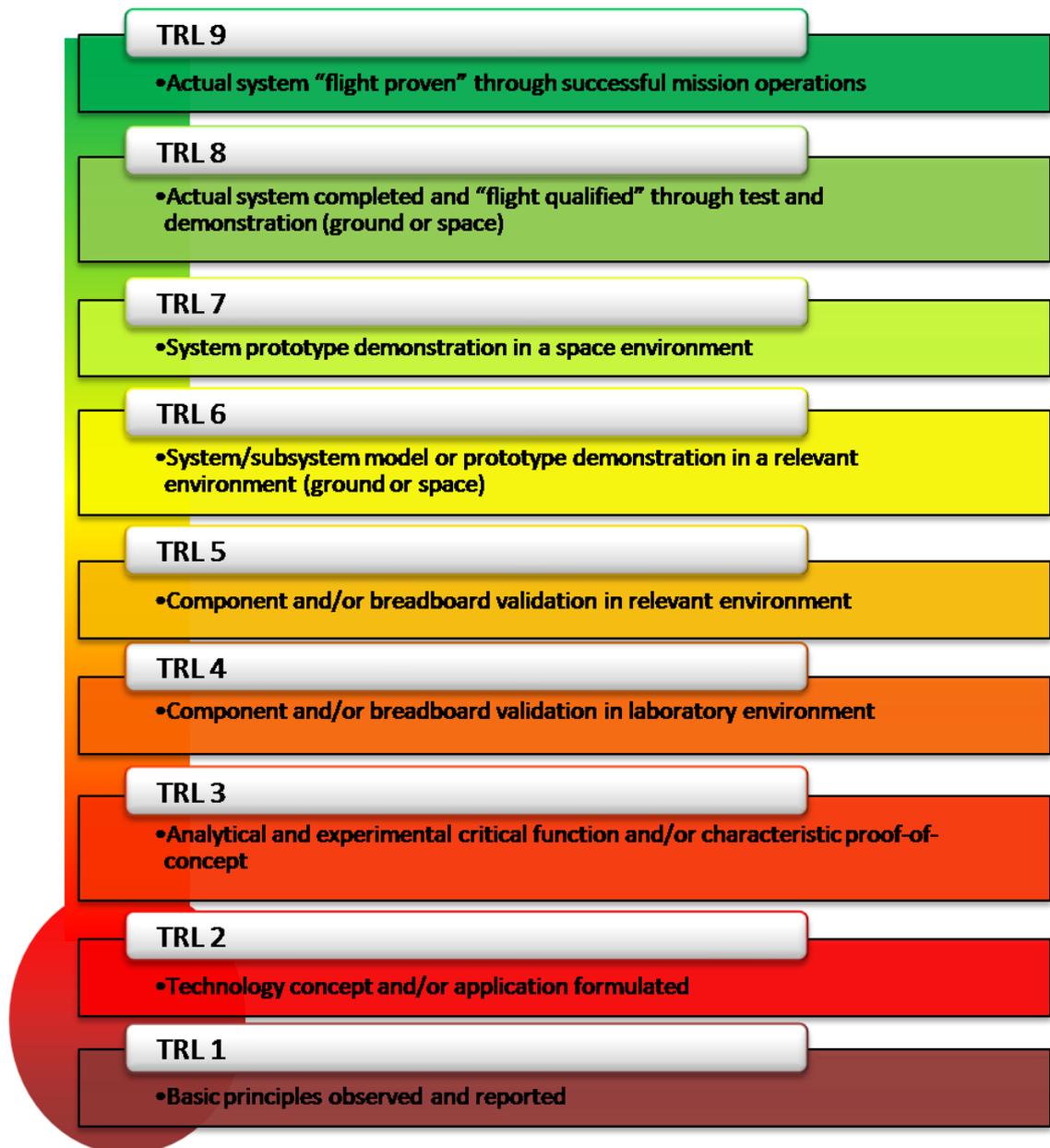
Quellen: Bundesbericht Energieforschung 2021 S.89

Gesamtwerte der vergangenen Jahre für Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien			
Jahr	Fördersumme in Mio.	Wachstum zum Vorjahr in %	
2012	20,33		
2013	30,85	51,75%	
2014	34,41	11,54%	
2015	30,35	-11,80%	
2016	25,77	-15,09%	
2017	43,95	70,55%	
2018	42,53	-3,23%	
2019	40,82	-4,02%	
2020	59,13	44,86%	
<b>Summe</b>	<b>328,14</b>		

Gesamte Fördermittel			
Quelle: Bildung und Forschung in Zahlen 2020 S.6			
Budget Forschung und Entwicklung	Budget in Mrd. Euro	Budget in Mio. Euro	Anteil F&E Summe oben Gesamt
2010	70	70000	
2015	88,8	88800	0,03418%
2016	92,2	92200	0,02795%
2017	99,6	99600	0,04413%
2018	104,8	104800	0,04058%

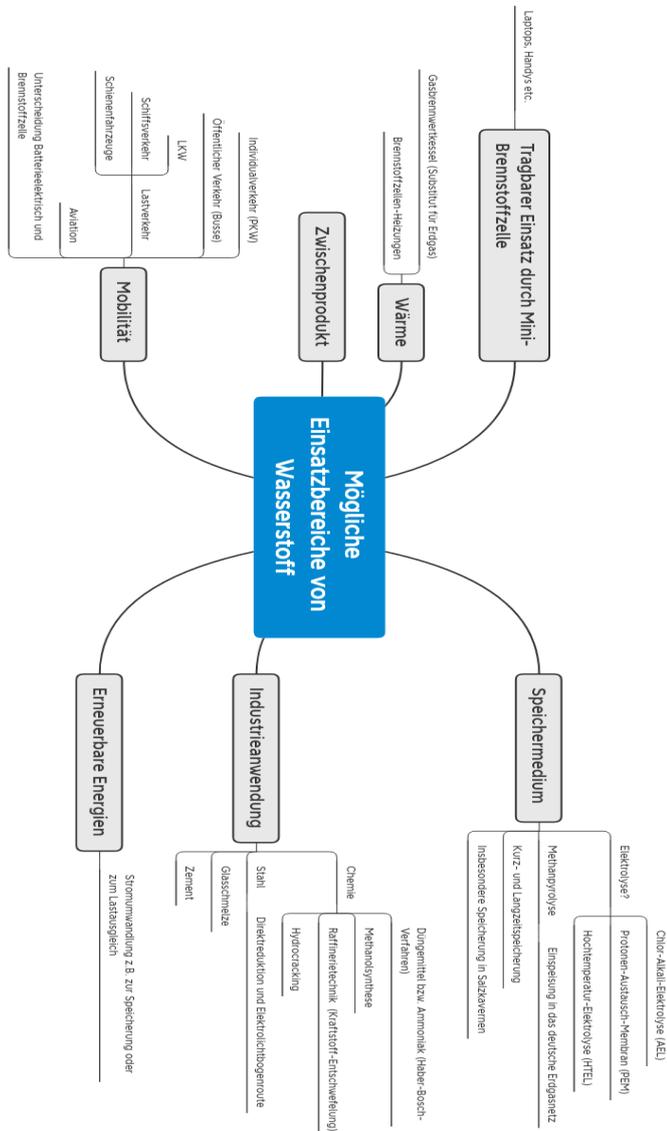
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BMBF, Bildung und Forschung, 2020, S.6; BMWi, Bundesbericht Energieforschung 2021, 2021, S.89.

## Anhang 2: Technology Readiness Level



Quelle: NASA, Technology Readiness Level, 2012, o.S.

### Anhang 3: Mögliche Einsatzbereiche von Wasserstoff



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an:

Agora Energiewende, Wuppertal Institut, Klimaneutrale Industrie, 2019, S.10ff.; Agora Verkehrswende et al., strombasierte synthetische Brennstoffe, 2018, S.11; Ebd. S.14; Ausfelder, Dr. F.; Dura, H., 1. Roadmap Power-to-X, 2018, S.126; Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, Wasserstoff-Roadmap, 2019, S.5f.; Ebd. S.18; Ebd. S.22ff.; Ebd. S.33f. Hydrogen Council, Hydrogen Insights, 2021, S. 2; Ebd. S.26f.; MWIDE, Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020, S.9; Ebd. S.48; Van Wijk, Prof. Dr. Ad, Chatzimarkakis, J., 2x40 GW Initiative, 2020, S.7.

## Anhang 4: Gegenüberstellung der Schlüsselfaktoren in Lang- und Kurzform

Langform:

Deskriptoren:	Variante [ 1 ]
1. Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland	Grün dominant
2. Ausbau und Einsatz von Erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor	Übermäßiges Wachstum
3. Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie	Starke Branchendurchdringung
4. Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten	Technologieführerschaft bei der gesamte Wertschöpfungskette
5. Technologischer Fortschritt	Disruptiver erfolgreicher Durchbruch
6. Politisch strategische Ausrichtung	Pro
7. Öffentliche Fördermittel	Steigendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021
8. Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung -speicherung und -verteilung	Internationale Kooperationen
9. Stör- und Extremereignisse	Förderliche Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens	Überwiegend Pro Wasserstoff

Variante [ 2 ]	Variante [ 3 ]
Blau dominant	Türkis dominant
Wachstum nach Plan	Stagnation des Ausbaus
Moderate Branchendurchdringung	Schwache Branchendurchdringung
Teiltechnologien	Nischenanteile
Stetige Steigerung	Stagnation
Neutral	Kontra
Gleichbleibendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021	Sinkendes Niveau der Fördermittel zur Entwicklung bis 2021
EU-Kooperationen	Einzelkämpfer
Neutrale Ereignisse	Konträre Ereignisse
Neutral Wasserstoff	Konträre oder gespaltene Haltung

Kurzform:

Deskriptoren:	Variante [ 1 ]	Variante [ 2 ]	Variante [ 3 ]
1. Energieeffizienz	Grün dom.	Blau dom.	Türkis dom.
2. Ausbau EE	Überdurchschnittlich	nach Plan	Stagnation
3. Branchenübergreifender	Stark	Moderat	Schwach
4. Produktion	Technologieführerschaft	Teiltech.	Nischenanteile
5. Technologischer	Disruptiv	Stetig	Stagnation
6. Politisch	Pro	Neutral	Kontra
7. Öffentliche	Steigendes Niveau	Gleichbleibendes Niveau	Sinkendes Niveau
8. Kooperationen	Int. Kooperationen	EU-Kooperation	Einzelkämpfer
9. Störereignisse	Förderlich	Neutral	Konträre
10. Gesellschaftlicher	Überwiegend Pro	Neutral	Konträr oder gespalten

Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

## Anhang 5: Vereinfachte CIB nach Weimer-Jehle

Cross-Impact Matrix "SomewhereLand"	A.Reg- ierung			B.Auß. politik			C.Wirts Leist.			D.W. Vert.		E.Soz. Zusam.			F.Ges. Werte		
	A1 patriotisch	A2 wirtschaftsor.	A3 sozial	B1 Kooperation	B2 Rivalität	B3 Konflikt	C1 sinkend	C2 stagnierend	C3 dynamisch	D1 ausgeglichen	D2 gr. Kontraste	E1 soz. Friede	E2 Spannungen	E3 Unruhen	F1 Leistung	F2 Solidarität	F3 Familie
<b>A. Regierung</b>																	
A1 "patriotisch"				-2	1	1	0	0	0	0	0	-2	1	1	0	0	0
A2 "wirtschaftsorientiert"				2	1	-3	-2	-1	3	-2	2	0	0	0	2	-1	-1
A3 "sozial"				0	0	0	0	2	-2	3	-3	2	-1	-1	-2	2	0
<b>B. Außenpolitik</b>																	
B1 Kooperation	0	0	0				-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B2 Rivalität	0	0	0				0	1	-1	0	0	1	0	-1	0	0	0
B3 Konflikt	3	-1	-2				3	0	-3	0	0	3	-1	-2	-2	1	1
<b>C. Wirtschaftsleistung</b>																	
C1 sinkend	2	1	-3	0	0	0				-2	2	-3	1	2	0	0	0
C2 stagnierend	-1	2	-1	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0
C3 dynamisch	0	0	0	0	0	0				-2	2	3	-1	-2	0	0	0
<b>D. Wohlstandsverteilung</b>																	
D1 ausgeglichen	0	0	0	0	0	0	0	0	0			3	-1	-2	-2	1	1
D2 große Kontraste	0	-3	3	0	0	0	0	0	0			-3	1	2	2	-1	-1
<b>E. Sozialer Zusammenhalt</b>																	
E1 sozialer Friede	0	0	0	0	0	0	-2	-1	3	0	0				2	-1	-1
E2 Spannungen	0	0	0	-1	0	1	1	1	-2	0	0				-1	0	1
E3 Unruhen	2	-1	-1	-3	1	2	3	0	-3	0	0				-2	-1	3
<b>F. Gesellschaftliche Werte</b>																	
F1 Leistung	0	3	-3	0	0	0	-3	0	3	-3	3	-2	1	1			
F2 Solidarität	1	-2	1	0	0	0	-1	2	-1	2	-2	2	-1	-1			
F3 Familie	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1	1	-1	2	-1	-1			

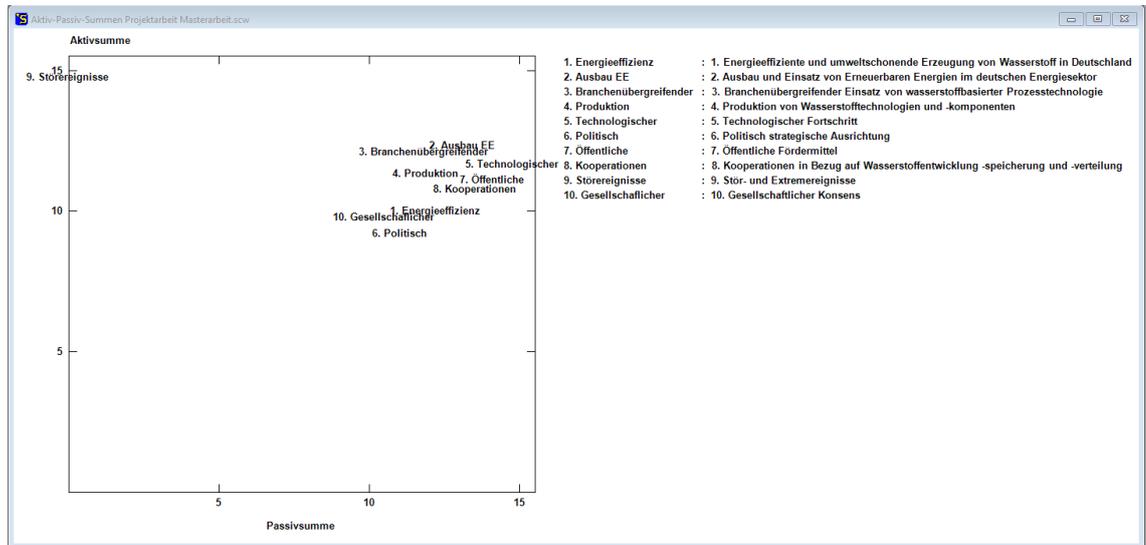
Quelle: ZIRIUS, Die CIB-Analyse, o.J., o.S.

**Anhang 6: Deskriptoren und ihre Ausprägungen**

<b>No.</b>	<b>Schlüsselfaktor und Ausprägungen</b>
<b>1</b>	<b>Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland</b>
1.1	Grün dominant
1.2	Blau dominant
1.3	Türkis dominant
<b>2</b>	<b>Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor</b>
2.1	Überdurchschnittliches Wachstum
2.2	Wachstum nach Plan
2.3	Stagnation des Ausbaus
<b>3</b>	<b>Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie</b>
3.1	Starke Branchendurchdringung
3.2	Moderate Branchendurchdringung
3.3	Schwache Branchendurchdringung
<b>4</b>	<b>Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten</b>
4.1	Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
4.2	Teiltechnologien
4.3	Nischenanteile
<b>5</b>	<b>Technologischer Fortschritt</b>
5.1	Disruptiver, erfolgreicher Durchbruch
5.2	Stetige Steigerung
5.3	Stagnation
<b>6</b>	<b>Politisch strategische Ausrichtung</b>
6.1	Pro
6.2	Neutral
6.3	Kontra
<b>7</b>	<b>Öffentliche Fördermittel</b>
7.1	Steigendes Niveau der Fördermittel zu der Entwicklung bis 2021
7.2	Gleichbleibendes Niveau der Fördermittel zu der Entwicklung bis 2021
7.3	Sinkendes Niveau der Fördermittel zu der Entwicklung bis 2021
<b>8</b>	<b>Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung</b>
8.1	Internationale Kooperationen
8.2	Europäische Kooperation
8.3	Einzelkämpfer
<b>9</b>	<b>Stör- und Extremereignisse</b>
9.1	Förderliche Ereignisse
9.2	Neutrale Ereignisse
9.3	Konträre Ereignisse
<b>10</b>	<b>Gesellschaftlicher Konsens</b>
10.1	Überwiegend Pro Wasserstoff
10.2	Neutral Wasserstoff
10.3	Konträre oder gespaltene Haltung

Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 7: System-Grid der Aktiv-Passiv-Summen



Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

### Anhang 8: Beispiel Szenario-Beschreibung und -tableauform

Szenario Nr. 1	
Konsistenzwert: 0	
Wirkungstotale: 173	
1. Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland:	Grün dominant
2. Ausbau und Einsatz von Erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor	: Übermäßiges Wachstum
3. Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie	: Starke Branchendurchdringung
4. Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten	: Technologieführerschaft bei der gesamte Wertschöpf
5. Technologischer Fortschritt	: Disruptiver erfolgreicher Durchbruch
6. Politisch strategische Ausrichtung	: Pro
7. Öffentliche Fördermittel	: Steigendes Niveau
8. Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung -speicherung und -verteilung:	Internationale Kooperationen
9. Stör- und Extremereignisse	: Förderliche Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens	: Überwiegend Pro Wasserstoff

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 5	Szenario Nr. 6	Szenario Nr. 7	Szenario Nr. 8	Szenario Nr. 9	Szenario Nr. 10
1. Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland: Grün dominant						1. Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland: Blau dominant			
2. Ausbau und Einsatz von Erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor: Übermäßiges Wachstum						2. Ausbau und Einsatz von Erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor: Stagnation des Ausbaus			
3. Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie: Starke Branchendurchdringung						3. Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie: Schwache Branchendurchdringung			
4. Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten: Technologieführerschaft bei der gesamte Wertschöpfungskette						4. Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten: Nischenanteile			
5. Technologischer Fortschritt: Disruptiver erfolgreicher Durchbruch	5. Technologischer Fortschritt: Stetige Steigerung	5. Technologischer Fortschritt: Disruptiver erfolgreicher Durchbruch	5. Technologischer Fortschritt: Stetige Steigerung	5. Technologischer Fortschritt: Disruptiver erfolgreicher Durchbruch	5. Technologischer Fortschritt: Stetige Steigerung	5. Technologischer Fortschritt: Stagnation			
6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro						6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra			
7. Öffentliche Fördermittel: Steigendes Niveau						7. Öffentliche Fördermittel: Sinkendes Niveau			
8. Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung -speicherung und -verteilung: Internationale Kooperationen						8. Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung -speicherung und -verteilung: Europäische Kooperationen	8. Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung -speicherung und -verteilung: Einzelkämpfer		
9. Stör- und Extremereignisse: Förderliche Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Neutrale Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Konträre Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Förderliche Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Neutrale Ereignisse	9. Stör- und Extremereignisse: Konträre Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens: Überwiegend Pro Wasserstoff						10. Gesellschaftlicher Konsens: Konträre oder gespaltene Haltung			

Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

**Anhang 9: Umbenennung der Faktoren im Text**

<b>Benennung</b>	<b>Schlüsselfaktor</b>
Faktor eins	Energieeffiziente und umweltschonende Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland
Faktor zwei	Ausbau und Einsatz von erneuerbaren Energien im deutschen Energiesektor
Faktor drei	Branchenübergreifender Einsatz von wasserstoffbasierter Prozesstechnologie
Faktor vier	Produktion von Wasserstofftechnologien und -komponenten
Faktor fünf	Technologischer Fortschritt
Faktor sechs	Politisch strategische Ausrichtung
Faktor sieben	Öffentliche Fördermittel
Faktor acht	Kooperationen in Bezug auf Wasserstoffentwicklung, -speicherung und -verteilung
Faktor neun	Stör- und Extremereignisse
Faktor zehn	Gesellschaftlicher Konsens

Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 10: Umbenennung der Faktoren im ScenarioWizard

Kurznamen:

Deskriptoren:	Variante [ 1 ]	Variante [ 2 ]	Variante [ 3 ]
1. Energieeffizienz	Grün dom.	Blau dom.	Türkis dom.
2. Ausbau EE	Überdurchschnittlich	nach Plan	Stagnation
3. Branchenübergreifender	Stark	Moderat	Schwach
4. Produktion	Technologieführerschaft	Teiltech.	Nischenanteile
5. Technologischer	Disruptiv	Stetig	Stagnation
6. Politisch	Pro	Neutral	Kontra
7. Öffentliche	Steigendes Niveau	Gleichbleibendes Niveau	Sinkendes Niveau
8. Kooperationen	Int. Kooperationen	Europäische Kooperation	Einzelkämpfer
9. Störereignisse	Förderlich	Neutral	Konträre
10. Gesellschaftlicher	Überwiegend Pro	Neutral	Konträr oder gespalten

Langnamen:

Deskriptoren:	Variante [ 1 ]	Variante [ 2 ]	Variante [ 3 ]
1. Wasserstoffausprägung	Grün dominant	Blau dominant	Türkis dominant
2. Ausbau Erneuerbare Energien	Übermäßiges Wachstum	Wachstum nach Plan	Stagnation des Ausbaus
3. Branchendurchdringung	Starke	Moderate	Schwach
4. Produktion Wasserstofftechnologien	Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette	Teiltechnologien	Nischenanteile
5. Technologischer Fortschritt	Disruptiver	Stetige Steigerung	Stagnation
6. Politisch strategische Ausrichtung	Pro	Neutral	Kontra
7. Öffentliche Fördermittel	Steigendes Niveau	Gleichbleibendes Niveau	Sinkendes Niveau
8. Wasserstoffkooperationen	Internationale Kooperationen	Europäische Kooperationen	Einzelkämpfer
9. Stör- und Extremereignisse	Förderliche Ereignisse	Neutrale Ereignisse	Konträre Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens	Überwiegend Pro Wasserstoff	Neutral Wasserstoff	Konträre oder gespaltene Haltung

Quelle: Eigene Darstellung mit dem Software ScenarioWizard

## Anhang 11: Gebildete Szenarien mit dem ScenarioWizard

Konsistente Szenarien der CI-Matrix Projektarbeit Masterarbeit.scw:  
Starke Konsistenz

=====

=====

Szenario Nr. 1

Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 168

-----

1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
3. Branchendurchdringung : Starke
4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
5. Technologischer Fortschritt : Disruptiver
6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
9. Stör- und Extremereignisse : Förderliche Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====

=====

=====

Szenario Nr. 2

Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 167

-----

1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
3. Branchendurchdringung : Starke
4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
5. Technologischer Fortschritt : Stetige Steigerung
6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
9. Stör- und Extremereignisse : Förderliche Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====

=====

=====

Szenario Nr. 3

Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 142

-----

1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
3. Branchendurchdringung : Starke
4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
5. Technologischer Fortschritt : Disruptiver
6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
9. Stör- und Extremereignisse : Neutrale Ereignisse
10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====

=====

=====

Szenario Nr. 4

Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 141

- 
1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
  2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
  3. Branchendurchdringung : Starke
  4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
  5. Technologischer Fortschritt : Stetige Steigerung
  6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
  7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
  8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
  9. Stör- und Extremereignisse : Neutrale Ereignisse
  10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====  
-----  
=====  
-----  
=====  
-----  
Szenario Nr. 5  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 115

- 
1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
  2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
  3. Branchendurchdringung : Starke
  4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
  5. Technologischer Fortschritt : Disruptiver
  6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
  7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
  8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
  9. Stör- und Extremereignisse : Konträre Ereignisse
  10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====  
-----  
=====  
-----  
=====  
-----  
Szenario Nr. 6  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 114

- 
1. Wasserstoffausprägung : Grün dominant
  2. Ausbau Erneuerbare Energien : Überdurchschnittliches Wachstum
  3. Branchendurchdringung : Starke
  4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette
  5. Technologischer Fortschritt : Stetige Steigerung
  6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro
  7. Öffentliche Fördermittel : Steigendes Niveau
  8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
  9. Stör- und Extremereignisse : Konträre Ereignisse
  10. Gesellschaftlicher Konsens : Überwiegend Pro Wasserstoff

=====  
-----  
=====  
-----  
=====  
-----  
Szenario Nr. 7  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 56

- 
1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
  2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
  3. Branchendurchdringung : Schwach
  4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
  5. Technologischer Fortschritt : Stagnation

- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Förderliche Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

=====

Szenario Nr. 8  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 63

-----

- 1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
- 2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
- 3. Branchendurchdringung : Schwach
- 4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
- 5. Technologischer Fortschritt : Stagnation
- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Europäische Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Förderliche Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

=====

Szenario Nr. 9  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 70

-----

- 1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
- 2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
- 3. Branchendurchdringung : Schwach
- 4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
- 5. Technologischer Fortschritt : Stagnation
- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Neutrale Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

=====

Szenario Nr. 10  
Konsistenzwert: 0  
Wirkungstotale: 77

-----

- 1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
- 2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
- 3. Branchendurchdringung : Schwach
- 4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
- 5. Technologischer Fortschritt : Stagnation
- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Europäische Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Neutrale Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

=====

Szenario Nr. 11  
Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 86

-----

- 1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
- 2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
- 3. Branchendurchdringung : Schwach
- 4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
- 5. Technologischer Fortschritt : Stagnation
- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Internationale Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Konträre Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

=====

=====

Szenario Nr. 12

Konsistenzwert: 0

Wirkungstotale: 93

-----

- 1. Wasserstoffausprägung : Blau dominant
- 2. Ausbau Erneuerbare Energien : Stagnation des Ausbaus
- 3. Branchendurchdringung : Schwach
- 4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanteile
- 5. Technologischer Fortschritt : Stagnation
- 6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra
- 7. Öffentliche Fördermittel : Sinkendes Niveau
- 8. Wasserstoffkooperationen : Europäische Kooperationen
- 9. Stör- und Extremereignisse : Konträre Ereignisse
- 10. Gesellschaftlicher Konsens : Konträre oder gespaltene Haltung

=====

=====

Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

**Anhang 12: Tableauform**

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 5	Szenario Nr. 6	Szenario Nr. 7	Szenario Nr. 8	Szenario Nr. 9	Szenario Nr. 10	Szenario Nr. 11	Szenario Nr. 12
1. Wasserstoffausprägung: Grün dominant 2. Ausbau Erneuerbare Energien: Übermäßiges Wachstum 3. Branchendurchdringung: Starke						1. Wasserstoffausprägung: Blau dominant 2. Ausbau Erneuerbare Energien: Stagnation des Ausbaus 3. Branchendurchdringung: Schwach					
4. Produktion Wasserstofftechnologien: Technologieführerschaft bei der gesamten Wertschöpfungskette						4. Produktion Wasserstofftechnologien: Nischenanäle					
5. Technologischer Fortschritt Disruptiver	5. Technologischer Fortschritt Steige	5. Technologischer Fortschritt Disruptiver	5. Technologischer Fortschritt Steige	5. Technologischer Fortschritt Disruptiver	5. Technologischer Fortschritt Steigerung			5. Technologischer Fortschritt Stagnation			
6. Politisch strategische Ausrichtung: Pro						6. Politisch strategische Ausrichtung: Kontra					
7. Öffentliche Fördermittel: Steigendes Niveau						7. Öffentliche Fördermittel: Sinkendes Niveau					
8. Wasserstoffkooperationen: Internationale Kooperationen						8. Wasserstoffkooperationen: Europäische Kooperationen		8. Wasserstoffkooperationen: Internationale Kooperationen		8. Wasserstoffkooperationen: Internationale Kooperationen	
9. Stör- und Extremereignisse: Förderliche Ereignisse						9. Stör- und Extremereignisse: Förderliche Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Neutrale Ereignisse		9. Stör- und Extremereignisse: Konträre Ereignisse	
10. Gesellschaftlicher Konsens: Überwiegend Pro Wasserstoff						10. Gesellschaftlicher Konsens: Konträre oder gespaltene Haltung					

Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

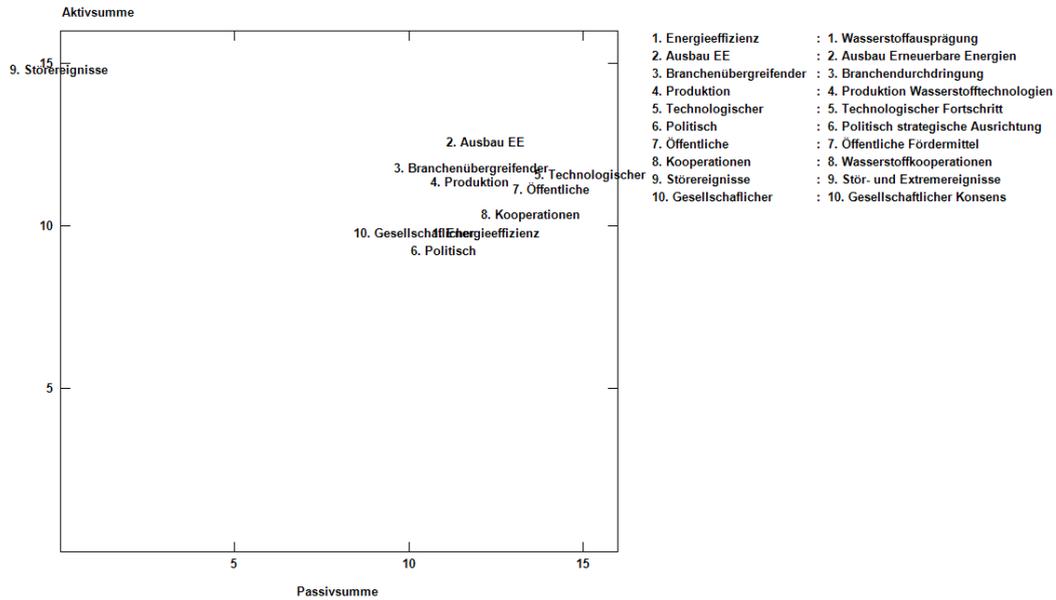
### Anhang 13: Optimierte Tableauform

<b>Szenario</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Konsistenzwert</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Wirkungstotale</b>	168	167	142	141	115	114	56	63	70	77	86	93
<b>Grundlegende Ausrichtung des Szenarios</b>	<b>Erfolg der Wasserstoffwirtschaft</b>						<b>Scheitern der Wasserstoffwirtschaft</b>					
<b>Faktor 1</b> Wasserstoff- ausprägung	Grün dominant						Blau dominant					
<b>Faktor 2</b> Ausbau Erneuerbare Energien	Übermäßiges Wachstum						Stagnation des Ausbaus					
<b>Faktor 3</b> Branchendurch- dringung	Starke Branchendurchdringung						Schwache Branchendurchdringung					
<b>Faktor 4</b> Produktion Wasser- stofftechnologien	Technologieführerschaft in der gesamten Wertschöpfungskette						Nischenanteile					
<b>Faktor 5</b> Technologischer Fortschritt	Disruptiv	Stetige Steigerung	Disruptiv	Stetige Steigerung	Disruptiv	Stetige Steigerung	Stagnation					
<b>Faktor 6</b> Politisch strategische Ausrichtung	Pro						kontra					
<b>Faktor 7</b> Öffentliche Fördermittel	Steigendes Niveau						Sinkendes Niveau					
<b>Faktor 8</b> Wasserstoff- kooperationen	Internationale Kooperationen						Europäische Kooperationen	Internationale Kooperationen	Europäische Kooperationen	Internationale Kooperationen	Europäische Kooperationen	Europäische Kooperationen
<b>Faktor 9</b> Stör- und Extremereignisse	Förderliche Ereignisse		Neutrale Ereignisse		Konträre Ereignisse		Förderliche Ereignisse		Neutrale Ereignisse		Konträre Ereignisse	
<b>Faktor 10</b> Gesellschaftlicher Konsens	Überwiegend Pro Wasserstoff						konträre oder gespaltene Haltung					

Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

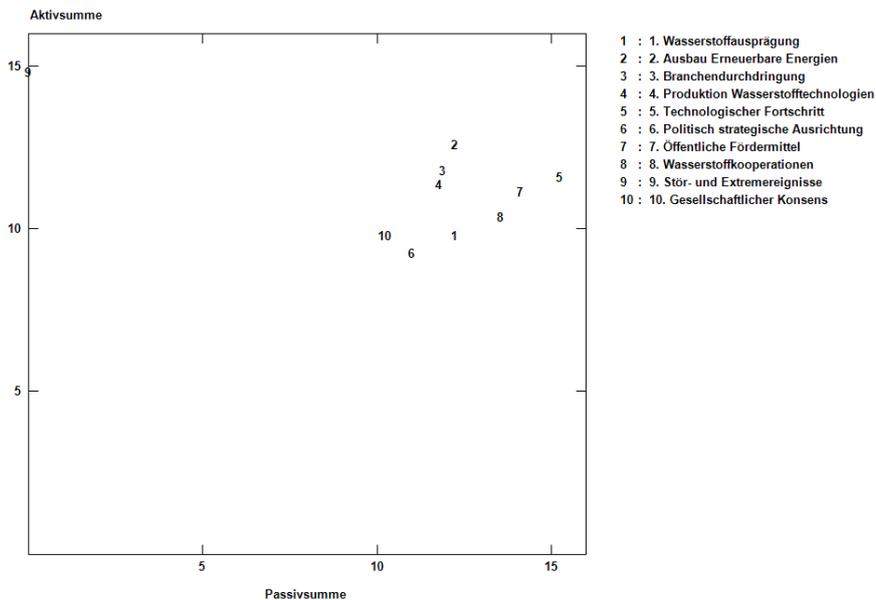
### Anhang 14: Aktiv-Passiv-Summen-Diagramm Daten

Ausgabe des ScenarioWizards unbereinigt:



Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

Aktiv-Passiv-Summen Diagramm mit Anpassung der Beschriftung, sodass die Zahlen zentriert stehen und den ungefähren Punkt verdeutlichen:



Quelle: Eigene Darstellung mit Software ScenarioWizard

Eigene Schätzung der Werte und Datengrundlage des Diagramms:

<b>Faktorbenennung</b>	<b>No</b>	<b>Geschätzte Passivsumme</b>	<b>Geschätzte Aktivsumme</b>
Wasserstoffausprägung	1	12,25	9,75
Ausbau erneuerbare Energie	2	12,25	12,50
Branchendurchdringung	3	11,75	11,75
Produktion von Wasserstofftechnologien	4	11,75	11,25
Technologischer Fortschritt	5	15,25	11,50
Politisch strategische Ausrichtung	6	11	9,00
Öffentliche Fördermittel	7	14	11,00
Internationale Kooperationen	8	13,5	10,50
Stör- und Extremereignisse	9	0	14,75
Gesellschaftlicher Konsens	10	10,25	9,75

Quelle: Eigene Darstellung





## Literaturverzeichnis

- Adam, Peter; Engelshove, Stefan; Heunemann, Frank; Thiemann, Thomas; von dem Bussche, Christoph (Wasserstoffinfrastruktur, 2020): Wasserstoffinfrastruktur - tragende Säule der Energiewende, 2020
- adelphie consult GmbH, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) mbH (Grüner Wasserstoff, 2019): Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland, Berlin, 2019
- Agora Energiewende (Stromnetze, 2018): Stromnetze für 65% Erneuerbare bis 2030 – Zwölf Maßnahmen für den synchronen Ausbau von Netzen und Erneuerbaren Energien, Berlin
- Agora Energiewende und Wuppertal Institut (Klimaneutrale Industrie, 2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, Berlin, 2019
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (strombasierte synthetische Brennstoffe, 2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, Berlin/Köln, 2018
- Ausfelder, Dr. Florian; Dura, Hanna Ewa (1. Roadmap Power-to-X, 2018): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien, Frankfurt am Main, 2018
- Ausfelder, Dr. Florian; Dura, Hanna Ewa (2. Roadmap Power-to-X, 2019): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien, Frankfurt am Main, 2019

- Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE) (Argumente für die Energie der Zukunft, 2017): Wir sorgen für saubere Energie – zu 100 Prozent – Argumente für die Energie der Zukunft, Berlin, 2017
- Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE) (BEE-Szenario 2030, 2020): Das „BEE-Szenario 2030“, Berlin, 2020
- Bukold, Dr. Steffen (Kurzstudie blauer Wasserstoff, 2020): Kurzstudie blauer Wasserstoff – Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades, Greenpeace Energy, 2020
- Bundesanzeiger Verlag GmbH (Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, 2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, Drucksache 452/20, COM (2020) 301 final, Köln, 2020
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Bildung und Forschung, 2020): Bildung und Forschung in Zahlen 2020, Berlin, 2020
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Bundesbericht Energieforschung, 2021): Bundesbericht Energieforschung 2021, Berlin, 2021
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Dialogprozess Gas 2030, 2019): Dialogprozess Gas 2030 – erste Bilanz, Berlin, 2019
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Die Energie der Zukunft, 2021): Die Energie der Zukunft, Berlin, 2021
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Gewinner des Ideenwettbewerbs, ohne Jahr): Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ – Steckbriefe -, ohne Jahr

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Nationale Wasserstoffstrategie, 2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, Berlin, 2020

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Bundesnetzagentur), Bundeskartellamt (Monitoringbericht 2020, 2021): Monitoringbericht 2020, Bonn, 2021

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Bundesnetzagentur) (Regulierung von Wasserstoffnetzen, 2020): Regulierung von Wasserstoffnetzen – Bestandsaufnahme, Bonn, 2020

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, 2020): EU-Rahmen für erneuerbare und dekarbonisierte Gase, Berlin, 2020

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Roadmap Gas, 2020) Roadmap Gas, Berlin, 2020

Christlich Demokratische Union Deutschlands (CDU), Christlich Soziale Union in Bayern (CSU) (Das Programm für Stabilität und Erneuerung, 2021): Das Programm für Stabilität und Erneuerung, 2021

CEA, Fraunhofer IFAM, Fraunhofer ISE, Hydrogen Europa Research, Forschungszentrum Jülich, SINTEF, TNO innovation for life (HySpeedInnovation, 2020): HySpeedInnovation - A joint action plan for innovation and upscaling in the field of water electrolysis technology, 2020

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 1, 2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung, Köln, 2020

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2, 2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende - Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff, Köln, 2020

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) (Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011): Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, Berlin, 2011

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (Wasserstoff, 2019): Wasserstoff - Schlüssel für das Gelingen der Energiewende in allen Sektoren, Bonn, 2019

Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Terega (European Hydrogen Backbone, 2020) European Hydrogen Backbone, Utrecht, 2020

Energieagentur.NRW (Europäische Ansätze, 2020): Europäische Ansätze für die Förderung der Akzeptanz erneuerbarer Energien, Düsseldorf, 2020

Energieagentur.NRW (Gestehungskosten von PtX-Produkten, 2019): Gestehungskosten von PtX-Produkten im Vergleich zwischen Deutschland und Nordafrika, Wuppertal, 2019

Energy Brainpool (Wettbewerbsfähigkeit, 2018): Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrolysegas Erneuerbaren Ursprungs, Berlin, 2018

Feck, Thomas (Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust, 2009): Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schriften des Forschungszentrums Jülich – Reihe Energie & Umwelt, Band 51, ISSN 1866-1793, Jülich, 2009

- Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE) (Regionalisierung, 2019):  
Studie zur Regionalisierung von PtG-Leistungen für den Szenariorahmen NEP  
Gas 2020-2030, München, 2019
- Forschungszentrum Jülich GmbH (Wege für die Energiewende, 2020): Wege für die  
Energiewende, Jülich, 2020
- Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (Wasserstoff  
im zukünftigen Energiesystem, 2020): Wasserstoff im zukünftigen Energiesys-  
tem: Fokus Gebäudewärme, Hannover, 2020
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem (ISE), Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung (ISI) (Wasserstoff-Roadmap, 2019): Eine Wasserstoff-  
Roadmap für Deutschland, Karlsruhe und Freiburg, 2019
- Fraunhofer-Institute for System and Innovation Research (ISI): Power-To-X in Morocco,  
2019): Study on the opportunities of "Power-to-X" in Morocco, Karlsruhe, 2019
- frontier economics, IAEW, 4Management, EMCEL (Wert der Gasinfrastruktur, 2017):  
Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland - Eine  
modellbasierte Analyse. 2017
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) (Hydrogen Valleys, 2021):  
Hydrogen Valleys, doi: 10.2843/133091, Brüssel, 2021
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) (Hydrogen Roadmap Europe,  
2019): Hydrogen Roadmap Europe, doi:10.2843/341510, Luxembourg, 2019
- GASAG (Sicherheitsdatenblatt Erdgas, 1999): Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung  
(EG) Nr. 1907/2006 REACH / §5 GefStoffV. 1999

- Greenpeace Energy EG (Blauer Wasserstoff, 2020): Blauer Wasserstoff – Lösung oder Problem der Energiewende?, Hamburg, 2020
- Guidehouse (Gas Decarbonisation Pathways 2020-2050, 2020): Gas Decarbonisation Pathways 2020-2050, Utrecht, 2020
- Handelsblatt (Hoffnung Wasserstoff, 2019): Dossier: Hoffnung Wasserstoff, Düsseldorf, 2019
- Hydrogen Council (Hydrogen Insights, 2021): Hydrogen Insights - A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, 2021
- Hydrogen Council (Path to competitiveness, 2020): Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective, 2020
- Ifeu, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) und Consentec (Effizienz im Gebäudesektor, 2018): Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorkupplung, Berlin, 2018
- IN4CLIMATE.NRW (Schlüssel Wasserstoff, 2019): Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen, Gelsenkirchen, 2019
- Institut der deutschen Wirtschaft (IW) (Synthetische Kraftstoffe, 2021): Synthetische Kraftstoffe - Potenziale für Europa, Köln, 2021
- Institut der deutschen Wirtschaft (IW), frontier economics (Synthetische Energieträger, 2018): Synthetische Energieträger - Perspektiven für die deutsche Wirtschaft und den internationalen Handel, 2018
- Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) (Wasserstoff – Farbenlehre, 2020): Wasserstoff-Farbenlehre, Berlin/Greifswald, 2020

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) (Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalysen, 2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterie, ISBN 978-3-941374-03-4, Werkstattbericht Nr.103, Berlin, 2008

International Energy Agency (IEA) (The Future of Hydrogen, 2019): The Future of Hydrogen, 2019

International Renewable Energy Agency (IRENA) (Green Hydrogen Cost Reduction, 2020): Green Hydrogen Cost Reduction – Scaling up Electrolyseurs to meet the 1.5° climate goal, Abu Dhabi, 2020

International Renewable Energy Agency (IRENA) (Green Hydrogen Policy Making, 2020): Green Hydrogen - A guide to policy making, Abu Dhabi, 2020

Kruse, Mirko; Wedemeier, Jan (Potenzial grüner Wasserstoff, 2021): Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung, in Wirtschaftsdienst, 2021, Heft 1, S.26-32

Mietzner, Dana (Strategische Vorausschau und Szenarioanalyse, 2009): Strategische Vorausschau und Szenarioanalyse – Methodenevaluation und neue Ansätze, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) (Energieforschungsbericht, 2020): Energieforschungsbericht für Nordrhein-Westfalen 2020 - Dossier: Wasserstoff, Düsseldorf, 2020

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Land Nordrhein-Westfalen (MWIDE) (Wasserstoff-Roadmap NRW, 2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2020

- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes  
Nordrhein-Westfalen (MWIDE) (Wasserstoffstudie NRW, 2019):  
Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2019
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) GmbH  
(Studie IndWEDe, 2018): Studie IndWEDe - Industrialisierung der  
Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für  
nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Berlin, 2018
- Prognos AG (Kosten und Transformationspfade, 2020): Kosten und  
Transformationspfade für strombasierte Energieträger, Basel, 2020
- Schnurnberger, Dr. Werner (Methoden der Wasserstofferzeugung, 2004): Methoden der  
Wasserstofferzeugung, 2004 in FVS Themen, 2004, S.50-59
- Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD) (Aus Respekt vor deiner Zukunft, 2021):  
Aus Respekt vor deiner Zukunft. - Das Zukunftsprogramm der SPD, 2021
- Spektrum (Focus Hydrogen, 2020): Focus Hydrogen, Volume 16, Issue 1, Bayreuth, 2020
- Statista (Dossier Energiewende in Deutschland, 2021): Dossier Energiewende in  
Deutschland, 2021
- Statista (Dossier Strom- und Energiepreise, 2021): Dossier Strom- und Energiepreise in  
Deutschland
- Umweltbundesamt (UBA) (Erneuerbare Energien in Deutschland, 2021): Erneuerbare  
Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2020, Dessau-Roßlau,  
ISSN 2363-829X, 2021

- Umweltbundesamt (UBA) (Strommarkt und Klimaschutz, 2021): Strommarkt und Klimaschutz: Transformation der Stromerzeugung bis 2050, Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4359, 2021
- van Wijk, Prof. Dr. Ad; Chatzimarkakis, Jorgo (2x40 GW Initiative, 2020): Green hydrogen for a european green deal - A 2x40 GW Initiative, 2020, in: Hydrogen Europe, 03/2020, Brüssel, ISBN: 978-90-827637-1-3, S.1-37
- Weimer-Jehle, Dr. Wolfgang (Anleitung Scenariowizard, 2018): Scenariowizard 4.3 Bedienungsanleitung, Universität Stuttgart, 2018
- Weimer-Jehle, Dr. Wolfgang (Guideline No.4, 2018): Cross-Impact Balance Analysis – Guideline No. 4 – Key figures used in the analysis of CIB scenarios, Research Center for Interdisciplinary Risk and Innovation Studies – University of Stuttgart, Stuttgart, 2018
- Weimer-Jehle, Dr. Wolfgang (Properties of Cross-Impact Balance Analysis, 2009): Properties of Cross-Impact Balance Analysis, University of Stuttgart, Stuttgart, 2009
- Weimer-Jehle, Dr. Wolfgang (Szenariientwicklung mit der Cross-Impact Bilanzanalyse, 2009): Szenariientwicklung mit der Cross-Impact Bilanzanalyse, Stuttgart, Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SRC SimTech), 2009, in: Gausemeier J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagschriftenreihe Vol. 265, Paderborn, 435-454.
- Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages (Kosten Produktion grüner Wasserstoff, 2020): Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff, 2020
- Wuppertal Institut (Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten, 2020): Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung, Wuppertal, 2020

## Onlinequellen

BASF (Stimmen aus der Forschung, o.J.): Stimmen aus der Forschung,

<<https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/interview-methane-pyrolysis.html>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Wissenschaft mit der und für die Gesellschaft, o.J.): Wissenschaft mit der und für die Gesellschaft,

<<https://www.horizont2020.de/einstieg-wg.htm>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Energiedaten: Gesamtausgabe, o.J.) Energiedaten: Gesamtausgabe,

<<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesregierung (Ausstieg aus der Kernkraft, o.J.): Ausstieg aus der Kernkraft,

<<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/ausstieg-aus-der-kernkraft-394280>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesregierung (Ein neues Zeitalter hat begonnen, o.J.): Ein neues Zeitalter hat

begonnen, <<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/erneuerbare-energien-317608>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesregierung (Von der Kohle hin zur Zukunft, o.J.): Von der Kohle hin zur Zukunft,

<<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/kohleausstieg-1664496>> [Zugriff am 22.10.2021]

Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) (Forschung und Innovation, o.J.):

Forschung und Innovation, <<https://bdi.eu/artikel/news/europaeische-innovationspolitik/>> [Zugriff am 22.10.2021]

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (Über uns, o.J.):  
Über uns, <<https://www.tab-beim-bundestag.de/de/>> [Zugriff am 22.10.2021]

Deutscher Bundestag (Die Wissenschaftlichen Dienste, o.J.):  
<<https://www.bundestag.de/analysen>> [Zugriff am 22.10.2021]

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Hydrosol-plant, o.J.): Hydrosol-plant,  
<[https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22259\\_read-51105/](https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22259_read-51105/)>, [Zugriff am 22.10.2021]

NASA (Technology Readiness Level, 2012): Technology Readiness Level,  
<[https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level)> [Zugriff am 06.11.2021]

NOW GmbH (Wasserstoff und Brennstoffzelle, ohne Jahr): Wasserstoff und Brennstoffzelle,  
<<https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/wasserstoff-und-brennstoffzelle/>> [Zugriff am 06.11.2021]

Statista (Abhängigkeit von Energieimporten in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2019, 2021): Abhängigkeit von Energieimporten in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2019,  
<<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154568/umfrage/abhaengigkeit-von-energieimporten-in-deutschland-seit-1996/>> [Zugriff am 22.10.2021]

Statista (Prognose zur Verteilung des weltweiten Energiebedarfs nach Energieträger bis 2040, 2019): Prognose zur Verteilung des weltweiten Energiebedarfs nach Energieträger bis 2040,  
<<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28694/umfrage/prognose-zur-preisentwicklung-von-erdgas-bis-2030/>> [Zugriff am 22.10.2021]

Umweltbundesamt (UBA) (Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, 2021): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, <<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>> [Zugriff am 22.10.2021]

Umweltbundesamt (UBA) (Primärenergiegewinnung und -importe, 2021): Primärenergiegewinnung und -importe, <<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>> [Zugriff am 22.10.2021]

Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS) (Die CIB-Analyse, o.J.): Die CIB-Analyse, <[https://cross-impact.de/deutsch/CIB\\_d\\_Alg\\_3.htm](https://cross-impact.de/deutsch/CIB_d_Alg_3.htm)> [Zugriff am 22.10.2021]

Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS) (CIB Lab, o.J.): CIB Lab, <[https://cross-impact.de/deutsch/CIB\\_d\\_Lab.htm](https://cross-impact.de/deutsch/CIB_d_Lab.htm)> [Zugriff am 22.10.2021]