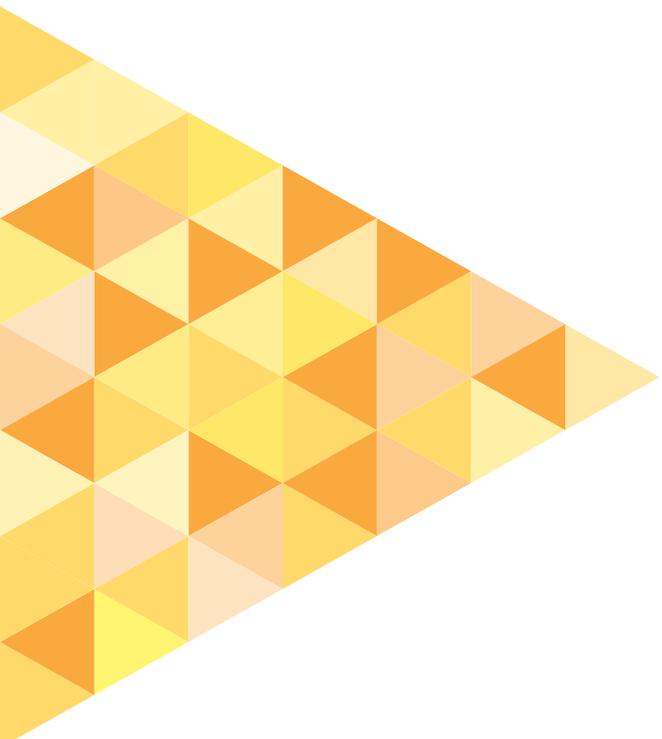


Stefanie Steeg | Robert Helmrich | Tobias Maier |
Jan Philipp Schroer | Anke Mönning | Marc Ingo Wolter |
Christian Schneemann | Gerd Zika

Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem. Eine erste Bestandsaufnahme



BIBB Discussion Paper

Zitiervorschlag:

Steeg, Stefanie; Helmrich, Robert; Maier, Tobias; Schroer, Jan Philipp; Mönig, Anke; Wolter, Marc Ingo; Schneemann, Christian; Zika, Gerd: Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland : Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem ; eine erste Bestandsaufnahme. Version 1.0 Bonn, 2022.
Online: https://res.bibb.de/vet-repository_779809



© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2022

Version 1.0
Januar 2022

Herausgeber

Bundesinstitut für Berufsbildung
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn
Internet: www.vet-repository.info
E-Mail: repository@bibb.de

CC Lizenz

Der Inhalt dieses Werkes steht unter Creative-Commons-Lizenz (Lizenztyp: Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung – 4.0 International).

Weitere Informationen finden sie im Internet auf unserer Creative-Commons-Infoseite

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Diese Netzpublikation wurde bei der Deutschen

Nationalbibliothek angemeldet und archiviert:

urn:nbn:de:0035-vetrepository-779809-4

Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem.

Eine erste Bestandsaufnahme

Stefanie Steeg¹, Robert Helmrich¹, Tobias Maier¹, Jan Philipp Schroer¹, Anke Mönning², Marc Ingo Wolter², Christian Schneemann³, Gerd Zika³

Abstract:

Wasserstoff hat das Potenzial als Energieträger der Zukunft das Energie-, Wärme-, Wirtschafts- und Verkehrssystem in Deutschland zu dekarbonisieren und damit die Klimaziele zu erreichen. Wird dieser anhand von erneuerbaren Energien gewonnen (sog. grüner Wasserstoff) ermöglicht er eine Speicherung und damit flexible Nutzung Erneuerbarer Energien. Eine Ausschöpfung dieser Nutzungsmöglichkeiten ist mit umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und Umstrukturierungen von industriellen Prozessen verbunden. Diesen Prozess ebnet die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung, mit der sich in Deutschland eine Wasserstoffwirtschaft etablieren soll. Der vorliegende Beitrag stellt den aktuellen Forschungsstand hinsichtlich der Arbeitsmarktwirkungen durch eine Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie in Deutschland dar. Im Ergebnis zeigt sich, dass es zunächst voraussichtlich zu einem Beschäftigungsaufbau in der Technischen Forschung, dem Maschinenbau, der Chemie sowie der Elektro- und Energietechnik kommen wird. Außerdem werden im Zuge des Infrastrukturaufbaus das Bauwesen und ihm vorgelagerte Branchen gefragt sein. Die energieintensiven Branchen Chemie, Stahl und Zement werden überdurchschnittlich stark von Veränderungen der Produktions- und Arbeitsweise betroffen sein. Die Erschließung neuer Märkte – insbesondere mit Blick auf die Elektrolyse- und Brennstoffzellerfertigungsindustrie – wird für den ökonomischen Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland von entscheidender Bedeutung sein. Es wird darüber hinaus deutlich, dass noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Vorleistungsnachfrage, Personalbedarfe und Arbeitsproduktivität in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft besteht.

¹ Stefanie Steeg, Robert Helmrich, Tobias Maier, Jan Philipp Schroer, Bundesinstitut für Berufsbildung, Arbeitsbereich 1.2, „Qualifikation, berufliche Integration, Erwerbstätigkeit“

² Anke Mönning, Marc Ingo Wolter, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, Bereich „Wirtschaft und Soziales“

³ Christian Schneemann, Gerd Zika, Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung, Forschungsbereich „Prognosen und gesamtwirtschaftliche Analysen“

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Aktueller Stand der Energiewende in Deutschland	6
2.1 Bruttostromerzeugung	6
2.2 Energieverbrauch	7
2.3. Treibhausgasemissionen der Sektoren	9
3 Wasserstoff als Energieträger der Zukunft?	10
4 Folgen der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ in Deutschland: Aktueller Forschungsstand	11
4.1 Aufbau der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“	12
4.2 Betrieb der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“	19
5 Schlussfolgerungen für zu erwartende Beschäftigungseffekte der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“	23
Literaturverzeichnis	25

Abkürzungsverzeichnis

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
Akademienunion	Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.
BCG	Boston Consulting Group
BEE	Bundesverband Erneuerbare Energien
BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCS	Carbon capture and storage
CCU	Carbon capture and utilization
dena	Deutsche Energie-Agentur
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
Eurostat	Statistisches Amt der Europäischen Union
EUWID	Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH
FDP	Freie Demokratische Partei
g	Gramm
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
IEA	International Energy Agency
IKEM	Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
IRENA	International Renewables Energy Agency
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
Leopoldina	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
NRW	Nordrhein-Westfalen
QuBe	BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
SRU	Sachverständigenrat zu Umweltfragen
t	Tonne
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern – 1990 bis 2020, in TWh und %	7
Abbildung 2: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern – 1990 und 2020, in Petajoule und %	8
Abbildung 3: Endenergieverbrauch nach Sektoren und Energieträgern – 2019 (vorläufige Ergebnisse), in TWh und %	8
Abbildung 4: Jahresemissionsmenge nach Sektoren aus dem aktualisierten Klimaschutzgesetz 2021 – 2020 bis 2030, in Mio. t CO ₂ -Äquivalent	9
Abbildung 5: Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ – Aufbau	12
Abbildung 6: Anzahl von Stellenanzeigen mit einem Bezug zum Begriff „Wasserstoff“	14
Abbildung 7: Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ – Betrieb	20

1 Einleitung

Mit dem Beschluss ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie hat die vergangene Bundesregierung die zentrale Bedeutung von Wasserstoff im Rahmen der Energiewende anerkannt. Laut dem neuen Koalitionsvertrag zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/Die Grünen und der Freien Demokratischen Partei (FDP) soll diese in 2022 fortgeführt und weiterentwickelt werden, um Deutschland bis 2030 zu einem „Leitmarkt für Wasserstofftechnologien“ zu entwickeln (SPD/ BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/ FDP 2021, S. 26). Als Speicher von Erneuerbaren Energien ermöglicht Wasserstoff sowie dessen Folgeprodukte (Power-to-X) eine flexible Nutzung Erneuerbarer Energien und leistet damit einen entscheidenden Beitrag das Energie-, Wärme-, Wirtschafts- und Verkehrssystem in Deutschland zu dekarbonisieren. So lässt er sich als Energieträger in Brennstoffzellen verwerten oder für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen einsetzen, um das Verkehrssystem zu dekarbonisieren. Außerdem lassen sich ebenso Industriezweige mit erneuerbarem Strom versorgen, bei denen eine Verstromung nicht wirtschaftlich oder aus technischen Gründen nicht umsetzbar ist (vgl. RUNGE u. a. 2020; TIMMERBERG/KALTSCHMITT 2019). Wasserstoff und dem damit verbundenen Einsatz von synthetischen Energieträgern kommt daher eine zentrale Rolle zur Erreichung der Klimaziele zu (vgl. DENA 2018; BMVI 2018; ACATECH/ LEOPOLDINA/ AKADEMIENUNION 2017; AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019; IRENA 2020). Als sogenannte „Game Changer“ (BCG/ PROGROS 2018, S. 72) werden Wasserstofftechnologien die Energiewende deutlich vereinfachen und zudem günstiger gestalten.

Eine Ausschöpfung dieser Nutzungsmöglichkeiten und der daraus resultierenden Einsparpotenziale von CO₂-Emissionen sind jedoch mit umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Investitionen und Umstrukturierungen von industriellen Prozessen verbunden. Dabei wird sich mit der Erzeugung, dem Transport und der Nutzung von Wasserstoff eine Wasserstoffwirtschaft etablieren. Da damit der Aufbau einer eigenen Wertschöpfungskette innerhalb des bestehenden Wirtschaftssystems verbunden ist, wird diese im Folgenden auch als *Wertschöpfungskette „Wasserstoff“* bezeichnet (vgl. BMVI 2018). Die Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie wird nicht nur die Art und Weise der Stromgewinnung ändern, sondern wird sich auch auf die Infrastruktur, auf die Produktionsweisen energieintensiver Industrien sowie auf die Importbedarfe und auf die Exportmöglichkeiten auswirken. Daraus werden sich weitreichende Folgen für die Bedarfe am Arbeitsmarkt und somit für das Aus- und Weiterbildungssystem in Deutschland ergeben. Damit die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie nicht durch Fachkräftengpässe ausgebremst wird, ist es erforderlich, bereits frühzeitig aufzuzeigen, welche Berufe, Qualifikationen und Kompetenzen zukünftig dafür benötigt werden. Ebenso ist zu evaluieren, ob der aktuell eingeschlagene Entwicklungspfad im Bildungssystem diese zukünftigen Bedarfe decken kann.

Der vorliegende Beitrag widmet sich einer Darstellung des aktuellen Forschungsstandes hinsichtlich der Arbeitsmarktwirkungen durch eine Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie in Deutschland. Dazu wird zunächst auf den aktuellen Stand der Energiewende in Deutschland eingegangen und damit aufgezeigt, welche Veränderungsbedarfe auf dem Weg zu einem klimaneutralen Energiesystem in Deutschland noch ausstehen. Das darauffolgende Kapitel 3 stellt die unterschiedlichen Gewinnungsmethoden von Wasserstoff und deren CO₂-Bilanzen dar. Im vierten Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand bezüglich der erforderlichen Investitionen und Umstrukturierungen auf dem Weg hin zu einer Wasserstoffwirtschaft und den sich daraus ergebenden arbeitsmarkt- und bildungspolitischen Folgen gegeben. Dabei werden ebenfalls bisherige Forschungsergebnisse aus dem Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) mit einbezogen. In Kapitel 5 erfolgt schließlich eine Schlussfolgerung für zu erwartende Beschäftigungseffekte der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“.

2 Aktueller Stand der Energiewende in Deutschland

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Energiewende in Deutschland dargestellt. Genauer werden die Anteile Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und dem Energieverbrauch, sowie die Treibhausgasemissionen nach emittierenden Sektoren betrachtet. Dabei wird unter der **Bruttostromerzeugung** die gesamte in Deutschland erzeugte Strommenge verstanden, wobei Netzverluste und der Kraftwerkseigenbedarf noch keine Berücksichtigung finden. Der **Bruttoendenergieverbrauch** bezeichnet dagegen den „Energieverbrauch der Endverbraucher (Endenergieverbrauch) zuzüglich der Netzverluste und des Eigenverbrauchs der Kraftwerke“ (EUROSTAT 2021) und beinhaltet neben Strom auch sämtliche weiteren Energiearten. Dabei werden ebenso Energieimporte berücksichtigt, welche in der Bruttostromerzeugung entsprechend außen vor bleiben. Somit ist mit dem Endenergieverbrauch die Endenergie gemeint, welche die Endverbraucher/-innen schlussendlich verbrauchen. Zuletzt bezeichnet der **Primärenergieverbrauch** den Energiegehalt aller in Deutschland eingesetzten Energieträger. Es wird anhand des sogenannten Wirkungsgradprinzips ermittelt und weicht damit leicht vom Bruttoendenergieverbrauch ab (vgl. UBA 2021b). Im Gegensatz zur Endenergie muss Primärenergie teilweise noch in Sekundärenergieträger umgewandelt werden, bevor sie genutzt werden kann.

2.1 Bruttostromerzeugung

Die Energiewende in Deutschland schreitet weiter voran. Erneuerbare Energien sind mittlerweile fester Bestandteil der deutschen Stromerzeugung und werden zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Im Jahr 2020 betrug der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Bruttostromerzeugung Deutschlands mit 251 Terawattstunden (TWh) 43,9 Prozent, eine Zunahme von 3,5 Prozent im Vergleich zum Vorjahr (vgl. Abbildung 1). Besonders Windkraft mit 131 TWh (22,9 %) stach hervor, zusammengesetzt aus Onshore- (103,7 TWh/18,1 %) und Offshore-Anlagen (27,3 TWh/4,8 %). Absteigend folgte Photovoltaik mit 8,8 Prozent (50,6 TWh), Biomasse mit 7,8 Prozent (44,9 TWh) und Wasserkraft mit 3,3 Prozent der Bruttostromerzeugung. Auffallende Veränderungen zu 2019 betrafen vor allem die Energieträger Photovoltaik, mit einer Zunahme von 9,1 Prozent, Wasserkraft mit einer Abnahme von 5,6 Prozent sowie Offshore-Windkraft mit einer Steigerung von 10,3 Prozent, verglichen mit dem Vorjahresanteil.

Für das Jahr 2021 liegen derzeit nur vorläufige Ergebnisse des in Deutschland erzeugten Stroms vor. Dabei zeigt sich, dass im Vergleich zu 2020 eine um rund fünf Prozent geringere Strommenge (- 14 TWh) aus erneuerbaren Energieträgern eingespeist wurde. Grund dafür ist insbesondere die um rund elf Prozent geringere Stromerzeugung aus Windenergie, die auf eine Reihe von windschwachen Monaten in 2021 zurückzuführen ist. Darüber hinaus führte eine geringe Anzahl von Sonnenstunden im Vergleich zu 2020 dazu, dass ein Zubau von Photovoltaikanalgen diesen Rückgang nicht kompensieren konnte (vgl. AGEE-STAT 2021).

Abbildung 1: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern – 1990 bis 2020, in TWh und %

Bruttostromerzeugung											Δ in %		Anteile in %		
	TWh	1990	1995	2000	2005	2015	2016	2017	2018	2019	2020 ⁶				
Braunkohle		170,9	142,6	148,3	154,1	154,5	149,5	148,4	145,6	114,0	91,7	-19,5	16,0		
Steinkohle		140,8	147,1	143,1	134,1	117,7	112,2	92,9	82,6	57,5	43,1	-25,0	7,5		
Kernenergie		152,5	154,1	169,6	163,0	91,8	84,6	76,3	76,0	75,1	64,4	-14,3	11,3		
Erdgas		35,9	41,1	49,2	72,2	61,5	80,6	86,0	81,6	90,0	91,9	2,1	16,1		
Mineralöl		10,8	9,1	5,9	11,9	6,1	5,7	5,5	5,1	4,8	4,3	-9,9	0,8		
Erneuerbare, darunter: ⁵⁾		19,7	25,1	37,9	63,4	188,8	189,7	216,3	224,5	242,4	251,0	3,5	43,9		
- Wind onshore		k.A.	1,5	9,5	27,8	72,3	67,7	88,0	90,5	101,2	103,7	2,5	18,1		
- Wind offshore		0	0,0	0,0	0,0	8,3	12,3	17,7	19,5	24,7	27,3	10,3	4,8		
- Wasserkraft ¹⁾		19,7	21,6	24,9	19,6	19,0	20,5	20,2	17,7	19,7	18,6	-5,6	3,3		
- Biomasse		k.A.	0,7	1,6	11,5	44,6	45,0	44,7	44,4	44,4	44,9	1,0	7,8		
- Photovoltaik		k.A.	0,0	0,0	1,3	38,7	38,1	39,4	45,8	46,4	50,6	9,1	8,8		
- Hausmüll ²⁾		k.A.	1,3	1,8	3,3	5,8	5,9	6,0	6,2	5,8	5,7	-1,3	1,0		
- Geothermie		0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	10,2	0,0		
Sonstige, darunter:		19,3	17,7	22,6	23,9	27,3	27,3	27,5	27,6	25,7	25,5	-0,8	4,5		
- Pumpspeicher (PSE) ³⁾		k.A.	5,5	4,5	6,8	5,9	5,6	6,0	6,7	5,9	6,6	11,1	1,2		
- Hausmüll ²⁾		k.A.	1,3	1,8	3,3	5,8	5,9	6,0	6,2	5,8	5,7	-1,3	1,0		
- Industrieabfall		0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,4	1,3	0,9	0,9	0,8	-13,2	0,1		
Umwandlungsausstoß (Bruttostromerzeugung inkl. PSE)⁴⁾		549,9	536,8	576,6	622,5	647,6	649,7	652,9	642,9	609,4	571,9	-6,2	100,0		
Bruttostromerzeugung (ohne PSE)⁵⁾		549,9	531,4	572,0	615,7	641,7	644,1	646,9	636,2	603,5	565,3				
<i>Anteil EE an der Bruttostromerzeugung (ohne PSE) [%]</i>		3,6	4,7	6,6	10,3	29,4	29,4	33,4	35,3	40,2	44,4				
Stromimport ⁶⁾		31,9	39,7	45,1	56,9	37,0	28,3	27,8	31,7	40,1	47,1				
Stromexport ⁶⁾		31,1	34,9	42,1	61,4	85,3	78,9	80,3	80,5	72,8	67,1				
Stromimportsaldo		0,8	4,8	3,1	-4,6	-48,3	-50,5	-48,7	-48,7	-32,7	-20,0				
Bruttostromverbrauch (ohne PSE)⁶⁾		550,7	536,2	575,1	611,1	593,4	593,6	594,5	587,5	570,8	545,3				
<i>nachrichtlich</i>															
Bruttostromverbrauch (inkl. PSE)⁸⁾		550,7	541,6	579,6	617,9	599,3	599,1	600,5	594,2	576,7	551,9				
<i>Anteil EE am Bruttostromverbrauch (inkl. PSE) [%]</i>		3,6	4,6	6,5	10,3	31,5	31,7	36,0	37,8	42,0	45,5				
<i>Prozentuale Veränderung</i>		X	+ 2,0	+ 4,0	+ 0,5	+ 1,0	- 0,0	+ 0,2	- 1,1	- 2,9	- 4,3				
Pumparbeit (Speicherzufuhr u. Eigenverbrauch)		5,0	5,9	6,0	9,5	8,1	7,5	8,3	8,3	8,1	8,8				
Pumpstromerzeugung (PSE)		k.A.	5,5	4,5	6,8	5,9	5,6	6,0	6,7	5,9	6,6				
Eigenverbrauch der Pumpspeicher			-0,4	-1,5	-2,7	-2,1	-1,9	-2,2	-1,7	-2,1	-2,2				

¹⁾ Lauf- und Speicherwasser inkl. natürl. Zufluss aus PS

²⁾ aufgeteilt in reg. und nicht-reg. Anteil (50 % : 50 %)

³⁾ ohne Erzeugung aus natürl. Zufluss

⁴⁾ ab 2003 Stromaußenhandel lt. Daten des Statistischen Bundesamtes

⁵⁾ ab 2003 alle Angaben zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien lt. Daten und Berechnungen der AGEESat.

⁶⁾ Bruttostromerzeugung nach Eurostat Energiebilanz und Energiebilanz Deutschland, sofern bei der Energiebilanz Deutschland die PSE aus dem Umwandlungsausstoß (Zeile 39) herausgerechnet wird bzw. PS als Speicher betrachtet

⁷⁾ Umwandlungsausstoß elektrischer Strom nach der Energiebilanz Deutschland (Zeile 39, Spalte elektrischer Strom); entspricht der Bruttostromerzeugung sofern PS als Kraftwerke eingestuft werden, wie dies bisher in der Energiebilanz

⁸⁾ Bislang als Bezugsgröße zur Berechnung des Anteils erneuerbarer Energien verwendete Bezugsgröße, enthält Doppelzählungen, weil sowohl die PSE als auch der Speichersaldo/-verbrauch in dieser Größe zusätzlich enthalten sind

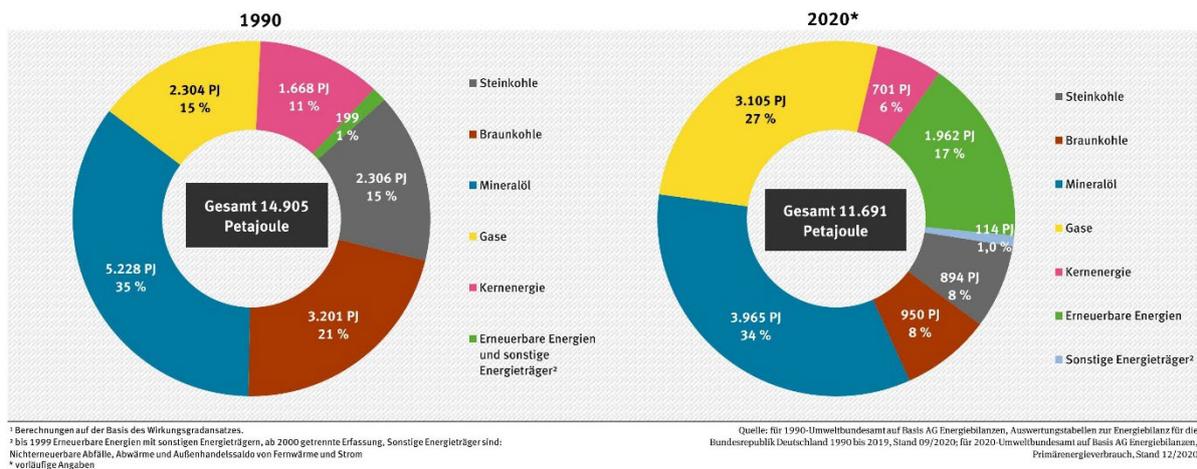
Quelle: AGE B (2021)

Trotz verringerter Anteile an der Bruttostromerzeugung 2020 stellten Braun- und Steinkohle sowie Kernkraft weiterhin einen Großteil des Stroms zur Verfügung (vgl. Abbildung 1). Der Anteil der Steinkohle (43,1 TWh) verringerte sich dabei am drastischsten mit 25 Prozent weniger als im Vorjahr, auf 7,5 Prozent der Gesamtstromerzeugung 2020, gefolgt von Braunkohle (91,7 TWh) mit einer Abnahme um 19,5 Prozent, auf 16 Prozent und Kernenergie (64,4 TWh) mit einem um 14,3 Prozent gesunkenen Anteil, auf 11,3 Prozent. Währenddessen verzeichnete Erdgas mit 91,9 TWh eine Steigerung um 2,1 Prozent und stellte 2020 somit 16,1 Prozent des Stroms bereit. Der Bruttostromanteil der Braun-, Steinkohle und Kernenergie wird in den kommenden Jahren voraussichtlich weiter abnehmen, aufgrund des beschlossenen Kohleausstiegs bis spätestens 2038 sowie des Kernkraftausstiegs bis spätestens Ende 2022 (vgl. BUNDESREGIERUNG 2021a).

2.2 Energieverbrauch

Der Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch stieg in den letzten Jahren und erreichte 2020 mit etwa 19,2 Prozent einen neuen Höchststand (vgl. UBA 2021a). Das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 einen Anteil von 18 Prozent zu erreichen, wurde somit übertraffen. Mineralöl, Gase sowie Braun- und Steinkohle sind 2020 jedoch nach wie vor die Energieträger, welche die deutliche Mehrheit der verbrauchten Primärenergie stellen (vgl. Abbildung 2). Allerdings entwickelten sich die Energieträger Gas und Kohle in den letzten 30 Jahren in entgegengesetzte Richtungen: Während sich der Anteil der Gase am Primärenergieverbrauch seit 1990 beinahe verdoppelte, ging selbiger bei Braun- und Steinkohle enorm zurück.

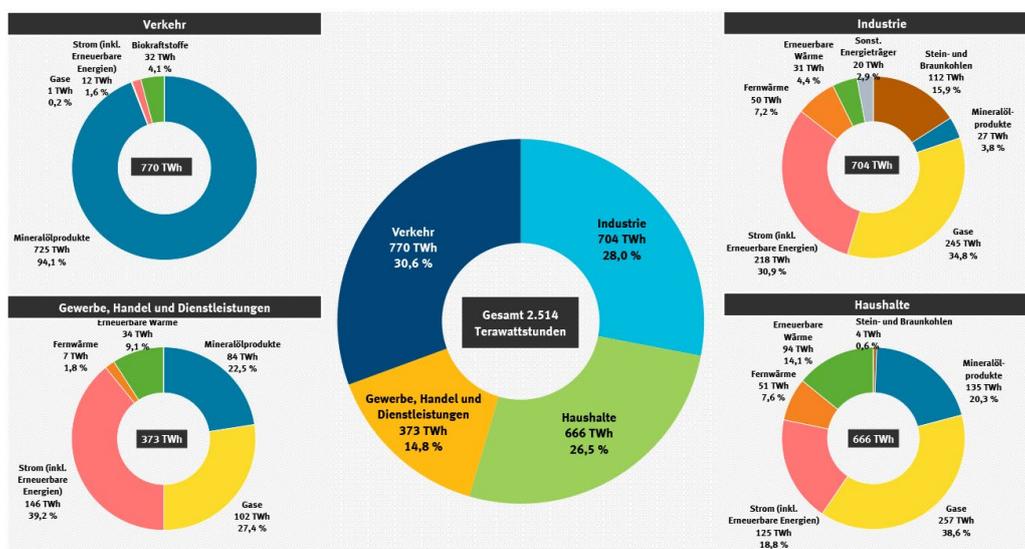
Abbildung 2: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern – 1990 und 2020, in Petajoule und %



Quelle: UBA (2021b)

Eine Differenzierung des Endenergieverbrauchs im Jahr 2019 nach verbrauchenden Sektoren und Energieträgern findet sich in Abbildung 3. Insgesamt verteilte sich der Endenergieverbrauch 2019 in Deutschland zu 30,6 Prozent auf den Verkehrssektor, zu 28 Prozent auf den Industriesektor, zu 26,5 Prozent auf die Haushalte und 14,8 Prozent des Energieverbrauchs machten Gewerbe, Handel und Dienstleistungen aus. Im Verkehrssektor hat erneuerbarer Strom nur einen Anteil von 1,6 Prozent am Endenergieverbrauch, während Mineralölprodukte mit knapp 95 Prozent den Großteil innehaben. Jedoch zeigt sich bei einer Betrachtung über die Zeit, dass aufgrund der steigenden Zulassungszahlen elektrisch betriebener Fahrzeuge, der Verbrauch an erneuerbarem Strom zunimmt (vgl. AGEE-STAT 2021; KBA 2021). In den privaten Haushalten sowie im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen macht erneuerbare Wärme bereits rund 14 bzw. knapp zehn Prozent des Endenergieverbrauchs aus. Dies ist auf eine verstärkte Nutzung von Wärmepumpen zurückzuführen und es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend weiter verstärken wird und so die Bereitstellung von Wärme weiter dekarbonisiert werden kann (vgl. AGEE-STAT 2021).

Abbildung 3: Endenergieverbrauch nach Sektoren und Energieträgern – 2019 (vorläufige Ergebnisse), in TWh und %



Quelle: UBA (2021a)

2.3. Treibhausgasemissionen der Sektoren

Im Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 finden sich aktuelle Werte der Treibhausgasemissionen der Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr, Land- und Abfallwirtschaft im Jahre 2020 sowie verbindliche Jahresziele für eben diese, die Emissionen auf einen bestimmten Wert zu reduzieren (vgl. BMU 2021; Abbildung 3). Als Sektor mit den geringsten ausgestoßenen Treibhausgasemissionen wird „Abfallwirtschaft und Sonstiges“ aufgeführt. Die Jahresemissionsmenge von etwa 9 Mio. Tonnen (t) CO₂-Äquivalent soll bis 2022 auf 8 Mio. und bis 2030 auf höchstens 4 Mio. gesenkt werden. 70 Mio. t CO₂-Äquivalent produzierte die Landwirtschaft 2020, bis 2022 soll sich diese Zahl auf 67 Mio. t, bis 2030 schließlich auf 56 Mio. t reduzieren. Ähnlich verhält es sich mit dem Gebäudesektor, welcher 2020 118 Mio. t ausstieß und 2022 10 Mio. t weniger und 2030 51 Mio. t weniger aufweisen soll. Ebenso sieht das Gesetz eine Minderung der 150 Mio. t CO₂-Äquivalent des Verkehrssektors vor, bis 2022 auf 139 Mio. t, bis 2030 schließlich auf 85 Mio. t. Die Industrie muss ihre 186 Mio. t CO₂-Äquivalent auf 177 (2022), bzw. 118 (2030) reduzieren. Als Sektor mit der mit Abstand höchsten Menge an ausgestoßenen Treibhausgasemissionen muss sich die Energiewirtschaft als einziger Sektor um eine Emissionssenkung um mehr als 60 Prozent bemühen. Während 2020 noch 280 Mio. t CO₂-Äquivalent zu Buche standen, sind für 2022 höchstens 257 Mio. t und für 2030 höchstens 108 Mio. t vorgesehen.

Abbildung 4: Jahresemissionsmenge nach Sektoren aus dem aktualisierten Klimaschutzgesetz 2021 – 2020 bis 2030, in Mio. t CO₂-Äquivalent

Jahresemissionsmenge in Mio. Tonnen CO ₂ -Äquivalent	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energiewirtschaft	280		257								175 108
Industrie	186	182	177	172	168 165	163 157	158 149	154 140	149 132	145 125	140 118
Gebäude	118	113	108	102	99 97	94 92	89 87	84 82	80 77	75 72	70 67
Verkehr	150	145	139	134	128	123	117	112	106 105	101 96	95 85
Landwirtschaft	70	68	67	66	65	64 63	63 62	61	60 59	59 57	58 56
Abfallwirtschaft und Sonstiges	9	9	8	8	7	7	7 6	6	6 5	5	5 4

Anlage 3 (zu § 4) – Jährliche Minderungsziele für die Jahre 2031 bis 2040										
	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Jährliche Minderungsziele gegenüber 1990	67%	70%	72%	74%	77%	79%	81%	83%	86%	88%

Quelle: BMU (2021)

Darüber hinaus sieht das Klimaschutzgesetz bis 2030 mindestens eine 65-prozentige Gesamttreibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 vor (vgl. BMU 2021). 2040 sollen sich Treibhausgasemissionen um mindestens 88 Prozent gesenkt haben, im Vergleich zu 1990. Spätestens 2045 soll Treibhausgasneutralität erreicht sein und ab 2050 sind negative Emissionen vorgeschrieben. Letzteres bezeichnet einen Zustand, in welchem in Deutschland mehr Treibhausgase in natürliche Senken eingebunden als in Deutschland ausgestoßen werden (vgl. BUNDESREGIERUNG 2021b).

3 Wasserstoff als Energieträger der Zukunft?

Im Zuge der Energiewende erhalten Erneuerbare Energien eine besondere Bedeutung. Diese bergen jedoch eine Unsicherheit der Einspeisung ins Stromnetz, da diese unter Umständen stark fluktuieren kann, wie es sich bspw. in 2021 gezeigt hat (vgl. Kapitel 2.1). So ist es erforderlich, windschwächere und sonnenärmere Zeitabschnitte durch die Speicherung von Erneuerbaren Energien auszugleichen (vgl. STERNER/STADLER 2014). Damit ist zukünftig in stärkerem Maße eine CO₂-neutrale Speicherung von elektrischem Strom notwendig, um eine Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern sicher zu stellen. Laut STERNER und STADLER (2014) stellen chemische Energiespeicher angesichts der hierzulande vorhandenen Gas- und Kraftstoffinfrastruktur die einzige Möglichkeit der Langzeitspeicherung von Erneuerbaren Energien dar. Grund dafür ist auch, dass sich bspw. die rein elektrische Energiespeicherung mittels Batterien aus Kosten- und Kapazitätsgründen nicht für eine verlustarme Langzeitspeicherung eignet.

Im Rahmen dieser Diskussion erhält Wasserstoff als chemischer Energieträger eine besondere Bedeutung. Das vorliegende Kapitel stellt dazu zunächst dar, welche Eigenschaften Wasserstoff aufweist, anhand welcher Verfahren er gewonnen werden kann und welche CO₂-Bilanzen diese Verfahren aufweisen.

Wasserstoff steht an der ersten Stelle des Periodensystems der chemischen Elemente und stellt in Reinform ein geruchs- und farbloses Gas dar. Rund die Hälfte der Erdkruste besteht aus Wasserstoff und somit stellt es das häufigste Element der Erde dar. Dabei liegt es jedoch fast ausschließlich in gebundener Form in Verbindungen mit anderen Elementen vor wie bspw. als Kohlenwasserstoff oder Wasser. In Reinform ist es das leichteste Gas und verfügt mit 33,33 Kilowattstunden (kWh) pro Kilogramm (kg) über die höchste gravimetrische Energiedichte (Energie pro Gewicht bzw. Masse) unter den Gasen. Da es in andere Energieträger wie bspw. Ammoniak oder Methan umgewandelt werden kann, ist es flexibel in den Bereichen Strom(-speicherung), Wärme und Verkehr einsetzbar. Unter Normalbedingungen liegt die volumetrische Energiedichte (Energie pro Volumen) von Wasserstoff jedoch bei nur 3 kWh pro Kubikmeter, was der geringsten volumetrischen Energiedichte unter den chemischen Energieträgern entspricht. Zudem ist es leicht entflammbar und kann zu Schäden an Metall und Dichtungen in Tanks oder Leitungen führen (vgl. STERNER/STADLER 2014).

Es gibt verschiedene Verfahren, mit denen reiner Wasserstoff aus wasserstoffreichen Grundstoffen (wie Wasser oder Methan) abgespalten werden kann. Diese kommen teilweise bereits heute in industriellen Herstellungsprozessen zum Einsatz, da Wasserstoff unter anderem zur Synthese von Ammoniak oder zur Raffinierung von Rohöl verwendet wird (vgl. IKEM 2020). Diese Verfahren unterscheiden sich je nach Ausgangsstoff und Emissionslast und werden in der Bezeichnung nach Farben unterschieden:

Grauer Wasserstoff wird mittels Dampfreformierung aus fossilem Erdgas gewonnen. Dabei entstehen hohe CO₂-Emissionen und die durchschnittliche Treibhausgasbelastung von grauem Wasserstoff wird pro kWh auf rund 398 Gramm (g) CO₂-Äquivalent geschätzt. Die Angaben beziehen sich dabei auf eine sogenannte Lebenszyklus-Betrachtung (vgl. PARKINSON u. a. 2019; BEE 2020).

Die Herstellung von **blauem Wasserstoff** erfolgt ebenfalls mittels Dampfreformierung von Erdgas, jedoch werden die dabei entstehenden CO₂-Emissionen abgeschieden und unterirdisch eingelagert (Carbon Capture and Storage, CCS) (vgl. BEE 2020). Unter einer Lebenszyklus-Betrachtung, die ebenso die durch die Förderung, Aufbereitung und den Transport des Erdgases entstehenden Emissionen berücksichtigt, ergibt sich eine Belastung von 168 g CO₂-Äquivalent pro kWh (vgl. PARKINSON u. a. 2019).

Türkiser Wasserstoff wird mittels Methanpyrolyse gewonnen, einem Verfahren, welches Methan durch thermische Spaltung in Wasserstoff und festen Kohlenstoff trennt. Damit entstehen im Vergleich zum Dampfreformierungsverfahren keine CO₂-Emissionen. Die Lebenszyklus-Emissionslast schätzen PARKINSON u. a. (2019) auf 183 g CO₂-Äquivalent pro kWh.

Darüber hinaus existiert das Verfahren der Wasserelektrolyse, bei dem mittels Strom Wasser in seine zugrundeliegenden Elemente Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten wird. Bei diesem Verfahren kommen sogenannte Elektrolyseure zum Einsatz, die auf alkalischer Elektrolyse, Membranelektrolyse oder Wasserdampfelektrolyse basieren (vgl. EUWID 2019). Je nachdem aus welcher Quelle der dafür eingesetzte Strom entstammt, entstehen unterschiedliche Emissionslasten. So wird für **grünen Wasserstoff** ausschließlich Strom aus Erneuerbaren Energien eingesetzt (vgl. BEE 2020). Die Lebenszyklus-Emissionslast liegt Schätzungen zufolge zwischen 26 und 66 g CO₂-Äquivalent pro kWh (Wind- vs. Solarenergie). Diese erhebliche Reduzierung im Vergleich zu den zuvor genannten Verfahren ist darauf zurückzuführen, dass lediglich durch den Bau der Wind- und Photovoltaikanlagen, jedoch nicht durch das Elektrolyseverfahren selbst CO₂-Emissionen entstehen (vgl. PARKINSON u. a. 2019). Für die Herstellung von **gelbem Wasserstoff** ist ein Strommix verschiedener Energiequellen erlaubt, wodurch die Emissionslast hier nicht genau bestimmt werden kann. **Pinker Wasserstoff** wird mittels Atomstrom erzeugt.⁴

Aktuell wird grauer Wasserstoff bereits in großem Stil in der Industrie hergestellt und verwendet. Im Energiesystem spielt er dagegen bisher kaum eine Rolle. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass es insbesondere bei den Elektrolyseverfahren noch an Kostendegressionen und einer Erhöhung des Wirkungsgrades fehlt, damit die Herstellung von grünem Wasserstoff kosten- und energieeffizient erfolgen kann (vgl. BEE 2020; KAISER/MALANOWSKI 2020). Langfristig könnte nachhaltiger Wasserstoff eventuell auch in Bioreaktoren synthetisiert werden (vgl. KOLBE/LECHTENBÖHMER/FISCHEDICK 2020).

Laut der Nationalen Wasserstoffstrategie stellt grüner Wasserstoff die einzige auf Dauer nachhaltige Option dar. Es wird jedoch ebenso eingeräumt, dass blauem und türkischem Wasserstoff im internationalen (europäischen) Handel eine wichtige Rolle zukommen wird, sodass zumindest übergangsweise ebenso blauer und türkiser Wasserstoff in Deutschland zum Einsatz kommen werden (vgl. BMWi 2020). KAISER und MALANOWSKI (2020) führen ebenso ökonomische Gründe dafür auf, dass ein zügiger Markthochlauf ausschließlich auf Basis von grünem Wasserstoff nicht möglich sei und daher blauer und türkiser Wasserstoff vorübergehend zum Einsatz kommen würden.

4 Folgen der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ in Deutschland: Aktueller Forschungsstand

Der vorliegende Abschnitt stellt den aktuellen Forschungsstand bezüglich des Aufbaus und des Betriebs der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ in Deutschland dar. Dabei stehen bei bisherigen Studien zumeist eingesparte Treibhausgasemissionen, zu erzeugende und zu importierende Energiemengen und teilweise die dafür erforderlichen Investitionskosten im Vordergrund (vgl. u. a. AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019; IRENA 2020; FRAUNHOFER 2019). Sich im Rahmen dieses Prozesses ergebende Fachkräftebedarfe werden dagegen – wenn überhaupt – angeschnitten und qualitativ berücksichtigt. Eine Ausnahme stellen hier KRICHEWSKY-WEGENER, ABEL und BOVENSCHULTE (2020) dar, die explizit die Aus- und Weiterbildungsbedarfe im Rahmen dieses Transformationsprozesses in den Blick nehmen – jedoch lediglich auf qualitativer Ebene. Daher werden im Folgenden ebenso bisherige Ergebnisse aus den BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen

⁴ Aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage schätzen PARKINSON u. a. (2019) für Wasserstoff der mittels Wasserelektrolyse anhand von Atomstrom erzeugt wird, keine Lebenszyklus-Emissionslast.

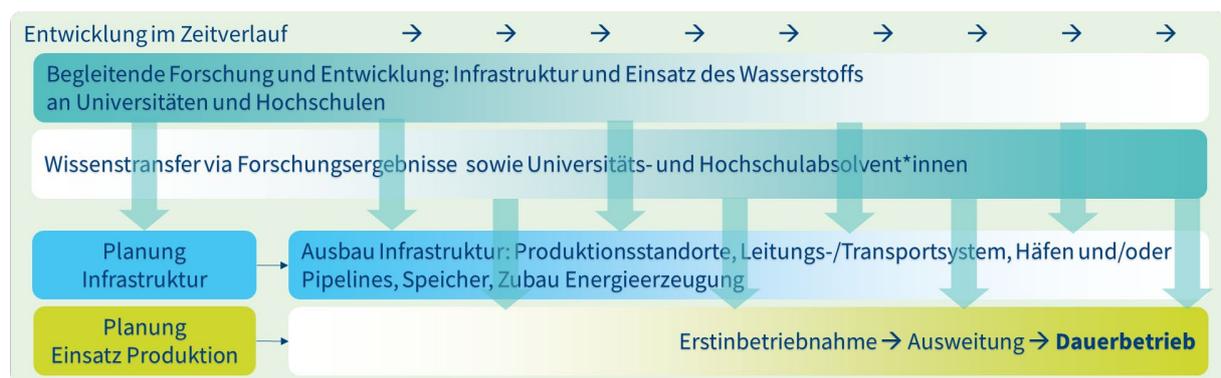
(QuBe, www.QuBe-Projekt.de) mit einbezogen. Diese werden unter der gemeinsamen Leitung des BIBB und des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS) durchgeführt. Anhand von Modellrechnungen zeigen sie konsistente Entwicklungspfade auf, wie sich die Wirtschaft und der Arbeitsmarkt in Deutschland bis zum Jahr 2040 entwickeln könnten. Arbeitskräfteangebot und -bedarf lassen sich dabei getrennt nach 63 Wirtschaftszweigen, 144 Berufsgruppen (Dreisteller der Klassifikation der Berufe 2010) sowie vier Qualifikations- bzw. Anforderungsniveaus ausweisen. Zudem wurde mit der adjustierten Suchdauer ein Indikator zur Beurteilung der Fachkräftesituation aus Betriebsicht entwickelt (vgl. MAIER/STEEG/ZIKA 2020). Im Rahmen des Projektes wurden bereits Szenariorechnungen durchgeführt, um Wirkungen von bestimmten Maßnahmen auf den Arbeitsmarkt aufzuzeigen oder alternative Entwicklungspfade zu analysieren. Dies wurde bspw. bereits im Kontext der Industrie 4.0 (vgl. WOLTER u. a. 2015), Wirtschaft 4.0 (vgl. WOLTER u. a. 2016; 2019), der Elektromobilität (vgl. Mönnig u. a. 2018) und des Klimaschutzprogramms 2030 (vgl. MÖNNIG u. a. 2020) analysiert. Diese bisherigen Ergebnisse aus dem QuBe-Projekt lassen sich teilweise indikativ auch auf die Wasserstoffwirtschaft übertragen und werden daher im Folgenden mit einbezogen.

Grundsätzlich muss zwischen Aufbau und Betrieb einer Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ unterschieden werden, da es in Deutschland bis auf einzelne Pilotprojekte bislang keine Infrastruktur für eine Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ gibt. So gibt dieses Kapitel zunächst einen umfangreichen Überblick zu den einzelnen Phasen des **Aufbaus** der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ und den sich dafür abzeichnenden Investitions- und Fachkräftebedarfen (Abschnitt 4.1). Daraufhin wird der **Betrieb** der Wasserstoffwirtschaft und ihre drei Bestandteile – Erzeugung, Transport und Nutzung von grünem Wasserstoff – genauer betrachtet (Abschnitt 4.2).

4.1 Aufbau der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“

Es gibt mehrere Phasen der Implementierung der Wasserstofftechnologie, welche in Abbildung 5 schematisch dargestellt sind. So besteht in bisherigen Studien Konsens, dass die Transformation zur Wasserstoffwirtschaft mit erheblichen Infrastrukturinvestitionen und der Umstellung auf neue Technologien in Produktionsprozessen verbunden ist (vgl. AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019; FRAUNHOFER 2019; IEA 2019; IRENA 2020).

Abbildung 5: Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ – Aufbau



Quelle: Eigene Darstellung

Forschung und Entwicklung

Bevor diese Prozesse jedoch überhaupt angestoßen werden können, sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen. Dabei handelt es sich um einen laufenden Prozess, der insbesondere zu Beginn der Transformation zur Wasserstoffwirtschaft von Bedeutung ist. So bestehen

der BOSTON CONSULTING GROUP (BCG) und PROGNOSE (2018), AGORA ENERGIEWENDE und WUPPERTAL INSTITUT (2019) sowie FRAUNHOFER (2019) zufolge erhebliche Forschungsbedarfe in den Bereichen:

- **Elektrolyse**

Elektrolyse stellt die zentrale Technologie zur Gewinnung von grünem Wasserstoff dar (vgl. Abschnitt 3). Der Einsatz von Elektrolyseuren ermöglicht die Umwandlung von erneuerbarem Strom in Wasserstoff und somit dessen Speicherung und zeitlich unabhängige Verwendung. Damit leistet die Elektrolyse in der Wasserstoffwirtschaft einen entscheidenden Beitrag, um Schwankungen im Energiesystem auszugleichen und damit die Versorgungssicherheit zu gewährleisten (vgl. BMVI 2018).

Forschungsbedarf besteht hier zum einen hinsichtlich der Effizienz, Lebensdauer der Elektrolyseure sowie des Strom- und Materialeinsatzes. Zudem könnte zukünftig auch mittels Algen und Bakterien die biogene Herstellung von Wasserstoff erfolgen. Zum anderen spielt sich die Herstellung von Elektrolyseuren aktuell auf Manufakturniveau ab, wo Skaleneffekte und Automatisierungspotenziale in der Produktion noch auszuschöpfen sind. Damit lassen sich langfristig die Kosten der Elektrolyse erheblich reduzieren.

- **Speicherung und Transport von Wasserstoff**

Da Wasserstoff bei Normaldruck und -temperatur eine geringe volumetrische Energiedichte aufweist (vgl. Abschnitt 3), sind Transport- und Speicherkonzepte weiterzuentwickeln. Technologien zur Minimierung von Verflüchtigungen sowie der Reinhaltung des Wasserstoffs sind ebenso weiterzuentwickeln.

- **Einsatz von Wasserstoff in der Industrie**

Es stehen wasserstoffbasierte Alternativlösungen zur Verfügung, welche eine Dekarbonisierung des Industriesektors ermöglichen. Dazu zählen bspw. das Schließen von (Kohlen-)Stoffkreisläufen in der Chemiebranche. So lassen sich unter Einsatz von Wasserstoff stoffliche Produkte wie Methanol oder Ammoniak herstellen. Wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren machen in der Stahlproduktion den Einsatz fossiler Energieträger obsolet. In der Zementindustrie lassen sich zudem CCS-Technologien realisieren sowie in Produktionsprozessen entstehender Kohlenstoff weiter nutzen (Carbon capture and utilization, CCU). Die genannten Verfahren werden bislang nur in kleinerem industriellem Maßstab realisiert und befinden sich vornehmlich in der Erprobungsphase. Damit diese in Zukunft kostengünstig und flächendeckend eingesetzt werden können, bedarf es weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

- **Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätssystem**

Im Mobilitätssystem lässt sich Wasserstoff als Treibstoff für brennstoffzellbasierte Fahrzeuge oder als Grundlage für synthetische Kraftstoffe einsetzen. Dies ist besonders für Verkehrsträger relevant, bei denen eine ausschließliche direkte Versorgung mit Strom nicht oder nur mit großem Aufwand umsetzbar ist. Dies betrifft etwa den Langstrecken-Straßengüterverkehr, See- und Flugverkehr (vgl. BCG/ PROGNOSE 2018; FRAUNHOFER 2020). Dazu ist jedoch eine Weiterentwicklung der Brennstoffzellen-Antriebe und synthetischen Kraftstoffe erforderlich. Zudem ist der Ausbau von Wasserstoff-Tankstellen für eine Marktdurchdringung notwendig. Ähnlich wie bei Elektrolyseuren sprechen hier die Lebensdauer und der Bedarf an knappen Rohstoffen in der Produktion von Brennstoffzellen aktuell noch gegen einen flächendeckenden Einsatz. Des Weiteren bestehen Wasserstofftanks für mobile Anwendungen noch häufig aus nicht wiederverwendbaren Werkstoffen, was der Nachhaltigkeit Wasserstoffs im Mobilitätssektor entgegenwirkt (vgl. FRAUNHOFER 2020).

- **Einsatz von Wasserstoff im Wärme- und Stromnetz**

Im Gebäudesektor spielen laut dem BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIEN (BEE) (2020) neben Wasserstoff zunächst die direkte Nutzung lokal verfügbarer Erneuerbarer Energien, Abwärme und transportierbare Biomasse eine zentrale Rolle für die zukünftige Bereitstellung von Fernwärme. Erst wenn diese Potenziale ausgeschöpft sind, kann grüner Wasserstoff das Wärmenetz vollkommen dekarbonisieren. Für die Stromversorgung stehen bereits aktuell wasserstoffkompatible Gasturbinen zur Verfügung. Für ihren größeren Einsatz ist jedoch insbesondere aufgrund stärkerer Kostendegressionen weitere Forschung und Entwicklung notwendig.

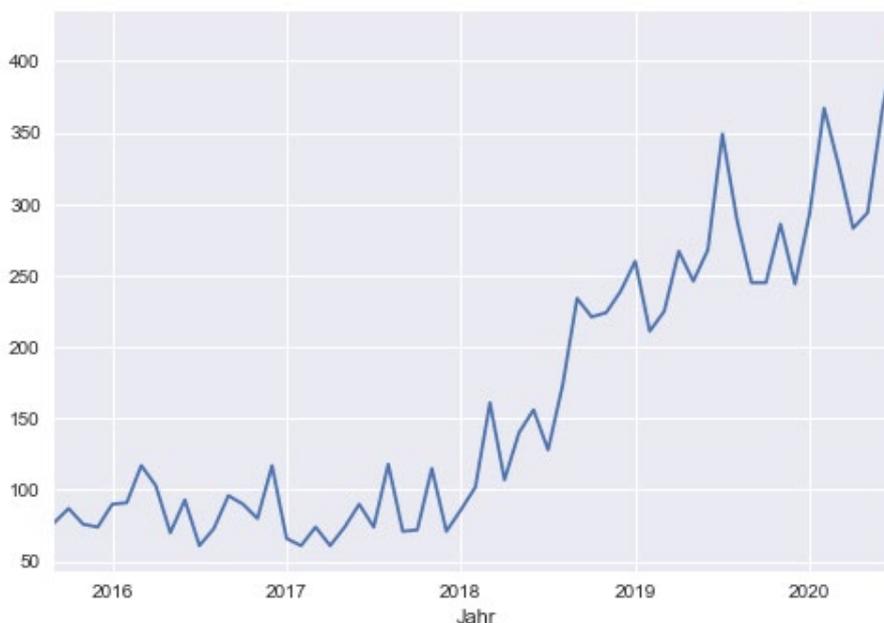
Wissenstransfer

Parallel zu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gewinnt der Wissenstransfer von den Bildungs- und Forschungseinrichtungen nach außen an Bedeutung (vgl. Abbildung 5). Wenn Wasserstofftechnologien zunehmend in Curricula der Bildungsgänge aufgenommen werden, werden zukünftig zunehmend Absolventinnen und Absolventen der Hochschulen und Universitäten dieses Wissen in die betriebliche Praxis überführen können. Da Hochschulen und Universitäten die Ausgestaltung ihrer Studienordnungen individuell vornehmen, können diese neue Forschungsinhalte auch schneller in die Lehrpläne aufnehmen als es bspw. bei bundes- oder landesweit geregelten Aus- und Fortbildungsgängen der Fall ist.

Infolgedessen werden im Zuge des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft gänzlich neue Berufe entstehen (müssen). BEZDEK (2019, S. 4) listet exemplarisch neu entstehende Berufe in der Wasserstoffwirtschaft auf, wie den „Hydrogen plant operations manager“, den „Hydrogen lab technician“ oder den „Director of hydrogen energy development“.

Diese Entwicklungen ziehen bereits aktuell einen Bedarf an Fachkräften nach sich. Dies zeigt eine aktuelle Auswertung der BIBB-Online Stellenanzeigen, der zufolge die Zahl der Stellenanzeigen mit einem Kontext „Wasserstoff“ stetig ansteigt (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Anzahl von Stellenanzeigen mit einem Bezug zum Begriff „Wasserstoff“



Quelle: BIBB-Online Stellenanzeigen-Pool, eigene Berechnung, 2021

Diese Stellenanzeigen finden sich vor allem im Bereich Forschung und Entwicklung und dem Produzierenden Gewerbe und insbesondere in Nordrhein-Westfalen (NRW) und Baden-Württemberg.

Auch GRIMM, JANSER und STOPS (2021) zeigen anhand von Auswertungen der Stellenanzeigen der Jobbörse der Bundesagentur für Arbeit, dass Kompetenzen mit Bezug zu Wasserstofftechnologien (kurz: H₂-Kompetenzen) über Stellenanzeigen bereits nachgefragt werden. Stellenanzeigen mit Bezug zu Wasserstofftechnologien umfassen 2019 nur einen sehr geringen Teil der ausgewerteten Anzeigen (< 0,01 %). Da sich Deutschland jedoch noch am Beginn der Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft befindet, lassen sich daraus Rückschlüsse ziehen über Betriebe, Berufe und Anforderungsniveaus, die mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Verbindung stehen. So zeigt sich, dass H₂-Kompetenzen aktuell vornehmlich im öffentlichen Dienst und den darin verorteten öffentlichen Forschungseinrichtungen sowie im Produzierenden Gewerbe nachgefragt werden. Dabei konzentrieren sich die Ausschreibungen auf Berufe in den Bereichen „Technische Forschung und Entwicklung“, „Maschinenbau- und Betriebstechnik“, „Elektrotechnik“, „Chemie“ und „Energietechnik“. Wasserstofftechnologien werden damit bereits heute in diesen Berufs-Branchen-Kombinationen vorangetrieben. GRIMM, JANSER und STOPS (2021) zufolge handelt es sich dabei vornehmlich um Stellen mit Expertentätigkeiten. Es erscheint plausibel, dass sich auch zukünftig der Bedarf an Fachkräften auf diese Bereiche im Rahmen der Forschungs-, Entwicklungs- und Transferphase konzentrieren wird. Zudem ist ein steigender Bedarf in den Lehr- und Forschungstätigkeiten in den zuvor genannten Fachbereichen durch die Universitäten und Hochschulen zu erwarten. Darüber hinaus zeigen GRIMM, JANSER und STOPS (2021), dass gegenwärtig keine Stellen mit H₂-Kompetenzen auf dem Niveau von Helfer- und Anlernertätigkeiten ausgeschrieben sind. Damit werden die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe der Wasserstoffwirtschaft zu einem höheren Bedarf an Fachkräften, insbesondere auf Expertenniveau führen.

Im Rahmen des QuBe-Projektes wurden bereits verschiedene Szenarioanalysen durchgeführt, in denen die Effekte eines Wandels im Wirtschaftssystem auf den Arbeitsmarkt beleuchtet wurden. Dazu zählen u. a. MÖNNIG u. a. (2018, 2021a), die die Folgen von Veränderungen im Mobilitätssektor (Elektromobilität, Mobilitätsverhalten) für den Arbeitsmarkt untersuchen. Dabei werden in beiden Szenarien zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsausgaben der Automobilindustrie angenommen. Diese dienen dem Aufbau neuer Produktionslinien im Rahmen einer Umstellung auf Elektromobilität. In beiden Studien ziehen diese zusätzlichen Ausgaben positive Beschäftigungseffekte nach sich. Diese flachen jedoch aufgrund der annahmegemäßen zeitlichen Begrenzung der zusätzlichen Forschungsanstrengungen verhältnismäßig schnell wieder ab. Mit Blick auf die für die Wasserstoffwirtschaft erforderlichen Forschungsbedarfe und die in der Nationalen Wasserstoffstrategie angesetzten Fördermittel ist davon auszugehen, dass die Beschäftigungszuwächse hier höher ausfallen werden als in den bisherigen QuBe-Studien.

Planung und Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur

Mit dem zunehmenden Erkenntnisgewinn in der Forschung und Entwicklung kann sich der Planung und dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur gewidmet werden (vgl. Abbildung 5). Diese umfasst im Wesentlichen die folgenden Punkte:

- **Wettbewerbsfähige Elektrolyse-Industrie**

Die Wasserelektrolyse stellt einen zentralen Bestandteil der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ dar. Damit ist der Aufbau einer wettbewerbsfähigen Elektrolyse-Industrie in Deutschland eine Grundvoraussetzung für die Sicherung von Innovations- und Wirtschaftsleistung sowie Arbeitsplätzen im Zuge der Energiewende (vgl. FRAUNHOFER 2019; BMVI 2018). Dazu zählt neben dem Auf- und Ausbau von Produktionsstätten für Elektrolyseure ebenso die Etablierung von Zulieferketten. Neben einer Investitionsförderung für Power-to-Gas-Anlagen, sollte dem Agora

Energiewende Direktor Patrick Graichen zufolge eine Experimentierklausel eingeführt werden, um den Betrieb von Elektrolyseuren wirtschaftlicher zu gestalten (vgl. GRAICHEN 2020). Diese Klausel hätte eine komplette Steuer-, Abgabe- und Umlagebefreiung für Power-to-Gas-Anlagen zur Folge.

- **Wasserstoff-Pipeline-Netz**

Da Wasserstoff die flexible und damit zeit- und ortsunabhängige Nutzung von Erneuerbaren Energien ermöglicht, ist ebenso der Auf- und Ausbau eines entsprechenden Wasserstoff-Pipeline-Netzes erforderlich. Dies ist aufgrund der dort angesiedelten Stahl- und Chemieindustrie insbesondere entlang des Rheins von zentraler Bedeutung (vgl. FRAUNHOFER 2019). Wobei es ebenso plausibel erscheint, dass sie ihre Produktionsstandorte an die Küstenregionen verlagern, da sich dort größere Potenziale der Gewinnung von erneuerbarem Strom aus Windenergie und damit der Herstellung von grünem Wasserstoff ergeben (vgl. IRENA 2020).

Laut dem BEE (2020) kann eine Beimischung von Wasserstoff im Erdgasnetz zu Permeation und Korrosion führen, wodurch diese nur in geringem Umfang ausfallen kann. Da die Industriebetriebe diesen ohnehin in Reinform benötigen, ist demnach der Aufbau eines separaten Wasserstoffverleitungsnetzes unausweichlich. Laut der DEUTSCHEN ENERGIE-AGENTUR (DENA) (2018) ist dagegen ein Wasserstoff-Pipeline-Netz durch eine einfache Umrüstung der bereits bestehenden Erdgasinfrastruktur möglich. Ähnlich lautet die Einschätzung des NATIONALEN WASSERSTOFFRATES (2021). Demnach lassen sich Erdgasleitungen zwar auf Wasserstoff umstellen, eine Erweiterung um neue Wasserstoffleitungen sei jedoch zusätzlich notwendig.

Betont wird zudem die Wichtigkeit einer transnationalen Wasserstoffinfrastruktur auf europäischer Ebene (vgl. GRAICHEN 2020). So könne Deutschland etwa auch vom Bau einer Wasserstoffpipeline zwischen Italien und Nordafrika profitieren. Der NATIONALE WASSERSTOFFRAT (2021) beschreibt ebenso die Notwendigkeit eines europäischen Binnenmarktes für Wasserstoff, um Skaleneffekte zu realisieren. Zusätzlich sei es essentiell, ein robustes Zertifizierungs- und Trackingsystem für Wasserstoff zu etablieren. Bspw. die Herkunft und der Treibhausgas-Fußabdruck des Wasserstoffs würden sich somit einheitlich und grenzübergreifend nachvollziehen lassen. Der Import von grünem Wasserstoff setzt zudem voraus, dass entsprechende Schiffe und Schiffskapazitäten sowie Hafenterminals und (internationale) Pipelinenetze zur Weiterverteilung zur Verfügung stehen.

- **Tankinfrastruktur**

Damit Wasserstoff zukünftig ebenso als Treibstoff im Verkehrssystem genutzt werden kann, bedarf es des Aufbaus einer entsprechenden Betankungsinfrastruktur. So ist davon auszugehen, dass sich der Brennstoffzellenantrieb und die Verwendung von synthetischen Kraftstoffen neben dem batterieelektrischen Antrieb etablieren werden. Nicht zuletzt aufgrund ihrer Vorteile hinsichtlich Reichweite und Betankungsdauer. Dazu zählt neben der Tankinfrastruktur für Brennstoffzellen-Fahrzeuge ebenso ein Schwerlast-Tankstellennetz sowie entsprechende Einrichtungen an Flug- und Wasserhäfen (vgl. FRAUNHOFER 2019; BCG/ PROGNOSE 2018; BMVI 2018). Dem SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU) (2021) zufolge werden gerade im Langstrecken-Straßengüterverkehr und im Flug- und Schiffsverkehr Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe eine wichtige Rolle spielen, da sich die Verwendung von Batterien als nicht praktikabel erweist. Bei Personenkraftwagen wird der Schwerpunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den batterieelektrischen Antrieben liegen, da der Gesamtwirkungsgrad (well to wheel) mit 77 Prozent über dem der Brennstoffzelle (34 %) und bei synthetischen Kraftstoffen (14 %) liegt und die Reichweite für den privaten Fahrbetrieb ausreicht (vgl. SRU 2021).

- **Zubau der Erneuerbaren Energien**

Der Umstieg von fossilen Energieträgern auf Strom und Wasserstofftechnologien im Energie-, Industrie- und Verkehrssystem trägt nur zu einer Dekarbonisierung des Wirtschaftssystems bei, wenn der Strom und der Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden. Dabei zeigen verschiedene Klimaschutzszenarien für Deutschland, dass der Ausbau an Windkraft- sowie Photovoltaikanlagen deutlich dynamischer erfolgen muss als in der Vergangenheit. Andernfalls stünde die Erreichung der Klimaziele in Frage bzw. wäre Deutschland in (zu) hohem Maße von teuren Strom- bzw. Wasserstoffimporten abhängig (vgl. AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019; BCG/ PROGNOSE 2018). Gemäß FRAUNHOFER (2019) liegen die energiewirtschaftlich sinnvoll realisierbaren Potenziale Erneuerbarer Energien langfristig bei 1000 TWh pro Jahr. Im Jahr 2020 wurden lediglich rund ein Viertel dieser Energiemengen in Deutschland durch erneuerbare Energiequellen gewonnen (vgl. Abschnitt 2.1).

Dieser umfangreiche Ausbau der Infrastruktur wird entsprechende Investitionen und daraus resultierende Arbeitskräftebedarfe nach sich ziehen. So ist davon auszugehen, dass insbesondere die Baubranche von diesen Entwicklungen profitieren wird. Ebenso ihr vorgelagerte Branchen wie Zulieferbetriebe von Baumaterialien, Architekturbüros und ebenso die Verwaltung dürften von diesen Entwicklungen profitieren.

Neben den bereits erwähnten Studien MÖNNIG u. a. (2018; 2018; 2021A) wurden im Rahmen des QuBe-Projektes weitere Szenarioanalysen durchgeführt, in denen die Effekte eines Wandels im Wirtschaftssystem auf den Arbeitsmarkt beleuchtet wurden. Dazu zählen zum einen WOLTER u. a. (2015; 2016; 2019), die die Folgen einer beschleunigten Digitalisierung für den Arbeitsmarkt untersuchen. MÖNNIG u. a. (2020; 2021b) zeigen zudem Entwicklungspfade auf, die aus zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen resultieren.

Dabei ist sämtlichen Studien gemein, dass in den darin gezeichneten Szenarien zunächst umfangreiche Bau- und Ausrüstungsinvestitionen getätigt werden, um einen Regimewechsel im Verkehrswesen, die Transformation zu einer digitalisierten Wirtschaft bzw. den Wandel zu einer klimafreundlicheren Wirtschaftsweise zu ermöglichen. Der Umfang und die Art der Investitionen unterscheiden sich dabei je nach Szenario. So berücksichtigen MÖNNIG u. a. (2018; 2021a) u. a. einen Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektro-Fahrzeuge, den Ausbau des Stromnetzes sowie Investitionen in die Schieneninfrastruktur. Dagegen liegt in WOLTER u. a. (2015; 2016; 2019) der Fokus auf dem Ausbau von Breitbandnetzen sowie der Erweiterung und dem Umbau des Kapitalstocks. Der Weg zu einer ökologischeren Wirtschaftsweise wird bei MÖNNIG u. a. (2020; 2021b) dagegen u. a. durch Investitionen in die Energieversorgung, Gebäudesanierung sowie in die Verkehrsinfrastruktur (Ladesäulen, H₂-Tankstellen, Oberleitungssysteme) geebnet.

Erwartungsgemäß führen diese Mehrinvestitionen in sämtlichen Szenarioanalysen zu positiven Beschäftigungseffekten. Dabei ziehen besonders die Investitionen in die digitale sowie Verkehrsinfrastruktur und das Stromnetz starke Beschäftigungszuwächse nach sich, da diese vornehmlich der beschäftigungsintensiven Baubranche zukommen. Darüber hinaus profitieren von solchen Maßnahmen Wirtschaftszweige, die der Baubranche vorgelagert sind, wie etwa Architektur- oder sonstige Unternehmensdienstleister. Ebenso zeigen sich zumeist höhere Personalbedarfe in den Berufen der Unternehmensorganisation und -strategie sowie den Büro- und Sekretariatsberufen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Berufe in sämtlichen Branchen vertreten sind und damit von einer allgemein dynamischeren Wirtschaftsentwicklung profitieren.

Die in den dargestellten Studien angenommenen Bau- und Ausrüstungsinvestitionen entsprechen zwar in ihrem Umfang und ihrer Art nicht den oben aufgeführten erforderlichen Investitionen für den

Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, trotz dessen lassen sich die Ergebnisse zumindest qualitativ darauf übertragen. So erscheint es plausibel, dass auch mit dem Aufbau der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ die Beschäftigung im Bausektor und den ihr vorgelagerten Branchen stark ansteigen wird. KRICHEWSKY-WEGENER, ABEL und BOVENSCHULTE (2020) heben ebenso die Bedeutung von Technikerinnen und Technikern sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren für diesen Transformationsprozess hervor und zeigen zudem die bereits aktuell vorherrschenden Fachkräfteengpässe in diesen Bereichen auf.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) hat das QuBe-Projekt außerdem zusammen mit dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) abgeschätzt, welche Folgen eine deutliche Ausweitung der Bauinvestitionen in Wohnungsbau im Übergang zu einer Green Economy haben werden (vgl. UBA 2017). Dabei zeigt sich, dass steigende Ausgaben für Baumaßnahmen im Zuge der Investitionen in die Gebäudesanierung mit anderen Bauvorhaben in Konkurrenz stehen. Es ist zu erwarten, dass entstehende Engpässe Projekte verteuern, verzögern oder unmöglich machen. Damit besteht beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur ebenso die Gefahr, dass das Baugewerbe den deutlichen Nachfrigesteigerungen aufgrund von Material- oder Personalengpässen nicht nachkommen kann. Diese Branche wird damit in Gänze vor neue Aufgaben gestellt werden und seine Beschäftigtenzahl steigern müssen.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des UBA-Projektes anhand eines etablierten Verfahrens eine Auswertung von Stellenanzeigen und -erhebungen durchgeführt, um Berufe und Branchen zu identifizieren, die bei einem Übergang in eine Green Economy zuvorderst gefragt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem Fachkräfte (Baugewerbe, Industrie) benötigt werden. Gleichwohl kommen Erwerbstätige mit höheren Anforderungsniveaus (Planung, Dienstleistungen) hinzu.

Zusätzliche Beschäftigungseffekte für die Berufe in der Unternehmensorganisation und -strategie sowie dem Büro- und Sekretariatswesen erscheinen anhand der bisherigen QuBe-Studien ebenfalls plausibel. Dies wird zudem von GRIMM, JANSER und STOPS (2021) bestätigt, da ihren Ergebnissen zufolge bereits aktuell Stellen in der Unternehmensorganisation und -strategie ausgeschrieben werden, in denen explizit H₂-Kompetenzen gefragt sind. Somit werden zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft neben fachlich einschlägigen Berufen im Bereich der Elektro- und Energietechnik oder Chemie ebenso Fachkräfte in Berufen gesucht, die die organisatorischen Rahmenbedingungen für Wasserstofftechnologien sicherstellen. Diese verorten GRIMM, JANSER und STOPS (2021) gegenwärtig auf Ebene der Experten- und Fachkrafttätigkeiten.

Planung und Umbau industrieller Prozesse

Mit dem Auf- und Ausbau der Infrastruktur wird die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger für die Industrie zunehmend attraktiver und deren Planung und Umsetzung im laufenden Betrieb werden angegangen (vgl. Abbildung 5, unten). Der ausstehende Forschungsbedarf bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff in der Industrie macht deutlich, dass mit Weiterentwicklung und Umsetzung dieser Technologien in der Praxis erhebliche Umstrukturierungen des Kapitalstocks der Unternehmen anstehen (s.o.).

AGORA ENERGIEWENDE und WUPPERTAL INSTITUT (2019) zufolge verfügt ein Großteil des sich in Deutschland im Einsatz befindlichen Kapitalstocks der Grundstoffindustrie über ein hohes Alter, sodass bis 2030 Reinvestitionsbedarfe von bis zu 59 Prozent (Chemieindustrie) bestehen. Da Produktionsanlagen in der Grundstoffindustrie zumeist hohe Lebensdauern von bis zu 50 Jahren aufweisen und Schlüsseltechnologien aktuell noch nicht (in wirtschaftlichem Maße) einsetzbar sind, könnte in den nächsten Jahren zunächst in Brückentechnologien investiert werden. Dazu zählen bspw. Direktreduktionsanlagen in der Stahlindustrie, welche zunächst mit Erdgas und im weiteren Verlauf mit Wasserstoff betrieben werden. Dies ist ähnlich wie in MÖNNIG u. a. (2021a), wo angenommen

wurde, dass Hybrid-Fahrzeuge eine Brückentechnologie für den Übergang in die Herstellung und Nutzung von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen darstellen. Bezüglich des daraus resultierenden zu erwartenden Fachkräftebedarfs zeigen unsere bisherigen Forschungsergebnisse, dass zu Beginn einer technischen Innovation der Bedarf an Experten und Spezialisten steigt. Dies ebbt mit der Zeit ab und geht über in einen steigenden Bedarf an Fachkräften in der Umsetzung. Dies wäre damit ebenso für die Transformation zur Wasserstoffwirtschaft zu erwarten. Dabei dürften insbesondere Betriebe und Berufe im Bereich Maschinenbau profitieren.

Laut der DENA (2018) werden Wasserstofftechnologien in der Stahl- und Chemiebranche jedoch voraussichtlich nicht vor 2040 in größerem Umfang zum Einsatz kommen. Dies ist auf die langen Investitions- und Innovationszyklen in der Industrie zurückzuführen, welche bis zu 30 Jahre andauern können. Davon entfallen die ersten 15 Jahre auf die Forschung, Entwicklung und Erprobung, während die letzten 15 Jahre der Verbreitung im Markt zukommen. Daraus lässt sich ein zeitlicher Rahmen für die zukünftige Entwicklung im Aufbau der Wasserstoffwirtschaft ableiten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Maßnahmen im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie diesen Prozess voraussichtlich beschleunigen werden. So hat bspw. bereits die Entwicklungen in der Elektromobilität gezeigt, dass politische Weichenstellungen und Fördermaßnahmen die Durchdringung neuer Technologien beschleunigen (vgl. BMU 2020; KBA 2021). Darüber hinaus zeigen verschiedene Szenariorechnungen, dass ein Beibehalten der Innovationszyklen für die Erreichung der Klimaziele nicht ausreichen würde und damit eine Beschleunigung unabdingbar ist (vgl. IRENA 2020). Trotzdem veranschaulichen die erforderlichen Forschungs-, Investitions- und Umstrukturierungsbedarfe, dass sich diese nicht in der kurzen Frist bewerkstelligen lassen.

Insgesamt bestätigen bisherige Studienergebnisse aus dem QuBe-Projekt, dass Veränderungsprozesse keine linearen Prozesse sind, sondern bestimmte Bedarfe zu Beginn an Bedeutung gewinnen und danach auch wieder verlieren, andere erst zeitversetzt auftreten und dann dominant werden, andere wiederum langsam zurückgehen. So zeigt der aktuelle Forschungsstand zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, dass voraussichtlich zunächst Personalbedarfe auf Expertenniveau in einschlägigen Fachrichtungen wie Technische Forschung und Entwicklung, Maschinenbau- und Betriebstechnik, Elektrotechnik, Chemie und Energietechnik an Bedeutung gewinnen werden. Im Zuge des fortschreitenden Infrastrukturausbaus wird insbesondere das Baugewerbe und ihm vorgelagerte Branchen Beschäftigungszuwächse vornehmlich auf Fachkraftniveau verzeichnen können. Im Rahmen der Umstellung von Produktionsprozessen in der Industrie werden daraufhin voraussichtlich Berufe im Bereich des Anlagen- und Maschinenbaus stärker profitieren. Der gesamte Umsetzungsprozess wird dabei voraussichtlich von einem höheren Bedarf an Fachkräften und Experten in den Büro- und Sekretariatsberufen sowie der Unternehmensorganisation- und Strategie begleitet werden. Dabei machen bisherige Studien zudem deutlich, dass diese Beschäftigungszuwächse nicht regional gleichverteilt auftreten werden (vgl. AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019). So zeigen GRIMM, JANSER und STOPS (2021), eine regional ungleiche Verteilung der ausgeschriebenen Stellen mit H₂-Kompetenzen. Sie konzentrieren sich besonders in (1) Regionen mit Schwer- und Grundstoffindustrie (NRW, Niedersachsen, Baden-Württemberg), (2) Regionen im Strukturwandel (z. B. Ruhrgebiet) und (3) Regionen mit entsprechenden Möglichkeiten zur Produktion von Erneuerbaren Energien (Norddeutschland) sowie in Gebieten mit höherer Bevölkerungsdichte.

Ausgehend vom Aufbau der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ geht der Prozess in ihren Betrieb über, auf den im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

4.2 Betrieb der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“

Die sich daraufhin etablierte Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ lässt sich in die drei Phasen *Erzeugung*, *Transport* und *Nutzung* einteilen. Ihr voraussichtlicher Aufbau ist schematisch in Abbildung

7 dargestellt. Daran ist zum einen erkennbar, dass die Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ weiteren Produktionsprozessen vorgelagert ist. So ist zunächst für die Herstellung von grünem Wasserstoff die Energieerzeugung aus Erneuerbaren Energien notwendig. Zudem bedarf es Elektrolyseanlagen sowie dessen Zwischenspeicherung und Zuleitung zu den entsprechenden Bedarfsstellen bevor er in weiteren Produktionsprozessen verwendet wird. Zum anderen zeigt Abbildung 7, dass sich mit der energetischen Nutzung von Wasserstoff in Industrieprozessen weitreichendere Folgen für die Struktur der Wirtschaft und des Arbeitsmarktes in Deutschland ergeben. Die dafür relevanten Punkte werden im Folgenden beleuchtet und ein Ausblick auf die Folgen für das Wirtschaftssystem und den Arbeitsmarkt in Deutschland gegeben.

Abbildung 7: Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ – Betrieb



Quelle: Eigene Darstellung

Forschung und Entwicklung

Über den gesamten Prozess der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ hinweg werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zukünftig weiterhin eine zentrale Rolle spielen. Diese beziehen sich dabei auf sämtliche Prozesse innerhalb der Wasserstoffwirtschaft: Über die Konzeption und Produktion von Elektrolyseuren, die Speicherung und den Transport von Wasserstoff bis hin zu dessen Einsatz in Produktionsprozessen und im Verkehr mit der dafür relevanten Brennstoffzellerfertigung. Dabei wird insbesondere das Ziel der weiteren Kostenreduzierung von Bedeutung sein. So ist der INTERNATIONAL RENEWABLES ENERGY AGENCY (IRENA) (2020) zufolge eine Reduzierung der Kosten zur Gewinnung von grünem Wasserstoff bis 2050 um 75 Prozent erforderlich, um die Erderwärmung auf 1,5 °Celsius zu begrenzen. Die DENA (2018) empfiehlt ebenfalls den Fokus von Forschungsvorhaben auf die weitere Kostendegression zu legen. Die daraus resultierenden Fachkräftebedarfe werden sich dabei voraussichtlich in ihrer Qualität ähnlich zu denen in der Forschungs- und Entwicklungsphase im Aufbau der Wasserstoffwirtschaft bewegen, jedoch auf einem niedrigeren quantitativen Niveau.

Darüber hinaus wird sich insbesondere die Struktur des Produzierenden Gewerbes wandeln. Dies ist vornehmlich auf die wachsende Bedeutung der Elektrolysefertigung („Bau von Maschinen, Anlagen & Installation“ in Abbildung 7) und Brennstoffzellerfertigung für den Mobilitätsbereich („Sonstige Verwendung von Wasserstoff“ in Abbildung 7) zurückzuführen. Elektrolyseure stellen eine Grundvoraussetzung zur Herstellung von grünem Wasserstoff dar, während die Brennstoffzelle den Mobilitätsbereich revolutionieren wird. Dem Betrieb einer umfangreichen Elektrolyseur- und Brennstoffzellerfertigung in Deutschland wird ein hohes wirtschaftliches Marktpotenzial zugesprochen (vgl. HYDROGEN COUNCIL/ MCKINSEY & COMPANY 2021).

Dabei spricht der DEUTSCHE WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLEN-VERBAND E.V. (DWV) (2018) der Elektrolyseur- und Brennstoffzellerfertigung in Deutschland ein Potenzial von rund 70.000 zusätzlichen

Arbeitsplätzen in 2030 zu. In 2050 wird sich dieses Potenzial auf 150.000 zusätzliche Arbeitsplätze belaufen. Dies sei insbesondere darauf zurückzuführen, dass in Wasserstofftechnologien der Rohstoffanteil am Produktionswert deutlich geringer ausfällt als bspw. in der Batteriezellfertigung. Somit besteht dem HYDROGEN COUNCIL und MCKINSEY & COMPANY (2021) zufolge eine um rund 50 Prozent höhere lokale Wertschöpfung in der Elektrolyseur- und Brennstoffzellefertigung gegenüber der Batteriezellfertigung, in der der Automatisierungsgrad deutlich höher ist. Laut dem DWV (2018) werden in der Fertigung von brennstoffzellbetriebenen Fahrzeugen im Gegensatz zu Elektrofahrzeugen zudem ähnlich viele Komponenten verbaut wie es aktuell bei Verbrenner-Modellen der Fall ist. Dies zieht umfangreiche Möglichkeiten für die Automobil- und Maschinenbaubranche in Deutschland nach sich, qualifizierte Arbeitsplätze langfristig zu sichern. Wie hoch diese Beschäftigungspotenziale genau sind, ist allerdings noch unklar und bedarf der Einholung weiterer Expertise aus den entsprechenden Fachkreisen.

Energieerzeugung und Zuleitung

Im Zuge der Energiewende wird mit der zunehmenden Elektrifizierung sowie dem Umstieg auf grünen Wasserstoff in industriellen Prozessen der Strombedarf aus erneuerbaren Energiequellen erheblich ansteigen. Dabei besteht in bisherigen Studien Konsens, dass Deutschland diesen Bedarf mit seiner eigenen Stromproduktion aus Windkraft- und Solaranlagen nicht decken können wird (vgl. BCG/ PROGNOS 2018; HYDROGEN COUNCIL/ MCKINSEY & COMPANY 2021; DENA 2018; BMVI 2018). Damit werden sowohl die Energieerzeugung und Zuleitung aus dem In- und Ausland als auch der direkte Import von grünem Wasserstoff und weiteren synthetischen Flüssigkraftstoffen (Power-to-Liquid) (vgl. Abbildung 7) zunehmen. Grund dafür ist, dass die Produktion und der Transport dieser Energieträger aus dem Ausland günstiger ist als Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland. Dies trifft bspw. auf Nord- und Westafrika zu, wo die Stromgestehungskosten von Solar- und Windkraftanlagen u. a. aufgrund der größeren Flächenpotenziale als in Deutschland deutlich niedriger liegen (vgl. BMBF 2021). So werden sich Berechnung des HYDROGEN COUNCIL und MCKINSEY & COMPANY (2021) zufolge bis 2050 die Kosten von grünem Wasserstoff, der in Algerien mittels Erneuerbarer Energie gewonnen und über Pipelines nach Deutschland transportiert wird, auf zwei US-Dollar pro kg Wasserstoff belaufen. Davon entfällt lediglich ein Viertel auf die Transportkosten. Damit wird Deutschland auch in Zukunft von Energieimporten abhängig sein, jedoch in geringerem Maße als aktuell von Importen fossiler Energieträger. Somit ist eine Verbesserung der Außenhandelsbilanz zu erwarten, welche sich mit dem weiteren Ausbau der heimischen erneuerbaren Energieerzeugung weiter verbessern wird (vgl. DENA 2018).

Darüber hinaus wird in Regionen mit geringen Stromgestehungskosten von Solar- und Windkraftanlagen (u. a. Südamerika, Nordafrika, Naher/Mittlerer Osten) der Bedarf an Elektrolyseuranlagen ansteigen, um die Erneuerbare Energie in grünem Wasserstoff und weiteren Power-to-Liquid-Produkten zu speichern und zu exportieren. Damit bietet der Aufbau von nachhaltigen Kooperations- und Handelsbeziehungen mit diesen Regionen die Möglichkeit die Elektrolyseur-Fertigungsindustrie in Deutschland zu stärken und gleichzeitig die Energieversorgung zu sichern (vgl. „Export“ in Abbildung 7) (vgl. BMBF 2021; BCG/ PROGNOS 2018; FRAUNHOFER 2019; HYDROGEN COUNCIL/ MCKINSEY & COMPANY 2021; DENA 2018; BMVI 2018). Erste Schritte in diese Richtung wurden bereits durch bilaterale Wasserstoffpartnerschaften auf Regierungsebene, mit u. a. Marokko, unternommen (vgl. NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2021).

Veränderungen in der Außenhandelsbilanz von Deutschland wurden in verschiedenen der bereits erwähnten QuBe-Arbeiten berücksichtigt und damit deren Einfluss auf die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt abgeschätzt. So wurden in WOLTER u. a. (2019) temporäre Monopolgewinne für Deutschland angenommen, die mit einer Vorreiterrolle Deutschlands in der Digitalisierung begründet wurden, und zu entsprechenden Steigerungen des Exports führen. Im Auftrag des Bundesministeriums

für Bildung und Forschung (BMBF) hat das QuBe-Projekt zudem die Auswirkungen einer Steigerung des Exports um fünf Prozent für den Arbeitsmarkt abgeschätzt. Den beiden Studien zufolge belaufen sich die zusätzlichen Arbeitskräftebedarfe aus diesen Exportsteigerungen auf rund 200.000 Personen. Veränderungen der Außenhandelsbilanz wurden ebenso in MÖNNIG u. a. (2018) untersucht. Zum einen hat sich dabei der Wechsel von fossilen Brennstoffen zu Strom als Antriebsmittel für Fahrzeuge und der daraus resultierende geringere Importbedarf von fossilen Brennstoffen positiv auf die Außenhandelsbilanz ausgewirkt, solange der Strom inländisch hergestellt wird. Zum anderen führte der angenommene hohe Importbedarf von Elektroautos zu einer Verschlechterung der Außenhandelsbilanz. Dieser hat damit zu einem sinkenden Arbeitskräftebedarf im Szenario eines Hochlaufs der Elektromobilität in Deutschland geführt. Gelingt die Etablierung einer wettbewerbsfähigen Elektrolyseurindustrie, die ihre Produkte weltweit vermarktet, sowie eine geringere Abhängigkeit von Stromimporten, entstehen damit zusätzliche Beschäftigungspotenziale in der deutschen Wasserstoffwirtschaft.

Transport

Einen weiteren Teil der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ stellen der laufende Betrieb sowie der Ausbau und die Instandhaltung der Infrastruktur zur Speicherung und Verteilung von Wasserstoff dar (vgl. „Transport“ in Abbildung 7). Da der Aufbau der Infrastruktur besonders zu Beginn des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft erhebliche Beschäftigungseffekte nach sich ziehen wird, werden diese in der Phase des Ausbaus und Wartung voraussichtlich vergleichsweise geringer ausfallen. Auch dies ist aus den QuBe-Studien zu Digitalisierung oder Mobilisierung zu entnehmen.

Verwendung in Herstellungsprozessen

Der letzte Punkt, welcher größere Änderungen im Wirtschaftssystem und dem Arbeitsmarkt in Deutschland im Betrieb der Wasserstoffwirtschaft hervorrufen wird, ist die Verwendung von Wasserstoff in Herstellungsprozessen (vgl. Abbildung 7). So werden sich insbesondere die energieintensiven Stahl-, Chemie- und Zementindustrie mit Änderungen ihrer Produktionsabläufe konfrontiert sehen. Die Nutzung neuer Verfahrenstechnologien werden veränderte Kompetenzbedarfe nach sich ziehen. Ebenso werden sich die Vorleistungsverflechtungen innerhalb der Industrie verändern. So entstehen bspw. bei der Hochofenroute (Erzeugung von Rohstahl aus Eisenerz und Koks) Reststoffe, welche in der Zementindustrie als Materialien für die Zementherstellung verwendet werden. Mit der Einführung von wasserstoffbasierten Direktreduktionsverfahren fallen diese Stoffe entsprechend weg. Ebenso werden die Ressourceneffizienz und das Recycling von Materialien weiter an Bedeutung gewinnen, wodurch der Materialeinsatz insgesamt zurückgehen wird (vgl. DENA 2018; BCG/ PROGNOS 2018; AGORA ENERGIEWENDE/ WUPPERTAL INSTITUT 2019). Zudem werden fossile Rohstoffe und der damit einhergehende Importbedarf zurückgehen.

Welche Folgen dies für die Fachkräftebedarfe an deutschen Arbeitsmarkt konkret haben wird, lässt sich aktuell nicht klar abschätzen. In den bereits genannten QuBe-Studien wurden ebenso die Effekte eines Wandels in den Produktions- und Arbeitsweisen abgebildet. So haben WOLTER u. a. (2019) veränderte Kostenstrukturen in den Branchen im Zuge der Digitalisierung berücksichtigt: Bspw. werden Unternehmen mehr Dienstleistungen aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik und Beratungsleistungen beziehen und dafür materialeffizienter produzieren können. Viele Arbeitsplätze werden demnach im Zuge der Digitalisierung verschwinden, gleichzeitig werden neue hinzukommen. Anders als die Digitalisierung ist zu erwarten, dass die Implementierung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ keinen derartigen gesamtwirtschaftlichen Wandel der Arbeitsweise auslöst. Dafür wird es in den besonders stark betroffenen energieintensiven Branchen Chemie, Stahl und Zement zu überdurchschnittlichen Veränderungen der Produktions- und Arbeitsweise kommen. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen zum Wandel des Mobilitätssystems (vgl. MÖNNIG u. a. 2018, 2021a), denen zufolge vornehmlich die Branchen der Fahrzeugherstellung und

Verkehrsdienstleister von Änderungen der Produktions- und Arbeitsweise betroffen sind. In dem möglicherweise neu entstehenden Produktionszweig „Wasserstoff“ sind die Berufsstrukturen bisher noch nicht bekannt. Daher sind Erhebungen auf Basis der handelnden Unternehmen durchzuführen.

Damit wird sich im Zuge der Energiewende eine neue Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ im deutschen Wirtschaftssystem etablieren, welche sich über die Fertigung von Elektrolyseur- und Brennstoffzelltechnologien, die Elektrolyse selbst, die Zuleitung bis hin zur Verwertung von grünem Wasserstoff erstreckt. Die bereits aufgeführten Forschungsergebnisse machen deutlich, dass noch enormer Forschungsbedarf bezüglich der Vorleistungsnachfrage, Personalbedarfe und Arbeitsproduktivität in dieser Wertschöpfungskette besteht.

5 Schlussfolgerungen für zu erwartende Beschäftigungseffekte der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“

Auf Basis des zuvor dargestellten Forschungsstandes lassen sich die folgenden erwartbaren Beschäftigungseffekte einer Implementierung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ in Deutschland ableiten:

- Die Forschungs- und Entwicklungsphase wird insbesondere zu einem Beschäftigungsaufbau in öffentlichen Forschungseinrichtungen sowie dem Produzierenden Gewerbe führen. Davon profitieren insbesondere Expertentätigkeiten in einschlägigen Fachrichtungen wie Technische Forschung und Entwicklung, Maschinenbau- und Betriebstechnik, Elektrotechnik, Chemie und Energietechnik.
- Beim Aufbau der Infrastruktur werden insbesondere das Baugewerbe und ihm vorgelagerte Branchen Beschäftigungszuwächse vornehmlich auf Fachkraft- und Expertenniveau verzeichnen können (Hoch- und Tiefbau, Ingenieurswesen). Aber angesichts der bereits hohen Auslastung des Baugewerbes, sind verschärfte berufliche Engpässe zu erwarten. Es ist notwendig, dies frühzeitig sichtbar zu machen und alternative Strategien zur Sicherung des Fachkräftebedarfs zu analysieren, um die Einführung einer neuen Infrastruktur nicht zu verzögern.
- Die Erschließung neuer Märkte durch die Implementierung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ wird für den ökonomischen Erfolg entscheidend sein. Einen besonderen Faktor für die wirtschaftlichen und arbeitsmarktbezogenen Folgen bildet der Aufbau einer Elektrolyseur- und Brennstoffzellefertigungsindustrie. So kann dies hohe Beschäftigungspotenziale in der Automobil- und Maschinenbaubranche nach sich ziehen und zudem die Außenhandelsbilanz von Deutschland verbessern.
- Die Veränderungen der Produktionsweisen werden sich branchenspezifisch deutlich unterscheiden, so dass Branchenentwicklungen vor allem im Produzierenden Gewerbe detailliert zu betrachten sind. Bei der Umstellung von Produktionsprozessen in der Industrie werden voraussichtlich Berufe im Bereich des Anlagen- und Maschinenbaus stärker profitieren.
- Der gesamte Umsetzungsprozess wird zudem von einem höheren Bedarf an Beschäftigung auf Fachkraft- und Expertenniveau in den Büro- und Sekretariatsberufen sowie der Unternehmensorganisation- und Strategie begleitet werden.
- Die Beschäftigungseffekte werden regional ungleich verteilt auftreten. So werden sich voraussichtlich Regionen mit entsprechend starker Vertretung der betroffenen Schwer- und Grundstoffindustrie mit einem stärkeren Arbeitsplatzumschlag konfrontiert sehen. Zudem werden voraussichtlich Regionen mit geringen Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien (Norddeutschland) profitieren.

Die Transformation zu einer Wasserstoffwirtschaft zieht damit Folgen für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt in Deutschland nach sich, welche über die Implementierungsphase hinausgehen und

fortdauernd anhalten. Dabei zeigt der bisherige Forschungsstand, dass Veränderungsprozesse keine linearen Prozesse sind, sondern bestimmte Bedarfe zu Beginn an Bedeutung gewinnen und danach auch wieder verlieren, andere erst zeitversetzt auftreten und dann dominant werden, andere wiederum langsam zurückgehen. Damit werden ebenso beim Übergang zur Wasserstoffwirtschaft sehr unterschiedliche Beschäftigungsbedarfe an Zahl, Berufen und Anforderung über die Zeit entstehen. Es bedarf also auch der notwendigen Quantitäten an spezifischen Fachkräften zur rechten Zeit, um die Nationale Wasserstoffstrategie auch umsetzen zu können. Das QuBe-Projekt bietet mit seiner bereits vorhandenen umfangreichen Datenbasis und tiefgreifenden Modellierung der Zusammenhänge im Bildungs- und Wirtschaftssystem einen Verbund, welcher sich zur Abschätzung der zusätzlich aufkommenden Bedarfe im Zuge der Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie eignet. Das Projekt widmet sich im Auftrag des BMBF explizit diesem Thema, um die aus der Nationalen Wasserstoffstrategie resultierenden Fachkräftebedarfe aufzeigen.

Literaturverzeichnis

acatech (DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN E.V.); Leopoldina (DEUTSCHE AKADEMIE DER NATURFORSCHER LEOPOLDINA E.V. - NATIONALE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN); Akademienunion (UNION DER DEUTSCHEN AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN E.V.): »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. In: Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (2017)

AGEB (ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN): Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2021 (in TWh) Deutschland insgesamt 2021. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/02/Strommix-Dezember2021.pdf> (Stand: 06.01.2022)

AGEE-Stat (ARBEITSGRUPPE ERNEUERBARE ENERGIEN-STATISTIK): Monatsbericht-PLUS+ mit Informationen zur quartalsweisen Entwicklung der Erneuerbaren Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. 4. Quartal 2021 2021. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee-stat_monatsbericht_plus_2021-q4.pdf (Stand: 05.01.2022)

AGORA ENERGIEWENDE; WUPPERTAL INSTITUT: Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin 2019. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf (Stand: 19.11.2021)

BCG (BOSTON CONSULTING GROUP); PROGNOSE: Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI. München, Hamburg, Basel, Berlin 2018. URL: <https://web-assets.bcg.com/e3/06/1c25c60944a09983526ff173c969/klimapfade-fuer-deutschland.pdf>

BEE (BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE E.V.): Positionspapier zur Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung 2020. URL: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionspapiere_Stellungnahmen/BEE/20201002_BEE-Positionspapier_Wasserstoff.pdf

BEZDEK, Roger H.: The hydrogen economy and jobs of the future. In: Renewable Energy and Environmental Sustainability 4 (2019) 1

BMBF (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG): Karliczek: Westafrika kann zum klimafreundlichen „Powerhouse“ der Welt werden 2021. URL: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/karliczek-westafrika-kann-zum--hen-powerhouse-der-welt-werden.html>

BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ): Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019 2021. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_bf.pdf (Stand: 04.01.2022)

BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ): Förderung der Elektromobilität 2020. URL: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/foerderung> (Stand: 19.11.2021)

BMVI (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR): Integriertes Energiekonzept 2050. Strom Wärme Verkehr Industrie. Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. Abschlussbericht (Kurzfassung). Berlin 2018. URL: https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/03/2019_Studie_Rechtliche-Rahmenbedingungen-fuer-ein-integriertes-Energiekonzept_IK2050.pdf?media=1628501676 (Stand: 19.11.2021)

BMWi (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE): Die nationale Wasserstoffstrategie. Berlin 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (Stand: 19.11.2021)

BUNDESREGIERUNG: Energiewende im Überblick. Berlin 2021a. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energiewende-im-ueberblick-229564> (Stand: 15.11.2021)

BUNDESREGIERUNG: Generationenvertrag für das Klima 2021b. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Stand: 17.11.2021)

dena (DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin 2018. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf (Stand: 19.11.2021)

DWV (DEUTSCHER WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLEN-VERBAND E.V.): Grüne Wasserstoff-Industrie – Lösung für den Strukturwandel? Berlin 2018. URL: <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/20181128-Pos.-Papier-zu-Strukturwandel-final.pdf> (Stand: 19.11.2021)

EUROSTAT: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch 2021. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=t2020_rd330#:~:text=Der%20Bruttoendenergieverbrauch%20ist%20der%20Energieverbrauch,Energie%20aus%20erneuerbaren%20Quellen%20berechnet. (Stand: 05.01.2022)

EUWID (EUROPÄISCHER WIRTSCHAFTSDIENST GMBH): Wie wird Wasserstoff hergestellt? | EUWID Neue Energie Nachrichten 2019. URL: <https://www.euwid-energie.de/wie-wird-wasserstoff-hergestellt/> (Stand: 17.12.2021)

FRAUNHOFER: Kompetenz für das Wasserstoffzeitalter 2020. URL: <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2020/Wasserstoff/Kompetenz-fuer-das-Wasserstoff-Zeitalter.pdf> (Stand: 22.12.2021)

FRAUNHOFER: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe, Freiburg 2019. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf (Stand: 19.11.2021)

GRAICHEN, Patrick: Stellungnahme zur Anhörung „Neustart für die Wirtschaft in Deutschland und Europa“. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/697808/c99a4c730ed23e073c56717be80697b2/sv-graichen-data.pdf> (Stand: 17.12.2021)

GRIMM, V.; JANSER, M.; STOPS, M.: Neue Analyse von Online-Stellenanzeigen: Kompetenzen für die Wasserstofftechnologie sind jetzt schon gefragt. In: IAB-Kurzbericht 11 (2021)

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY: Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness 2021. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf> (Stand: 19.11.2021)

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan 2019. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (Stand: 19.11.2021)

IKEM (INSTITUT FÜR KLIMASCHUTZ, ENERGIE UND MOBILITÄT E.V.): Wasserstoff - Farbenlehre. Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie 2020. URL: https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf (Stand: 17.12.2021)

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLES ENERGY AGENCY): Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 (Edition: 2020) Summary. Abu Dhabi 2020. URL: <https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/>

Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_Summary_2020.pdf?la=en&hash=1F18E445B56228AF8C4893CAEF147ED0163A0E47 (Stand: 19.11.2021)

KAISER, Oliver S.; MALANOWSKI, Norbert: Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft: Fördernde und hemmende Faktoren im Verkehrssektor und der chemischen Industrie 2020. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/225330>

KBA (KRAFTFAHRT-BUNDESAMT): Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2011 bis 2020 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Flensburg 2021. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/fz_n_umwelt_archiv/2020/n_umwelt_z.html?nn=2594996 (Fehler 404) (Stand: 10.08.2021)

KOLBE, Karin; LECHTENBÖHMER, Stefan; FISCHEDICK, Manfred: Hydrogen derived from algae and cyanobacteria as a decentralized fueling option for hydrogen powered cars: Size, space, and cost characteristics of potential bioreactors. In: International Journal of Sustainable Transportation 14 (2020) 5, S. 325-334

KRICHEWSKY-WEGENER, L.; ABEL, S.; BOVENSCHULTE, M.: Skills Development for Hydrogen Economies – Damit aus einer Wasserstoffstrategie eine Wasserstoff(weiter)bildungsstrategie wird. In: Working Paper of the Institute for Innovation and Technology (2020) 55

MAIER, Tobias; STEEG, Stefanie; ZIKA, Gerd: Die Modellierung adjustierter Suchdauern als Indikator für die Fachkräftesituation im Beruf. Bonn 2020. URL: https://www.bibb.de/dokumente/pdf/Maier_Steeg_Zika_Preprint_ModellierungadjustierterSuchdauern.pdf (Stand: 04.01.2022)

MÖNNIG, A.; BACH, N. VON DEM; HELMRICH, R.; STEEG, S.; HUMMEL, M.; SCHNEEMANN, C.; WEBER, E.; WOLTER, M. I.; ZIKA, G.: „MoveOn“ III: Folgen eines veränderten Mobilitätsverhaltens für Wirtschaft und Arbeitsmarkt. Version 1.0. (2021a)

MÖNNIG, A.; LUTZ, C.; BECKER, L.; MAIER, T.; ZIKA, G.: Arbeitsmarkteffekte eines klimaneutralen Langfristpfads bis 2030 – Zusammenfassung der Ergebnisse. Osnabrück 2021b. URL: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/2021-05-18_Arbeitsmarkteffekte_KNDE.pdf (Stand: 19.11.2021)

MÖNNIG, A.; SCHNEEMANN, C.; WEBER, E.; ZIKA, G.: Das Klimaschutzprogramm 2030. Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung. IAB-Discussion Paper 02/2020. In: IAB-Discussion Paper 2 (2020)

MÖNNIG, A.; SCHNEEMANN, C.; WEBER, E.; ZIKA, G.; HELMRICH, R.: Elektromobilität 2035 – Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen. In: IAB-Forschungsbericht 8 (2018)

NATIONALER WASSERSTOFFRAT: Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025 2021. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025_WEB-Bf.pdf (Stand: 22.12.2021)

PARKINSON, B.; BALCOMBE, P.; SPEIRS, J. F.; HAWKES, A. D.; HELLGARDT, K.: Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes. In: Energy & Environmental Science 12 (2019) 1, S. 19-40

RUNGE, Philipp; SÖLCH, Christian; ALBERT, Jakob; WASSERSCHIED, Peter; ZÖTTL, Gregor; GRIMM, Veronika: Economic comparison of electric fuels produced at excellent locations for renewable energies: A Scenario for 2035 2020. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3623514 (Stand: 19.11.2021)

SPD (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS); BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP (FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit.

Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). Koalitionsvertrag der 20. Legislaturperiode vom 24. November 2021 2021. URL: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (Stand: 03.01.2022)

SRU (SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Berlin 2021. URL: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 19.11.2021)

STERNER, Michael; STADLER, Ingo: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg 2014. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37380-0>

TIMMERBERG, S.; KALTSCHMITT, M.: Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs. In: Applied Energy 237 (2019), S. 795-809

UBA (UMWELTBUNDESAMT): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren 2021a. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren> (Stand: 19.11.2021)

UBA (UMWELTBUNDESAMT): Primärenergieverbrauch 2021b. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren> (Stand: 19.11.2021)

UBA (UMWELTBUNDESAMT): Qualifikationen, Berufe und Branchen für den Übergang in eine Green Economy – eine Bestandsaufnahme 1 (2017)

WOLTER, M. I.; MÖNNIG, A.; SCHNEEMANN, C.; WEBER, E.; ZIKA, G.; HELMRICH, R.; MAIER, T.; WINNIGE, S.: Wirtschaft 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Ökonomie. Szenario-Rechnungen im Rahmen der fünften Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen. In: Wissenschaftliche Diskussionspapiere (2019) 200

WOLTER, Marc I.; MÖNNIG, Anke; HUMMEL, Markus; SCHNEEMANN, Christian; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd; HELMRICH, Robert; MAIER, Tobias; NEUBER-POHL, Caroline: Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. In: IAB-Forschungsbericht 8 (2015)

WOLTER, Marc I.; MÖNNIG, Anke; HUMMEL, Markus; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd; HELMRICH, Robert; MAIER, Tobias; NEUBER-POHL, Caroline: Wirtschaft 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Ökonomie: Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. In: IAB-Forschungsbericht 13 (2016)