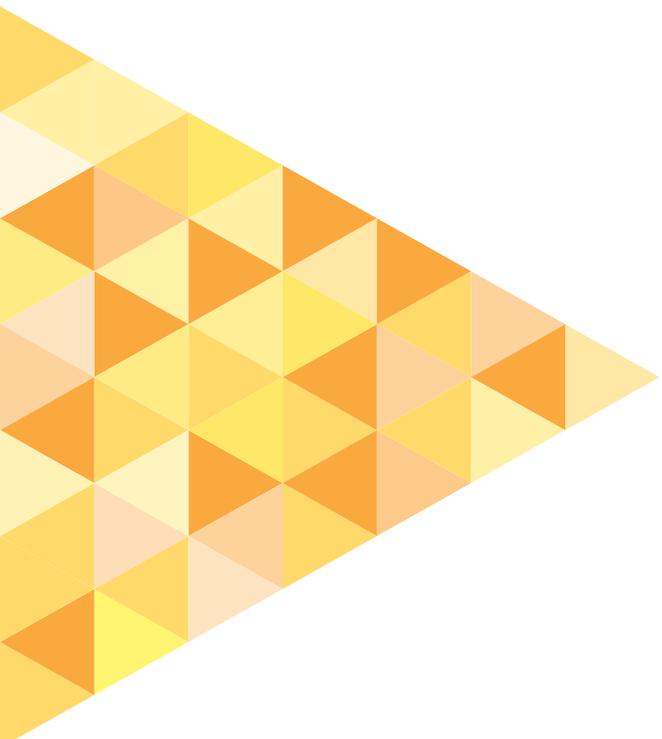


Johanna Zenk | Anke Mönnig | Linus Ronsiek | Christian  
Schneemann | Alexander Christian Schur | Stefanie Steeg

# **Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030**



BIBB Discussion Paper

Ein Gemeinschaftsprojekt von



Zitiervorschlag:

Zenk, Johanna; Mönig, Anke; Ronsiek, Linus; Schneemann, Christian; Schur, Alexander Christian; Steeg, Stefanie: Erste Abschätzung möglicher Arbeitmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030. Version 1.0 Bonn, 2023. Online: [https://res.bibb.de/vet-repository\\_780958](https://res.bibb.de/vet-repository_780958)



© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2023

Version 1.0  
Januar 2023

**Herausgeber**

Bundesinstitut für Berufsbildung  
Robert-Schuman-Platz 3  
53175 Bonn  
Internet: [www.vet-repository.info](http://www.vet-repository.info)  
E-Mail: [repository@bibb.de](mailto: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-780958-8

---

## **Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030**

Johanna Zenk<sup>1</sup>, Anke Mönnig<sup>2</sup>, Linus Ronsiek<sup>2</sup>, Christian Schneemann<sup>1</sup>, Alexander Christian Schur<sup>3</sup>, Stefanie Steeg<sup>3</sup>

---

### **Abstract:**

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie 2020 (NWS) zieht umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Investitionen und Umstrukturierungen in der Industrie und dem Energiesystem nach sich. Damit die Umsetzung der NWS nicht durch Fachkräfteengpässe ausgebremst wird, ist es erforderlich, bereits frühzeitig aufzuzeigen, welche Berufe, Qualifikationen und Kompetenzen zukünftig dafür benötigt werden.

Mit diesen Fragestellungen hat das BMBF das Projektteam der Qualifikations- und Berufsprojektionen (QuBe) betraut. Anhand von Modellrechnungen zeigen die Projektionen konsistente Entwicklungspfade auf, wie sich die Wirtschaft und der Arbeitsmarkt in Deutschland langfristig entwickeln könnten. Unter Anwendung der Szenariotechnik wird zu dem Referenzszenario, der QuBe-Basisprojektion, ein alternatives Wasserstoff-Szenario entwickelt, in dem die Wasserstoffwirtschaft entsprechend den Zielen der NWS und des Koalitionsvertrages 2021-2025 berücksichtigt wird.

Im Ergebnis zeigt sich, dass eine Umsetzung der Ziele positive ökonomische Impulse bis 2027 erzeugt und das Bruttoinlandsprodukt jährlich stärker steigen lässt als ohne Nationale Wasserstoffstrategie. Die Steigerung des Wirtschaftswachstums ist zum überwiegenden Teil auf höhere Investitionen und Technologieexporte zurückzuführen, wobei zwischen 2028 und 2030 zunehmende Importbedarfe die Wirtschaftsleistung im Vergleich zum Referenzszenario sinken lassen. Auf den Arbeitsmarkt wird sich die Umsetzung der Ziele durchweg positiv auswirken. In Summe übersteigt der Arbeitsplatzaufbau den Arbeitsplatzabbau. Während es vor allem im Maschinenbau zu positiven Effekten kommt, ergeben sich negative Effekte für die Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen.

---

<sup>1</sup> Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung, Forschungsbereich „Prognosen und gesamtwirtschaftliche Analysen“

<sup>2</sup> Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH, Bereich „Wirtschaft und Soziales“

<sup>3</sup> Bundesinstitut für Berufsbildung, Arbeitsbereich 1.2, „Qualifikation, berufliche Integration, Erwerbstätigkeit“

## Inhalt

Abkürzungsverzeichnis .....	4
Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	7
In aller Kürze .....	8
Zusammenfassung .....	9
1 Einleitung .....	11
2 Methodik .....	12
3 Annahmen des Wasserstoff-Szenarios .....	16
3.1 Herstellung von Wasserstoff im Inland .....	16
3.1.1 Elektrolysekapazität .....	16
3.1.2 Investitions- und Produktionskosten .....	17
3.2 Importbedarfe von Wasserstoff .....	19
3.2.1 Importmenge Wasserstoff .....	19
3.2.2 Grenzübergangspreis .....	21
3.3 Wasserstoff-Transportsystem .....	23
3.4 Export von Elektrolyseuren .....	25
4 Ergebnisse des Wasserstoff-Szenarios .....	26
5 Sensitivitätsanalysen .....	38
5.1 Sensitivität 1: Inländische Kapazitäten zur Herstellung von Wasserstoff um zehn Prozent erhöhen (S1: NWS + 10%) .....	40
5.2 Sensitivitäten zu den Importbedarfen von Wasserstoff .....	40
5.2.1 Sensitivität 2: Wasserstoffbedarf um zehn Prozent erhöhen (S2: H <sub>2</sub> +10%) .....	41
5.2.2 Sensitivität 3: Wasserstoffbedarf wird von NWS vollständig gedeckt (S3: H <sub>2</sub> = NWS) .....	41
5.3 Sensitivitäten zum Wasserstoff-Transportsystem .....	41
5.3.1 Sensitivität 4: Verhältnis umgerüsteter zu neugebauten Pipelines auf 90:10 setzen (S4: 90:10) .....	42
5.3.2 Sensitivität 5: Wasserstoffbedarf im Verkehr über Lkw, der Rest mit 90:10 in Pipelines (S5: Lkw, 90:10) .....	42
5.4 Sensitivitäten zum Export von Elektrolyseuren .....	43
5.4.1 Sensitivität 6: Exportanteil Deutschlands von 20 auf 30 Prozent erhöhen (S6: Exp.Q. = 30%) .....	43
5.4.2 Sensitivität 7: Exportanteil Deutschlands von 20 auf zehn Prozent verringern (S7: Exp.Q. = 10%) .....	43
5.4.3 Sensitivität 8: Globaler Wasserstoffbedarf um zehn Prozent höher (S8: Global + 10%) .....	44
5.5 Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen .....	44
6 Schlussfolgerungen .....	45

7	Ausblick .....	46
8.	Literaturverzeichnis.....	49

## Abkürzungsverzeichnis

BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
dena	Deutschen Energie-Agentur
GW	Gigawatt
GWS	Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung mbH
IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
IEA	Internationale Energieagentur / International Energy Agency
INFORGE	INterindustry FORecasting GERmany
KldB	Klassifikation der Berufe
KoaV	Koalitionsvertrag 2021 – 2025
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
MWh	Megawattstunde
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
PEM	proton exchange membrane, Protonen-Austausch-Membran
QINFORGE	Qualification and Occupation in the Interindustry Forecasting Germany
QuBe	Qualifikations- und Berufsprojektionen
TWh	Terawattstunde

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modellierung im QuBe-Projekt, 6. Welle .....	13
Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung.....	14
Abbildung 3: Abdeckung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ im Wasserstoff-Szenario- v1.0 .....	15
Abbildung 4: Installierte Leistung Elektrolyseure und benötigte Strommenge aus erneuerbaren Quellen .....	17
Abbildung 5: Investitionskosten Elektrolyseanlagen .....	18
Abbildung 6: Produktionskosten Elektrolyse .....	19
Abbildung 7: Wasserstoffproduktion in Deutschland, inländischer Gesamtbedarf und Importbedarf.....	21
Abbildung 8: Internationale Transportkosten.....	22
Abbildung 9: Produktionskosten im Ausland und im Inland.....	22
Abbildung 10: Gas-Fernleitungsnetz in Deutschland .....	23
Abbildung 11: Kosten durch Umrüstung und Neubau von Gasleitungen (kumuliert, in Mio. €).....	25
Abbildung 12: Zubau und Exportanteil Deutschlands an installierter Elektrolyseleistung im Rest der Welt .....	26
Abbildung 13: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt in Prozent, Jahre 2022 – 2030 .....	27
Abbildung 14: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts in Mrd. Euro; Jahre 2022 – 2030.....	29
Abbildung 15: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen in Tausend Personen, Jahre 2022 – 2030 .....	30
Abbildung 16: Zwölf Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030.....	31
Abbildung 17: Zwölf Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030.....	32
Abbildung 18: 14 Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 .....	33
Abbildung 19: 14 Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 .....	34
Abbildung 20: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 in Tausend Personen (blaue Säulen, linke Achse) und in Prozent (rote Rauten, rechte Achse).....	35
Abbildung 21: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025 und 2030 in Tausend Personen .....	36
Abbildung 22: Wirkungen der Teilszenarien auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025 und 2030 in Tausend.....	37

Abbildung 23: Wirkung auf die Suchdauer der Betriebe nach neuen Mitarbeitenden nach Berufsgruppe im Jahr 2030 in Tagen, Auswahl mit überdurchschnittlicher Suchdauer in 2021 .....	38
Abbildung 24: Differenz der Erwerbstätigen zum Wasserstoff-Szenario-v1.0.....	39
Abbildung 25: Projektplan, erste Projektphase.....	47
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Modellerweiterungen für die 7. Welle .....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Annahmen des Wasserstoff-Szenarios-v1.0 .....	16
Tabelle 2: Ausgewertete Studien zu nationalen Wasserstoffbedarfen .....	20
Tabelle 3: Überblick Sensitivitätsrechnungen .....	39
Tabelle 4: Kumulierte Effekte des preisbereinigten Bruttoinlandsproduktes (BIP, in Mrd. Euro) und die Differenz der Erwerbstätigen (ETS, in 1.000 Personen) zwischen den Sensitivitäten und dem Wasserstoff-Szenario-v1.0 im Jahr 2030 .....	40
Tabelle 5: Überblick Import-Sensitivitäten.....	41
Tabelle 6: Überblick Transport-Sensitivitäten.....	42
Tabelle 7: Überblick Export-Sensitivitäten .....	43

## In aller Kürze

- In diesem Diskussionspapier werden die Auswirkungen der Nationalen Wasserstoffstrategie 2020 und die auf Wasserstoff bezogenen Ziele des Koalitionsvertrages 2021 – 2025 mittels einer Szenarioanalyse beschrieben (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020; SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021). Der Projektionshorizont des Szenarios erstreckt sich bis zum Jahr 2030.
- Eine Umsetzung der Ziele erzeugt bis 2027 positive ökonomische Impulse und lässt das Bruttoinlandsprodukt jährlich um 0,02 bis 0,12 Prozent stärker steigen als im Referenzszenario ohne Nationale Wasserstoffstrategie. Die Steigerung des Wirtschaftswachstums ist zum überwiegenden Teil auf höhere Investitionen und Technologieexporte zurückzuführen.
- Aufgrund der getroffenen Annahmen führen zunehmende Importe zwischen 2028 und 2030 zu leicht negativen Effekten auf die Wirtschaftsleistung. Eine Substitution fossiler Energieträger wurde in diesem Szenario nicht angenommen, dürfte den Negativeffekt zukünftig jedoch deutlich abschwächen.
- Die Umsetzung der Ziele wird sich durchweg positiv auf den Arbeitsmarkt auswirken. So liegt die Zahl der Erwerbstätigen zwischen 2022 und 2030 um durchschnittlich 13.000 Personen höher als ohne Zielumsetzung.
- Bessere Verdienstmöglichkeiten führen zu einem höheren Arbeitskräfteangebot. So werden zwischen 2022 und 2030 durchschnittlich 6.000 Personen mehr ihre Arbeitskraft anbieten.
- Je nach Wirtschaftszweig und Beruf werden Arbeitsplätze auf- oder abgebaut. In Summe übersteigt der Arbeitsplatzaufbau den Arbeitsplatzabbau.
- Zu positiven Effekten kommt es vor allem für den Maschinenbau, während sich negative Effekte für die Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen ergeben.
- In einzelnen Berufen, in denen ein Mehrbedarf auftritt, kommt es bereits heute zu Engpässen auf dem Arbeitsmarkt. Die adjustierte Suchdauer der Betriebe nach geeigneten Mitarbeitenden liegt entsprechend höher als in einem Referenzszenario ohne Umsetzung von Wasserstoffzielen.

## Zusammenfassung

In diesem Diskussionspapier werden die Auswirkungen der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) und die auf Wasserstoff bezogenen Ziele des Koalitionsvertrages 2021 – 2025 (KoaV) auf die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt analysiert. Auf Basis von Modellrechnungen werden zwei Szenarien simuliert: das QuBe-Basisszenario der sechsten Projektionswelle ohne NWS und KoaV (Referenzszenario) und ein Szenario mit den entsprechenden Zielen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft (Wasserstoff-Szenario<sup>4</sup>). Diese erste Abschätzung soll zeigen, wie sich das Wasserstoff-Szenario auf verschiedene Wirtschaftsbereiche und Berufsgruppen auswirken könnte.

Im Juni 2020 hat die vergangene Bundesregierung im Kabinett die NWS beschlossen. Sie soll einen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele 2030 leisten. Dafür sind in der NWS sieben Mrd. Euro für die Förderung von Wasserstofftechnologien innerhalb Deutschlands und zwei Mrd. Euro für internationale Partnerschaften rund um das Thema Wasserstoff vorgesehen. Wird Wasserstoff anhand von erneuerbaren Energien gewonnen, wird dieser als „grüner“ Wasserstoff bezeichnet. Die NWS zielt unter anderem darauf ab, grünen Wasserstoff wettbewerbsfähig zu machen, seine Produktion und Nutzung zu fördern sowie die dazu benötigte Transport- und Verteilinfrastruktur aufzubauen und weiterzuentwickeln. Demnach sollen in Deutschland Erzeugungsanlagen für grünen Wasserstoff von bis zu fünf Gigawatt (GW) Gesamtleistung bis zum Jahr 2030 entstehen (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020). Im KoaV wird dieses Ziel auf zehn GW erhöht (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021).

Der Maßnahmenkatalog der NWS für den Markthochlauf der Produktion und Nutzung von Wasserstoff ist nur in wenigen Punkten konkret ausformuliert. Dadurch ist aktuell schwer abzuschätzen, in welchem Umfang Wasserstoff zukünftig genutzt werden wird. Aufgrund dieser Unsicherheit erfolgt keine vollständige Abbildung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ im Wasserstoff-Szenario. Es bildet lediglich eine Sicherstellung der Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff durch die inländische Produktion und den Import ab. Dazu werden Annahmen getroffen bezüglich der Herstellung von grünem Wasserstoff im Inland, des Imports von grünem Wasserstoff, eines Wasserstoff-Transportsystems und des Exports von Elektrolyseuren. Weitergehende Effekte sind nicht Teil des hier beschriebenen Wasserstoff-Szenarios, sollen in einem erweiterten Szenario zukünftig jedoch noch berücksichtigt werden. Dazu gehört insbesondere der verstärkte Ausbau erneuerbarer Energien, die Substitution fossiler Energieimporte durch grünen Wasserstoff und der Wegfall des Exportes fossiler Kraftwerkstechnik.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in den ersten Jahren zu einem zusätzlichen Anstieg der inländischen Wirtschaftsleistung führt. Dies ist vor allem auf hohe Investitionstätigkeiten und steigende Exporte zurückzuführen. Das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) liegt zwischen 2022 und 2027 um 0,02 bis 0,12 Prozent höher als im Referenzszenario. Die positiven Wachstumsimpulse flachen gegen 2030 jedoch ab, während der Importbedarf nach grünem Wasserstoff weiter steigt. Die positive Wirkung auf das BIP wird folglich immer kleiner, bis sie in den Jahren 2028 bis 2030 leicht negativ ausfällt. Eine Substitution fossiler Energieträger wurde in diesem Szenario nicht angenommen, dürfte den Negativeffekt zukünftig jedoch deutlich abschwächen.

---

<sup>4</sup> Sofern im Folgenden nicht weiter konkretisiert, bezieht sich dieses Diskussionspapier grundsätzlich auf das „Wasserstoff-Szenario-v1.0“. Weitere Informationen zur Versionierung bzw. Erweiterung des Wasserstoff-Szenarios-v1.0 sind Kapitel 7 und dem dort illustrierten Projektplan (Abbildung 25) zu entnehmen.

Auf dem Arbeitsmarkt zeigen sich hingegen durchweg positive Effekte. Die Zahl der Erwerbstätigen liegt im Wasserstoff-Szenario in allen betrachteten Jahren höher als im Referenzszenario. Die Wirtschaftsbereiche, die von einer Wasserstoffwirtschaft profitieren, bauen demnach mehr Arbeitsplätze auf als in den negativ betroffenen Wirtschaftsbereichen abgebaut werden. Im Durchschnitt liegt die Zahl der Erwerbstätigen zwischen 2022 und 2030 um rund 13.000 Personen höher als im Referenzszenario. Zwischen 2022 und 2028 liegt auch die Zahl der Erwerbspersonen höher als im Referenzszenario. Aufgrund der positiven Entwicklung der Wirtschaftsleistung und damit besseren Verdienstmöglichkeiten bieten also mehr Personen ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt an. Durch die höhere Erwerbstätigkeit liegt die Erwerbslosigkeit über den gesamten Analysezeitraum von 2022 bis 2030 niedriger als im Referenzszenario.

Der Blick auf die Wirtschaftszweige zeigt, dass im Jahr 2030 besonders im Maschinenbau zusätzliche Erwerbstätige beschäftigt sind, während die Erwerbstätigkeit bei der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden niedriger liegt. Diese Trends bestätigen sich auch bei den entsprechenden Berufsgruppen wie bei den Berufen der Maschinenbau- und Betriebstechnik oder der industriellen Glasherstellung und -verarbeitung. Die Erwerbstätigkeit nach Anforderungsniveau lässt in absoluten Zahlen einen erhöhten Bedarf vor allem an Fachkräften erkennen. Relativ betrachtet liegt der zusätzliche Bedarf an Spezialist:innen und Expert:innen im Vergleich zum Referenzszenario am höchsten. In einzelnen Berufen, in denen ein Mehrbedarf auftritt, kommt es bereits heute zu Engpässen auf dem Arbeitsmarkt. Die Rekrutierung geeigneter Fachkräfte wird entsprechend schwieriger. Dies zeigt die adjustierte Suchdauer der Betriebe nach geeigneten Mitarbeitenden, die sich langfristig erhöhen wird.

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft löst verschiedene Bewegungen auf dem Arbeitsmarkt aus, die letztlich dazu führen, dass es sowohl zu Verlusten von Arbeitsplätzen in bestimmten Bereichen kommt als auch zum Aufbau von Arbeitsplätzen in anderen Bereichen. In Summe übersteigt der Arbeitsplatzaufbau den Arbeitsplatzabbau, wodurch sich ein insgesamt positiver Effekt auf den Arbeitsmarkt zeigt.

Neben dem Wasserstoff-Szenario werden zusätzlich Sensitivitätsanalysen berechnet. Darunter wird die Änderung einzelner Annahmen unter Beibehaltung der restlichen Annahmen verstanden. Damit wird veranschaulicht, welche Annahme die höchste Sensitivität aufweist und somit am stärksten das Endergebnis beeinflusst. Es zeigt sich dabei, dass die größten Hebelwirkungen für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt im Außenhandel liegen. So liegen auf der einen Seite im Export von Elektrolyseuren deutliche Wachstumschancen für die deutsche Wirtschaft. Auf der anderen Seite liegen dem Importkanal, durch steigende Einfuhren, die größten Wachstumshemmnisse für die inländische Wertschöpfung zugrunde. Mit dem Ziel einer stärkeren Unabhängigkeit von Energieimporten, empfiehlt sich eine wirtschaftspolitische Strategie, die die inländische Produktion von erneuerbaren Energien und grünem Wasserstoff fördert. Um dies zu erreichen, muss unter anderem der Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigt werden, Genehmigungsverfahren für Elektrolyseure schneller vorstattengehen und klare Rahmenbedingungen für deren Betrieb geschaffen werden. Daneben können sich im Zuge der Entwicklung der weltweiten Wasserstoffwirtschaft Exportchancen im Bereich der Elektrolyseanlagen ergeben. Dazu muss die deutsche Wirtschaft ihre Technologieführerschaft mindestens halten und wettbewerbsfähige Anlagen auf dem Weltmarkt anbieten.

# 1 Einleitung

Als Speicher von erneuerbaren Energien ermöglichen grüner Wasserstoff sowie dessen Folgeprodukte (Power-to-X) eine flexible Nutzung erneuerbarer Energien und leisten damit einen entscheidenden Beitrag, das Energie-, Wärme-, Wirtschafts- und Verkehrssystem in Deutschland zu dekarbonisieren und die Klimaziele zu erreichen (vgl. RUNGE u. a. 2020; TIMMERBERG/KALTSCHMITT 2019; DEUTSCHE ENERGIEAGENTUR 2018; AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019; INTERNATIONAL RENEWABLES ENERGY AGENCY 2020). Die Politik ist sich der Relevanz und der Potenziale von grünem Wasserstoff bewusst und hat dies mit dem Beschluss der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) im Juni 2020 anerkannt (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020). Diese könnte den Weg hin zu einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ebnen, welche die Produktion, den Transport und die Nutzung von grünem Wasserstoff umfasst.

Jüngst hat sich gezeigt, dass Wasserstoff nicht nur in der klimapolitischen Agenda eine wichtige Rolle spielt. Mit dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und den daraus folgenden Sanktionen gegenüber Russland ist die hohe Abhängigkeit Deutschlands von russischen Gasimporten deutlich geworden (vgl. WOLTER u. a. 2022). Um aus diesem Abhängigkeitsverhältnis herauszukommen, ist laut dem BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (2022) ein schnellerer Hochlauf von Wasserstoff und der massive Ausbau erneuerbarer Energien erforderlich.

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft zieht umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Investitionen und Umstrukturierungen in der Industrie und dem Energiesystem nach sich. Daraus werden sich weitreichende Folgen für die Bedarfe am Arbeitsmarkt und somit für das Aus- und Weiterbildungssystem in Deutschland ergeben (vgl. STEEG u. a. 2022). Damit die Umsetzung der NWS nicht durch Fachkräfteengpässe 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.

Mit diesen Fragestellungen hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Projektteam der Qualifikations- und Berufsprojektionen (QuBe, [www.qube-projekt.de](http://www.qube-projekt.de)) betraut. Die Projektionen werden unter der gemeinsamen Leitung des Bundesinstituts für Berufsbildung (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 langfristig entwickeln könnten. Arbeitskräfteangebot und -bedarf lassen sich dabei getrennt nach 63 Wirtschaftszweigen, 144 Berufsgruppen (3-Steller der Klassifikation der Berufe (KldB) 2010) sowie vier Qualifikations- bzw. Anforderungsniveaus ausweisen.

In einem ersten Schritt des Projektes *Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“* wurden die Ergebnisse einer umfangreichen Literaturrecherche veröffentlicht, welche den Forschungsstand bis Januar 2022 zu möglichen Arbeitsmarktfolgen der Umstellung auf eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland zusammenfassen (vgl. STEEG u. a. 2022). Darüber hinaus leiten MÖNNIG u. a. (2022) anhand einer Metaanalyse die zukünftigen Importbedarfe von grünem Wasserstoff für Deutschland ab. Die Ergebnisse aus den bisherigen Recherchen fließen nun in einem weiteren Projektschritt in die Durchführung einer Szenarioanalyse ein. Durch den Vergleich von einem Referenz- mit einem Alternativszenario lassen sich dabei die Wirkungen von bestimmten Maßnahmen auf den Arbeitsmarkt aufzeigen und analysieren (vgl. HELMRICH/ZIKA 2019).

Deutschland steht noch am Anfang der Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft. Der Maßnahmenkatalog der NWS ist nur in wenigen Punkten konkret ausformuliert. Die gesetzlichen und

regulatorischen Rahmenbedingungen, beispielsweise für die Förderung und den Betrieb von Elektrolyseanlagen, Zertifizierung von grünem Wasserstoff und den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, sind bisher unklar. Ebenso sind darin noch keine verbindlichen Nutzungsquoten von erneuerbaren Energien für die einzelnen Sektoren vorgegeben. Dadurch ist aktuell schwer abzuschätzen, in welchem Umfang Wasserstoff zukünftig genutzt werden wird. Dies erhöht die Unsicherheit in der Planung von Investitionen im Privatsektor, wodurch diese bisher noch zögerlich ausfallen.

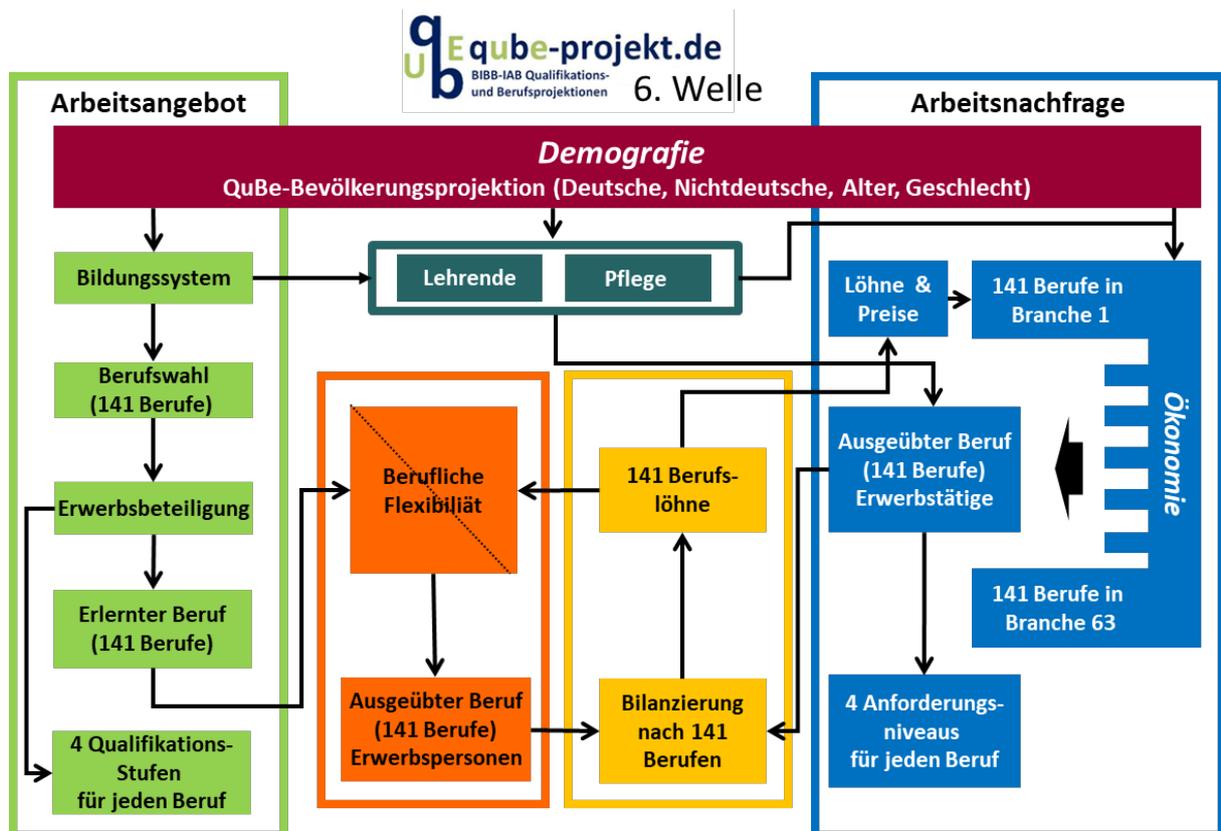
Aufgrund dieser Unsicherheiten erfolgt im vorliegenden Bericht zunächst noch keine vollständige Abbildung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ im QuBe-Modell. Der Fokus liegt dagegen lediglich auf der Sicherstellung der Versorgung mit grünem Wasserstoff durch die inländische Produktion und den Import. Auch wenn damit zunächst nur ein Teilaspekt einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland abgebildet wird, ermöglicht dies, die Größenordnungen der verschiedenen Aspekte abzuschätzen, die sich aus dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ergeben.

Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen der Szenarioanalyse dargelegt (vgl. Kapitel 2). Dabei wird auf das im QuBe-Projekt verwendete Modellinstrumentarium eingegangen und schließlich das Referenz- und Alternativszenario vorgestellt. Der dritte Abschnitt widmet sich einer detaillierten Darstellung der Annahmen, welche das Alternativszenario formen. In Kapitel 4 erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse zu den Arbeitsmarkteffekten der Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff. Im fünften Kapitel werden daraufhin Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsanalysen dargestellt, anhand derer sich die Hebelwirkungen der einzelnen Annahmen für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt ableiten lassen. In Abschnitt 6 folgt schließlich eine Zusammenfassung der Ergebnisse, woraufhin sich in Abschnitt 7 ein kurzer Ausblick auf den weiteren Projektverlauf anschließt.

## 2 Methodik

Der vorliegende Beitrag liefert eine erste Abschätzung über die arbeitsmarktspezifischen Effekte einer Realisierung der NWS bis zum Jahr 2030. Dabei wird die inländische Produktion von grünem Wasserstoff berücksichtigt, ebenso wie der Aufbau der dafür erforderlichen Infrastruktur und die daraus resultierenden Handelsbeziehungen Deutschlands. Dazu wird eine Szenarioanalyse durchgeführt, die auf einer komplexen ökonomischen Modellierung basiert. Die Analyse baut auf dem Instrumentarium des QuBe-Projektes auf, welches das BIBB gemeinsam mit dem IAB in Zusammenarbeit mit der GWS durchführt. Dabei kommt das Projektions- und Simulationsmodell QINFORGE (Qualification and Occupation in the Interindustry Forecasting Germany) zum Einsatz. QINFORGE ist eine Erweiterung des makroökonomischen Input-Output-Modells INFORGE (Interindustry Forecasting Germany) und ist den großen ökonomischen Strukturmodellen zuzurechnen (vgl. AHLERT u. a. 2009). Darin werden das Arbeitskräfteangebot sowie der -bedarf disaggregiert nach Branchen, Berufen sowie Qualifikation/Anforderungsniveau modelliert. Zudem werden berufliche Flexibilitäten, der Einfluss von Löhnen sowie die Interaktionen zwischen Angebots- und Nachfrageseite abgebildet (vgl. MAIER u. a. 2014). Eine schematische Darstellung der Modellzusammenhänge findet sich in Abbildung 1. Eine detaillierte Beschreibung der im QuBe-Projekt verwendeten Modellierung findet sich zudem in ZIKA u. a. (2022) .

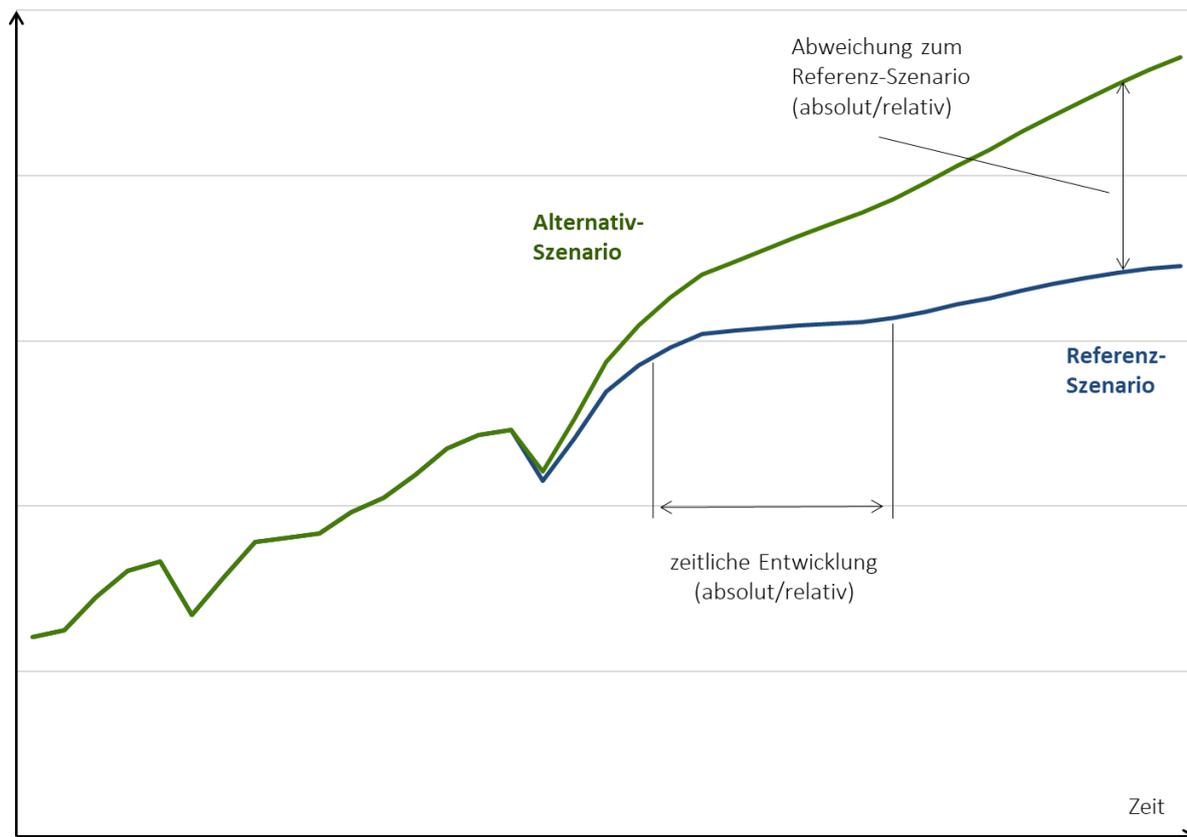
Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modellierung im QuBe-Projekt, 6. Welle



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Die Modellierung und Datengrundlage des QuBe-Projektes werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert und erweitert. Die vorliegende Untersuchung basiert auf der sechsten Welle des QuBe-Projektes (vgl. MAIER u. a. 2020). Diese verfügt über einen Datenstand zum Sommer 2020. Darauf aufbauend wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Hierzu wird ein Referenzszenario (QuBe-Basisprojektion) mit einem Alternativszenario verglichen, welches sich in wasserstoffspezifischen Annahmen von der QuBe-Basisprojektion unterscheidet. Beiden Projektionen gemein sind dieselben Modellzusammenhänge und Datengrundlagen. Die Abweichungen in den Ergebnissen zwischen QuBe-Basisprojektion und Alternativszenario sind ausschließlich auf die getroffenen Annahmen zurückzuführen (vgl. HELMRICH/ZIKA 2019). Die Darstellung der Ergebnisse kann im zeitlichen Ablauf für ein Szenario oder im Vergleich des Alternativszenarios zum Referenzlauf zu einem Zeitpunkt erfolgen (vgl. Abbildung 2). Diese Methodik wurde bereits mehrfach im Modellrahmen des QuBe-Projektes angewandt, um beispielsweise die Auswirkungen eines veränderten Mobilitätsverhaltens (vgl. MÖNNIG u. a. 2018; MÖNNIG u. a. 2021) oder der langfristigen Folgen der Covid-19-Pandemie (vgl. WOLTER u. a. 2021) auf die Ökonomie und den Arbeitsmarkt in Deutschland zu quantifizieren.

**Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung**



Quelle: QuBe-Projekt

Als **Referenzszenario** dient die QuBe-Basisprojektion der sechsten Welle des QuBe-Projektes (MAIER u. a. 2020). Diese unterstellt ein Fortbestehen der in der Vergangenheit beobachtbaren Trends und nachweisbaren Verhaltensweisen im Bildungssystem und auf dem Arbeitsmarkt sowie der ökonomischen Entwicklung bis zum Stand Sommer 2020. Sie bildet damit ab, auf welchem Entwicklungspfad sich die Wirtschaft, das Bildungssystem und der Arbeitsmarkt in Deutschland bis zu diesem Zeitpunkt befunden haben. Zudem ist das aufgrund der Corona-Pandemie am 3. Juni 2020 beschlossene Konjunkturpaket sowie die Maßnahmen aus dem Klimapaket der vergangenen Bundesregierung vom 16. Dezember 2019 (vgl. MÖNNIG u. a. 2020) im Referenzszenario enthalten. Größere Anstrengungen für den Klimaschutz, wie sie nun im Koalitionsvertrag 2021 – 2025 (Koav) der neuen Bundesregierung festgeschrieben sind (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021), sind jedoch ebenso wenig berücksichtigt wie die Folgen des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine und der daraus folgenden Sanktionen gegen Russland und Belarus oder die Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft.

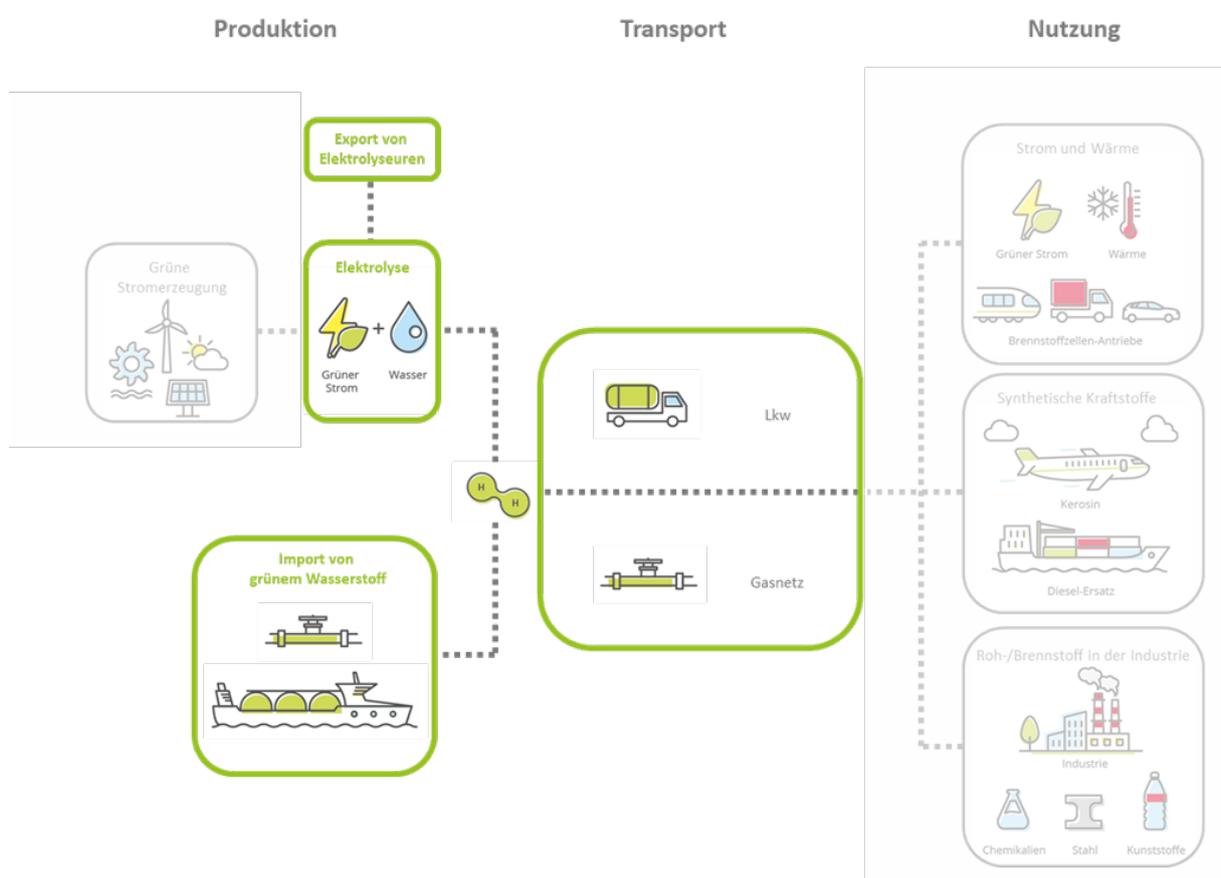
In Abbildung 3 ist die Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ mit ihren Komponenten Produktion, Transport und Nutzung von grünem Wasserstoff schematisch dargestellt. Dabei sind in Grün die Teile der Wertschöpfungskette markiert, welche im Alternativszenario – im Folgenden als **Wasserstoff-Szenario** bezeichnet – berücksichtigt werden. Das Wasserstoff-Szenario bildet im Vergleich zum Referenzszenario einen teilweisen Umstieg Deutschlands auf die stoffliche und energetische Nutzung von grünem Wasserstoff ab und berücksichtigt dabei explizit die Sicherstellung der Versorgung mit grünem Wasserstoff. Dabei wird berücksichtigt:

1. die Herstellung von Wasserstoff im Inland (mittels Elektrolyseanlagen),
2. der Import der darüberhinausgehenden Wasserstoffbedarfe aus dem Ausland,

3. der Aufbau und Betrieb eines Wasserstoff-Transportsystems innerhalb Deutschlands sowie
4. der Export von Elektrolyseuren.

Weitergehende Effekte wie beispielsweise Veränderungen in den Produktionsprozessen energieintensiver Industrien wie Stahl, Chemie oder Zement, die Herstellung von Brennstoffzellfahrzeugen oder verstärkte Forschungs- und Entwicklungsausgaben sind dagegen nicht Teil dieses Szenarios. Grund dafür ist, dass zum Zeitpunkt der Szenarioerstellung noch umfangreiche Forschungsarbeiten ausstehen, wie sich der Aufbau einer Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ in Deutschland im Detail vollziehen wird. Dies gilt insbesondere für die Umstellung der Produktionsprozesse in der Industrie (vgl. STEEG u. a. 2022). Ebenso nicht berücksichtigt ist der Ausbau der erneuerbaren Energien und welcher Teil davon für die inländische Produktion von grünem Wasserstoff genutzt werden kann. Auch wird von keiner Substitution fossiler Energieimporte durch grünen Wasserstoff ausgegangen, da die preisliche Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff noch offen ist und es diesbezüglich noch weiterer Recherche bedarf.

**Abbildung 3: Abdeckung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ im Wasserstoff-Szenario-v1.0**



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an PROJEKTRÄGER JÜLICH (2022)

Dennoch soll mit diesem Szenario zumindest ein Teilaspekt einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland abgebildet werden. Dies ermöglicht es, die Größenordnungen der verschiedenen Effekte abzuschätzen, die sich aus dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ergeben. Zusätzlich werden neben dem Wasserstoff-Szenario verschiedene Sensitivitätsanalysen erstellt, in denen einzelne Annahmen des Wasserstoff-Szenarios variiert und deren Wirkungen analysiert werden. Aus den Ergebnissen lässt sich darauf schließen, welche Stellgrößen die größten Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum und den Arbeitsmarkt haben werden (vgl. KAUSCHE 2018). Entsprechend lassen sich daraus Impulse ableiten, wie eine Wasserstoffwirtschaft aufgebaut werden kann und wie dabei die

Arbeitsmarktpotenziale bestmöglich ausgeschöpft werden können. Im Folgenden werden die Annahmen zur Abbildung des Wasserstoff-Szenarios im Detail dargestellt, auf die Variation der Einstellungen für die Sensitivitätsanalysen wird im fünften Kapitel eingegangen.

### 3 Annahmen des Wasserstoff-Szenarios

Ausgangspunkt für das Wasserstoff-Szenario sind die Ziele der NWS und die auf Wasserstoff bezogenen Ziele des KoA der neuen Bundesregierung. Die Berechnung des Wasserstoff-Szenarios erfordert eine Vielzahl an Eingriffen in das Prognosemodell, deren gesamtwirtschaftliche Effekte in ihrer Gänze ohne modelltheoretischen Hintergrund nicht abzuschätzen sind. Einzelne Maßnahmen können sich dabei in ihren Wirkungen verstärken, abschwächen oder ausgleichen – der Gesamteffekt ist a priori unbekannt. Umso entscheidender sind die gesetzten Annahmen und die Festlegung der notwendigen Stellschrauben. Diese formen über die Modellmechanismen den Output und bedürfen daher einer genauen Beschreibung und Begründung.

In Tabelle 1 findet sich eine Übersicht der im Wasserstoff-Szenario über die QuBe-Basisprojektion hinaus getroffenen Annahmen. Die folgenden Abschnitte erläutern diese im Detail.

**Tabelle 1: Übersicht Annahmen des Wasserstoff-Szenarios-v1.0**

Annahme	Inhalt
Herstellung von Wasserstoff im Inland	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 GW Elektrolysekapazität in 2030</li> <li>• 4000 Volllaststunden/Jahr</li> <li>• Wirkungsgrad: 67% (heute), 70% (2030)</li> <li>• Ergibt 28 TWh inländisch produzierten Wasserstoff in 2030</li> </ul>
Importbedarf von Wasserstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtbedarf in 2030: 50 TWh</li> <li>• Importbedarf in 2030: 22 TWh</li> <li>• Bezug aus Nordafrika</li> <li>• Transport zu 50% per Pipeline und zu 50% per Schiff</li> </ul>
Wasserstoff-Transportsystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umrüstung und Neubau von Gaspipelines, im Verhältnis von 80 zu 20</li> </ul>
Export von Elektrolyseuren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Globale Elektrolysekapazität in 2030: 157 GW</li> <li>• Deutscher Marktanteil: 20%</li> </ul>

Quelle: QuBe-Projekt

#### 3.1 Herstellung von Wasserstoff im Inland

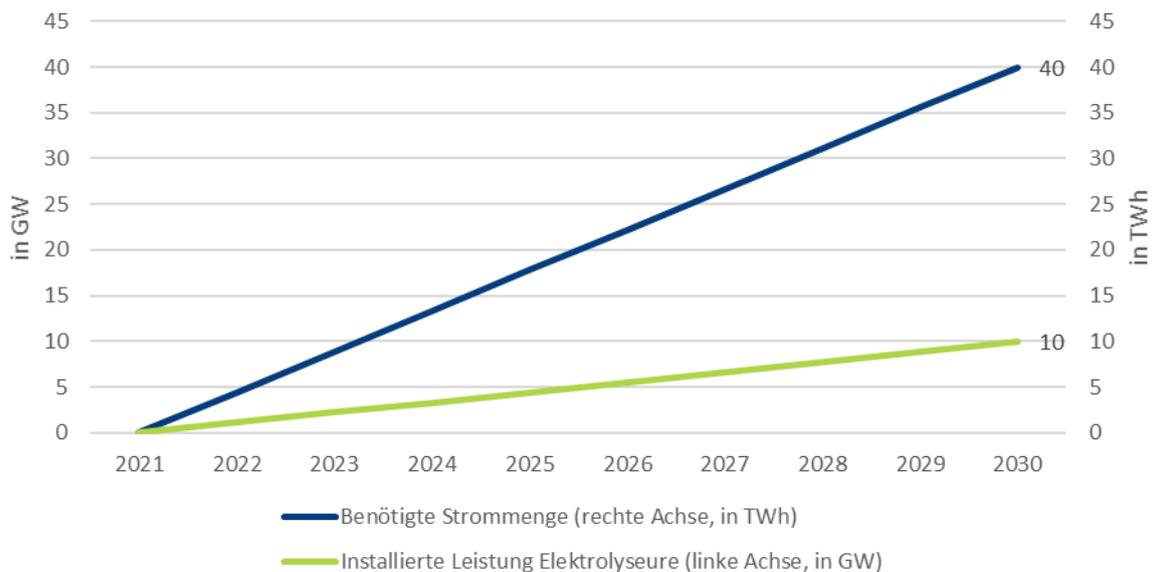
Im Wasserstoff-Szenario leitet sich die inländische Wasserstoffelektrolyse aus zwei Aspekten ab: zum einen aus der Menge des im Inland hergestellten Wasserstoffs (Elektrolysekapazität), zum anderen aus den Investitions- und Produktionskosten, die für die Bereitstellung und den Betrieb der Elektrolyseanlagen anfallen. Die folgenden Unterabschnitte legen die Annahmen bezüglich dieser beiden Punkte dar.

##### 3.1.1 Elektrolysekapazität

Die Elektrolysekapazität zur Produktion von grünem Wasserstoff im Inland wird im Wasserstoff-Szenario von den Zielen der NWS bestimmt, die von der neuen Bundesregierung im KoA auf zehn Gigawatt (GW) bis 2030 festgelegt wurde. Es wird unterstellt, dass dieses Ziel linear bis 2030 erreicht wird – es wird also ein stetiger Ausbaupfad angenommen. Die Annahme impliziert ebenfalls, dass es zu keinem höheren Ausbaupfad kommen wird. Sie unterstellt aber auch, dass das anvisierte Ziel erreicht wird.

Der hierfür benötigte Stromeinsatz errechnet sich unter der Annahme, dass die Elektrolyseure unter einer Volllaststundenzahl von 4.000 Stunden im Jahr laufen werden (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020). Daraus ergibt sich im Jahr 2030 bei einer Kapazität von zehn GW ein Strombedarf von 40 Terawattstunden (TWh) (vgl. Abbildung 4). Dieser Strom wird annahmegemäß aus erneuerbaren Energieanlagen in Deutschland bezogen. Im Wasserstoff-Szenario wird unterstellt, dass dieser benötigte Stromeinsatz aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht, ohne zusätzliche Investitionen für deren Ausbau im Vergleich zur QuBe-Basisprojektion anzusetzen.

**Abbildung 4: Installierte Leistung Elektrolyseure und benötigte Strommenge aus erneuerbaren Quellen**



Quelle: SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI (2021); BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2020); QuBe-Projekt

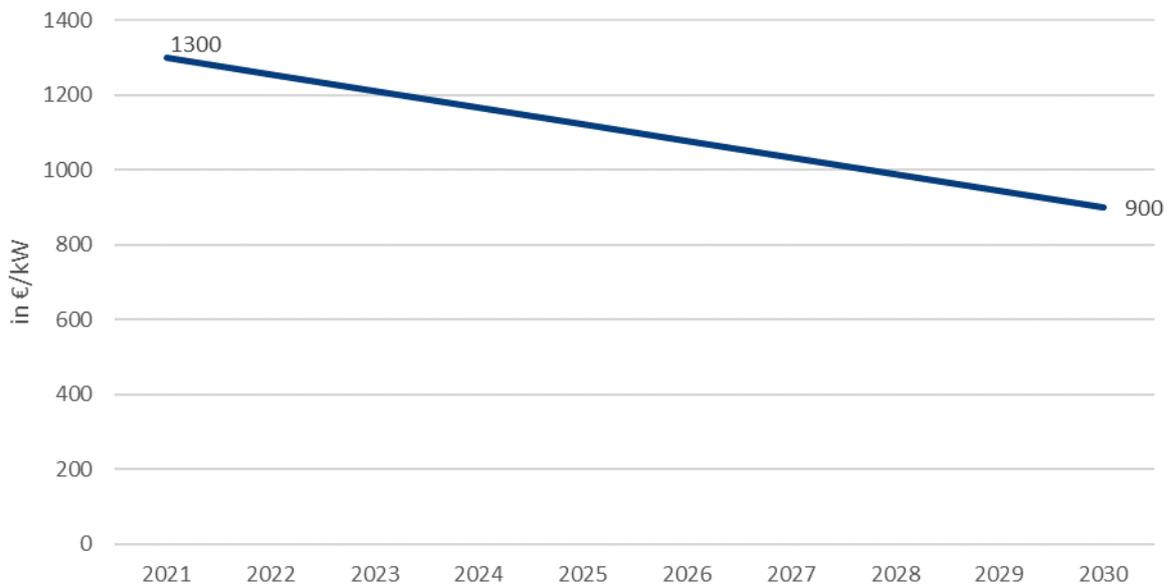
Aus den Kapazitätsvorgaben der installierten Leistung errechnet sich das inländische Wasserstoffproduktionspotential aus zwei Annahmen: Volllaststundenzahl und Wirkungsgrad der Elektrolyseure. Wie oben bereits erwähnt, wird im Wasserstoff-Szenario für alle Jahre bis 2030 eine Volllaststundenzahl von 4.000 Stunden pro Jahr unterstellt. Der Wirkungsgrad liegt heute bei 67 Prozent. Bis zum Jahr 2030 wird eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf 70 Prozent unterstellt (vgl. SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN 2021). Der Wirkungsgrad einer Elektrolyseanlage beschreibt ihre Effizienz. Je höher der Wirkungsgrad, desto mehr grüner Wasserstoff kann aus einer gegebenen Menge (grünen) Stroms erzeugt werden. Aus diesen zwei Annahmen ergibt sich aus der NWS für das Jahr 2030 eine inländische Wasserstoffproduktion in Höhe von 28 TWh.

### 3.1.2 Investitions- und Produktionskosten

Für die inländische Wasserstoffproduktion fallen Kosten für die Herstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren an. Hierfür müssen Annahmen für die Investitions- und die Produktionskosten getroffen werden. Die notwendigen Investitionskosten unterliegen annahmegemäß einer Kostendegression. Das heißt, im Zeitablauf werden die Investitionen für eine Elektrolyseanlage stetig günstiger (vgl. MERTEN u. a. 2020). Da es unterschiedliche Elektrolyseanlagen mit unterschiedlichen Kostenspannen gibt, diese allerdings nicht in einem ökonomischen Modell einzeln berücksichtigt werden können, wird im Wasserstoff-Szenario als Investitionskosten der Mittelwert der spezifischen Investitionskosten einer PEM (proton exchange membrane, Protonen-Austausch-Membran) Elektrolyseanlage angewendet. Demnach werden die Investitionskosten von heute

1.300 Euro pro Kilowatt (kW) auf 900 Euro pro kW im Jahr 2030 fallen (vgl. MERTEN u. a. 2020, Abbildung 5). Damit trifft eine steigende installierte Elektrolyseleistung im Zeitablauf auf fallende Investitionskosten (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). Die Investitionen werden vor allem in den ersten Jahren vom Staat getragen. Bis 2030 laufen diese allerdings sukzessive aus und kumulieren sich auch nur bis zu einer Gesamtinvestitionssumme von sieben Mrd. Euro. Diese gehen aus der NWS hervor. Die darüber hinaus gehenden Investitionskosten werden von den vier investierenden Wirtschaftszweigen, der Chemie-, der Stahl- und Zementindustrie sowie der Energiewirtschaft, getragen.

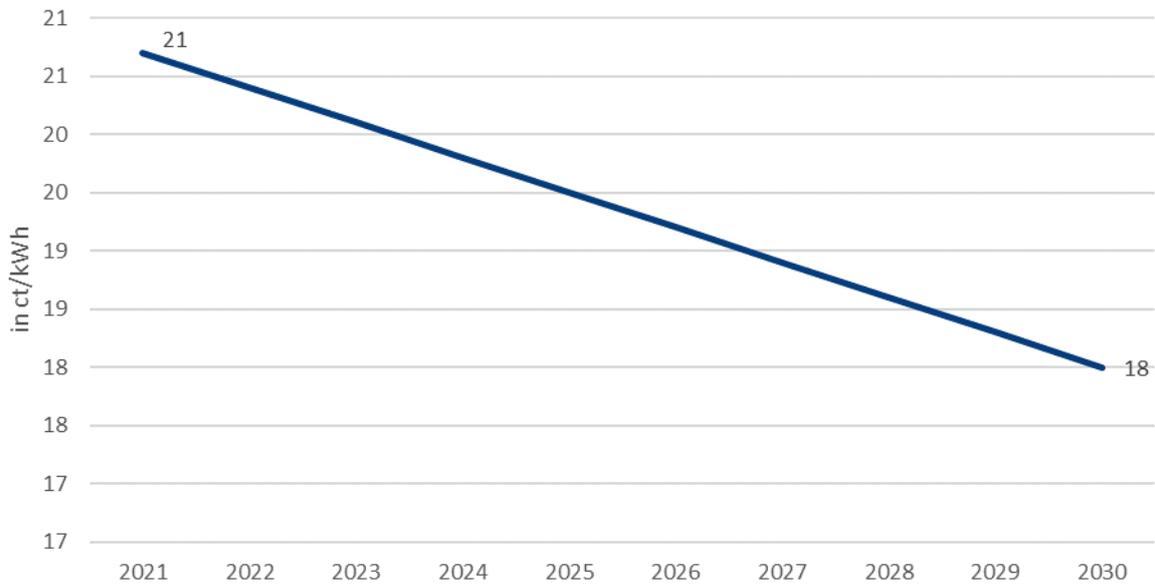
**Abbildung 5: Investitionskosten Elektrolyseanlagen**



Quelle: MERTEN u. a. (2020)

Wenn die Elektrolyseanlagen errichtet sind, entstehen laufende Kosten für den Betrieb der Elektrolyseure. Darunter fallen Kosten wie der Einkauf von Strom, die Wartung und Reparatur der Anlagen usw. Die errichteten Anlagen im Inland werden die Wasserstoffproduktion gemäß Zielvorgaben der NWS herstellen (28 TWh im Jahr 2030, vgl. Abschnitt 3.1.1). Die Betriebskosten werden annahmegemäß ebenso wie die Investitionskosten sukzessive fallen. Heute werden dafür 21 Cent pro Kilowattstunde (kWh) veranschlagt. Im Jahr 2030 sind es nur noch 18 Cent pro kWh (vgl. MERTEN u. a. 2020, Abbildung 6). Die Produktionskosten fallen bei denjenigen Industrien an, die annahmegemäß zunächst grünen Wasserstoff produzieren werden. Das sind die Chemie-, die Stahl- und Zementindustrie, die für den Eigenverbrauch produzieren, sowie die Energieversorger.

**Abbildung 6: Produktionskosten Elektrolyse**



Quelle: MERTEN u. a. (2020)

### 3.2 Importbedarfe von Wasserstoff

Analog zur Herstellung des grünen Wasserstoffs im Inland leitet sich dessen Import aus dem Ausland anhand zweier Größen ab: zum einen aus der Menge des zu importierenden Wasserstoffs und zum anderen aus dessen Grenzübergangspreis. Dieser setzt sich aus den Herstellungskosten im Ausland und den Transportkosten zusammen. Die folgenden Unterabschnitte stellen die Annahmen zu diesen Punkten dar.

#### 3.2.1 Importmenge Wasserstoff

Der Wasserstoffbedarf in Deutschland wird gemäß Studienlandschaft höher ausfallen als die NWS an inländischen Produktionskapazitäten vorhält (vgl. MÖNNIG u. a. 2022). Für die Darstellung der Wasserstoffbedarfe in Deutschland wurden insgesamt zehn verschiedene Studien, welche unterschiedliche Szenarien beinhalten, ausgewertet. Sämtliche Studien wurden zwischen 2017 und 2021 veröffentlicht (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Ausgewertete Studien zu nationalen Wasserstoffbedarfen**

Autoren/Organisation	Veröffentlichungsjahr	Studientitel	Ausgewertete Szenarien	Prognosehorizont/e
HECKING u. a.	2017	Energiemarkt 2030 und 2050	Revolution	2030, 2050
			Evolution	2030, 2050
GERBERT u. a.	2018	Klimapfade für Deutschland	95%-Klimapfad	2050
DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR	2018	dena-Leitstudie Integrierte Energiewende	TM80	2030, 2050
			EL80	2030, 2050
			TM95	2030, 2050
			EL95	2030, 2050
NOW	2018	Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen	S85	2050
			S90	2050
			S95	2050
HEBLING u. a.	2019	Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland	Szenario A	2030, 2050
			Szenario B	2030, 2050
MICHALSKI u. a.	2019	Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen	EL -80%	2030, 2050
			EL -95%	2030, 2050
			H <sub>2</sub> -80%	2030, 2050
			H <sub>2</sub> -95%	2030, 2050
ROBINIUS u. a.	2020	Wege für die Energiewende	Szenario 80	2030, 2050
			Szenario 95	2030, 2050
PROGNOS AG/ÖKO-INSTITUT E. V./WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE GGBH	2020	Klimaneutrales Deutschland	Klimaneutral 2050	2030, 2050
			Klimaneutral minimal	2030, 2050
STERCHELE u. a.	2020	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem	Referenz	2030, 2050
			Beharrung	2030, 2050
			Inakzeptanz	2030, 2050
			Suffizienz	2030, 2050
STIFTUNG ARBEIT UND UMWELT DER IG BCE	2021	Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa	Szenario A	2030, 2050
			Szenario B	2030, 2050

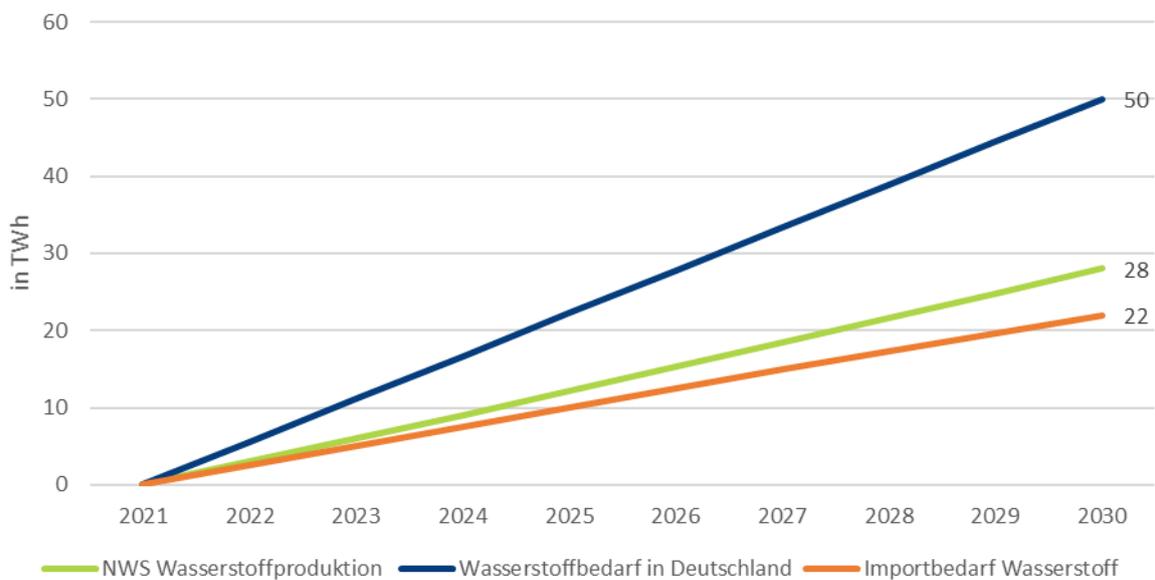
Quelle: QuBe-Projekt

Im Jahr 2030 variiert der geschätzte Wasserstoffbedarf um den Medianwert von 50 TWh. Dabei sind alle in der Tabelle betrachteten Szenarien auf eine 95-prozentige Reduktion der Treibhausgase bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu 1990 ausgelegt – und somit auf eine Reduktion um 55 Prozent bis zum Jahr

2030. Der Medianwert aus den Studien wurde als Bedarfsgröße für Deutschland für das Jahr 2030 angenommen. Der Bedarf wächst annahmegemäß linear an.

Der zukünftige Wasserstoffbedarf Deutschlands geht in den allermeisten untersuchten Studien über die anvisierte Elektrolysekapazität von zehn GW in 2030 hinaus. Unter der Annahme, dass dieses Ziel an inländischer Produktion von grünem Wasserstoff erreicht wird, wird zur inländischen Bedarfsdeckung der Import von grünem Wasserstoff notwendig sein. Im Jahr 2030 wird der Importbedarf daher auf 22 TWh angewachsen sein (vgl. Abbildung 7).

**Abbildung 7: Wasserstoffproduktion in Deutschland, inländischer Gesamtbedarf und Importbedarf**



Quelle: SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI (2021); QuBe-Projekt

Im Wasserstoff-Szenario wird nicht unterstellt, dass es zu einer Substitution von fossilen Importen durch Wasserstoffimporte kommen wird. Die unterstellten Wasserstoffimportbedarfe fallen also zusätzlich an. Dies ist eine wichtige Annahme und unterliegt der weiteren Analyse, denn das langfristige Ziel ist unter anderem, mittels grünen Wasserstoffs den Einsatz von fossilem Roh- und Brennstoff substituieren zu können, zum Beispiel in der Stahlindustrie, wo Wasserstoff anstelle von Koks als Reduktionsmittel eingesetzt werden kann (vgl. HOFERICHTER 2019). Der Grund, warum im Wasserstoff-Szenario von keiner Substitution ausgegangen wird, ist, dass der Umfang der Einsparung noch nicht abgeschätzt werden kann und die Preisentwicklung von Wasserstoff und fossilen Energieträgern noch unklar ist.

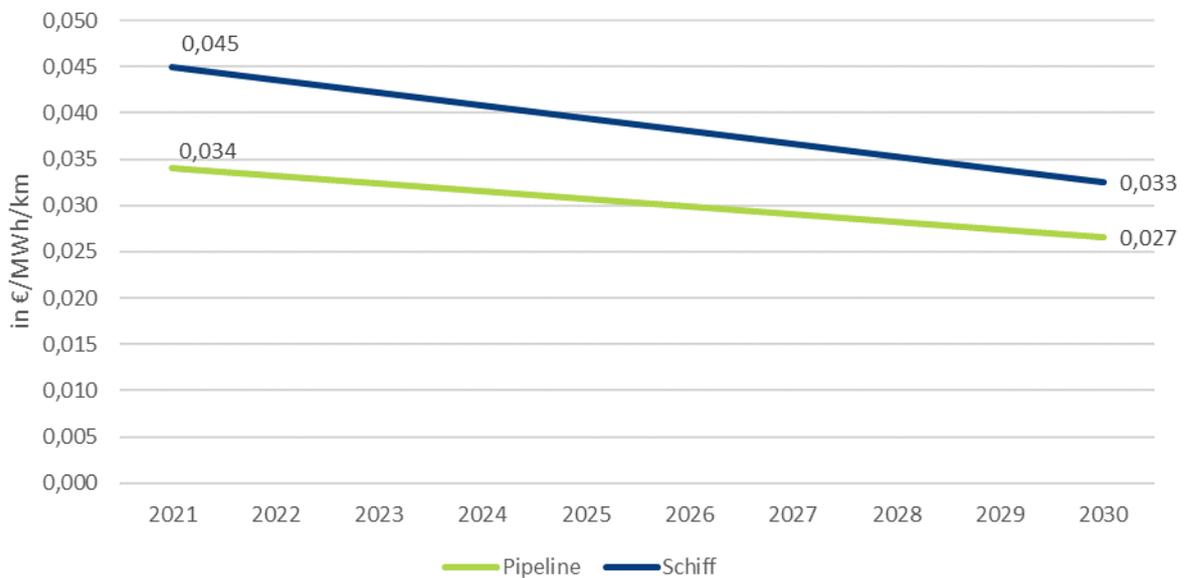
### 3.2.2 Grenzübergangspreis

Der zuvor errechnete Importbedarf in TWh wird unter Berücksichtigung der Produktionskosten im Ausland und den internationalen Transportkosten in Euro umgerechnet. Im Wasserstoff-Szenario wird davon ausgegangen, dass der gesamte Importbedarf aus Nordafrika bezogen wird. Diese Region wird als eine der Regionen erachtet, die am ehesten den Importbedarf Deutschlands decken könnte (vgl. MERTEN u. a. 2020).

Für die Abwägung der anfallenden Transportkosten muss die Distanz und die Transportart (per Schiff oder Pipeline) definiert werden. Im Wasserstoff-Szenario wird von einer durchschnittlichen Distanz von 4.000 km ausgegangen. Der benötigte grüne Wasserstoff wird jeweils hälftig per Schiff und

Pipeline angeliefert. Es wird davon ausgegangen, dass Schiffe und Pipelines für den Transport vorhanden sind. Die Transportkosten werden im Zeitablauf sowohl für Schiff als auch für Pipeline günstiger (vgl. Abbildung 8). Per Schiff Wasserstoff zu transportieren wird jedoch auch bis 2030 noch teurer sein als über Pipeline (vgl. MERTEN u. a. 2020).

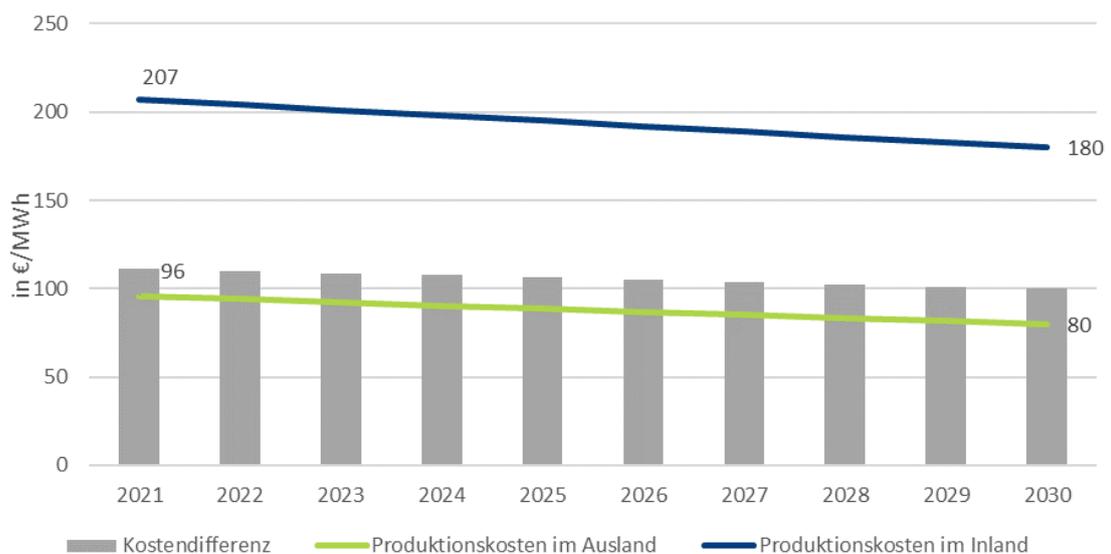
**Abbildung 8: Internationale Transportkosten**



Quelle: MERTEN u. a. (2020)

Die Produktionskosten im Ausland sind annahmegemäß günstiger als im Inland. Der Haupttreiber dafür ist die Annahme, dass der erneuerbare Strom günstiger im Ausland hergestellt werden kann als im Inland. Im Wasserstoff-Szenario wird eine Kostendifferenz von heute 111 Euro pro Megawattstunde (MWh) unterstellt. Die Kostendifferenz wird bis 2030 leicht abnehmen, aber dann immer noch 100 Euro pro MWh betragen (vgl. Abbildung 9).

**Abbildung 9: Produktionskosten im Ausland und im Inland**

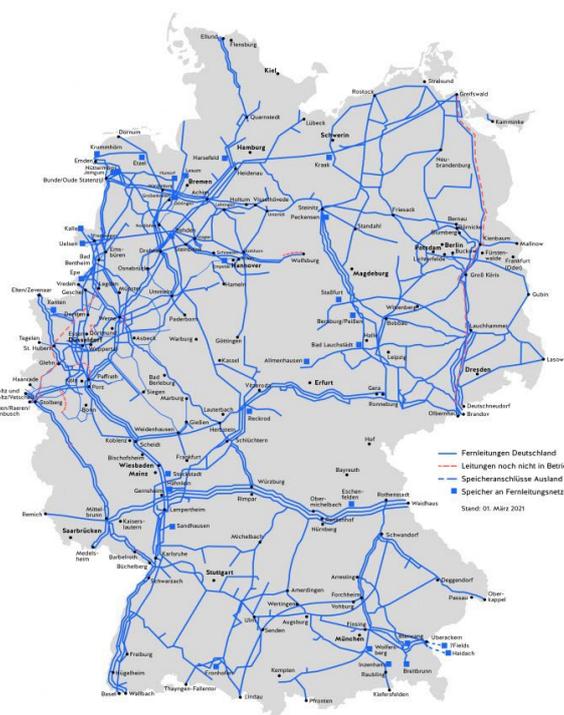


Quelle: MERTEN u. a. (2020); QuBe-Projekt

### 3.3 Wasserstoff-Transportsystem

Der in Deutschland produzierte sowie der importierte grüne Wasserstoff muss schließlich zwischengespeichert und weiterverteilt werden. Für die Verteilung von grünem Wasserstoff bietet sich zunächst die Nutzung eines unterirdischen Pipelinennetzes an. Deutschland verfügt bereits über ein umfangreiches Gas-Fernleitungsnetz, welches sich gegenwärtig aus rund 40.000 Leitungskilometern zusammensetzt (vgl. Abbildung 10). Zusätzlich umfasst das Verteilnetz, welches das Gas regional an die Endabnehmenden verteilt, rund 555.000 Leitungskilometer (vgl. BOCHOLTER ENERGIE- UND WASSERVERSORGUNG GMBH 2022; BUNDESNETZAGENTUR FÜR ELEKTRIZITÄT, GAS, TELEKOMMUNIKATION, POST UND EISENBAHNEN/BUNDESKARTELLAMT 2022).

**Abbildung 10: Gas-Fernleitungsnetz in Deutschland**



Quelle: VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. (2021a)

Verschiedene Studien zeigen, dass zukünftig neben Wasserstoff weitere Gase in Deutschland nachgefragt und somit transportiert werden müssen. Während die Menge der infrastrukturegebundenen Gasnachfrage im Vergleich zu heute insgesamt nahezu konstant bleiben dürfte, wird sich ihre Struktur voraussichtlich verschieben: Die Durchleitung von fossilem Erdgas wird zunehmend an Bedeutung verlieren, während Biomethan sowie Power-to-Gas-Produkte, wie beispielsweise Methan oder Ammoniak, in höherem Maße per Gasleitung transportiert werden (vgl. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018, Teil B, S. 222). Da es sich bei den genannten Beispielen um physikalisch gleichwertige Gase im Vergleich zu Erdgas handelt, ist hier keine zusätzliche Umrüstung der bestehenden Gasinfrastruktur erforderlich (vgl. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018). Wasserstoff weist jedoch davon abweichende Eigenschaften auf (vgl. STEEG u. a. 2022), weshalb eine Umrüstung der Leitungen erforderlich ist. Dazu gehören der Austausch bzw. eine Anpassung der darin eingesetzten Geräte wie Druckregler und Volumenstrommessgeräte (vgl. DEGÜNTHER u. a. 2019).

Zudem besteht die Möglichkeit der Beimischung von Wasserstoff aktuell zum Erdgas bzw. zukünftig den Power-to-Gas-Produkten. Aktuell ist eine Beimischung von bis zu zehn Volumenprozent gestattet. Diese Quote kann zukünftig jedoch auf bis 20 Prozent erhöht werden (vgl. DEUTSCHE VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V. 2019). Da Wasserstoff – insbesondere in der Industrie und im Verkehr – jedoch in Reinform benötigt wird, wird lediglich der Transport von reinem Wasserstoff berücksichtigt, während dessen Beimischung außen vorgelassen wird.

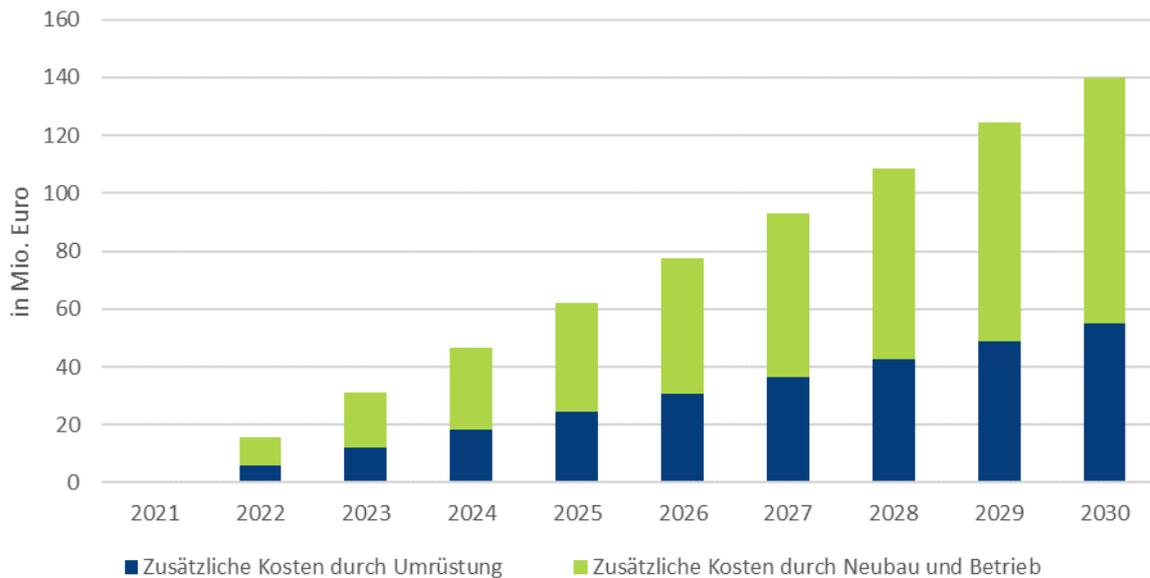
Somit muss die zukünftige Gasinfrastruktur sowohl für Wasserstoff als auch getrennt davon für weitere Gase konzipiert sein. Das aktuelle Gasnetz verfügt in mehreren Abschnitten über parallellaufende Leitungen (vgl. Abbildung 10), da es bereits heute für verschiedene Gasqualitäten ausgelegt ist. Diese redundanten Leitungen lassen sich daher entkoppeln und für den getrennten Transport von reinem Wasserstoff umwidmen und entsprechend umrüsten (vgl. FRONTIER ECONOMICS u. a. 2017). Jedoch zeigen Netzplanungen der Fernleitungsnetzbetreiber, dass der Aufbau eines Wasserstoffnetzes voraussichtlich nicht ohne den Neubau von Wasserstoffleitungen auskommen wird. Grund dafür ist, dass zukünftige Bedarfsschwerpunkte für grünen Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen noch an Erzeugerregionen in Norddeutschland mit hohen Elektrolysekapazitäten angeschlossen werden müssen (VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. 2021a; 2021b; 2021c). Dabei ist jedoch fraglich, zu welchen Anteilen sich ein zukünftiges Wasserstoffnetz aus umgerüsteten und neu verlegten Leitungen zusammensetzen wird. Der geschätzte Anteil neu verlegter Pipelines am Wasserstoffnetz reicht in den analysierten Studien von null (vgl. DEGÜNTHER u. a. 2019) bis hin zu rund 27 Prozent (vgl. VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. 2021c). Da die Kosten für den Neubau von Wasserstoffleitungen deutlich höher ausfallen werden als für eine Umrüstung, besteht Einigkeit, dass die bestehende Gasinfrastruktur so weit wie möglich weitergenutzt werden sollte und eine Umrüstung bestehender Leitungen einem Neubau vorzuziehen ist (vgl. VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. 2021a; DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018; DEGÜNTHER u. a. 2019). Dabei spielen hohe Rückbaukosten für stillgelegte Erdgasleitungen ebenso eine Rolle. Gemäß FRONTIER ECONOMICS u. a. (2017) belaufen sich diese auf bis zu 800.000 Euro pro Leitungskilometer.

Im Wasserstoff-Szenario wird daher angenommen, dass das aktuelle Erdgasleitungsnetz künftig weiter genutzt wird und somit keine Rückbaukosten im Vergleich zum Referenzlauf anfallen. Bezüglich des Wasserstoffnetzes wird angenommen, dass 80 Prozent des Wasserstoffbedarfs über umgerüstete Erdgaspipelines transportiert werden. Die daraus hervorgehenden zusätzlichen Investitionen werden anhand der Differenz der aktuellen Investitionskosten für den Erhalt und die Erneuerung der Gasnetze sowie den Umrüstungskosten für die Nutzungsbereitschaft von Wasserstoff (sog. „Wasserstoffreadiness“) abgeschätzt. In 2015 wurden insgesamt 586 Mio. Euro zum Erhalt und der Erneuerung der Gasnetze investiert, während diese eine infrastrukturegebundene Gasnachfrage von 787 TWh abgedeckt haben (vgl. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018, Teil B; FRONTIER ECONOMICS u. a. 2017). Dies entspricht rund 0,75 Euro pro MWh. Laut den Berechnungen der Deutschen Energie-Agentur (dena) (2018) belaufen sich die Umrüstungskosten für die Nutzung von Wasserstoff bei bestehenden Leitungen auf 2,12 Euro pro MWh. Damit werden im Wasserstoff-Szenario zusätzliche Investitionskosten in Höhe von 1,37 Euro pro MWh Wasserstoff angesetzt, der durch umgerüstete Pipelines transportiert wird. Diese werden von den Energieversorgern getätigt und teilen sich zu 80 Prozent in Bauinvestitionen und 20 Prozent in Ausrüstungsinvestitionen auf. Die Betriebskosten bleiben außen vor, da diese in der Referenzentwicklung für den Betrieb der bestehenden Leitungen ebenso anfallen würden. Die restlichen 20 Prozent des Wasserstoffbedarfs werden über neu installierte Leitungen verteilt. Dafür wird ein Kostensatz von 8,48 Euro pro MWh Wasserstoff angesetzt, der sowohl die Installations- als auch die zusätzlich anfallenden Betriebskosten umfasst (vgl. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018). Diese werden ebenfalls durch die Energieversorger getätigt und im

Verhältnis 60:15:25 nach Bauinvestitionen, Ausrüstungsinvestitionen und Wartungs- und Betriebskosten aufgeteilt.

Anhand dieser Kostensätze und den in Abschnitt 3.2.1 definierten Wasserstoffbedarfsmengen ergeben sich im Vergleich zum Referenzlauf für das Wasserstoff-Szenario bis zum Jahr 2030 insgesamt rund 700 Mio. Euro an kumulierten Investitions- und Betriebskosten für das Wasserstoffnetz (vgl. Abbildung 11).

**Abbildung 11: Kosten durch Umrüstung und Neubau von Gasleitungen (kumuliert, in Mio. €)**



Quelle: QuBe-Projekt

An dieser Stelle ist zu betonen, dass im Modell keine eigene Simulation der Gasinfrastruktur durchgeführt wird und die Kostenabschätzung stark annahmegetrieben ist. Die Kostenschätzungen basieren damit auf bisherigen Forschungsergebnissen und lassen sich weniger als spezifischen Wert interpretieren, sondern eher als Größenordnung. Die in Kapitel 5.3 dargestellten Sensitivitätsanalysen dienen ebenfalls dazu, die Arbeitsmarkteffekte dieses Szenarioaspektes zu verdeutlichen.

### 3.4 Export von Elektrolyseuren

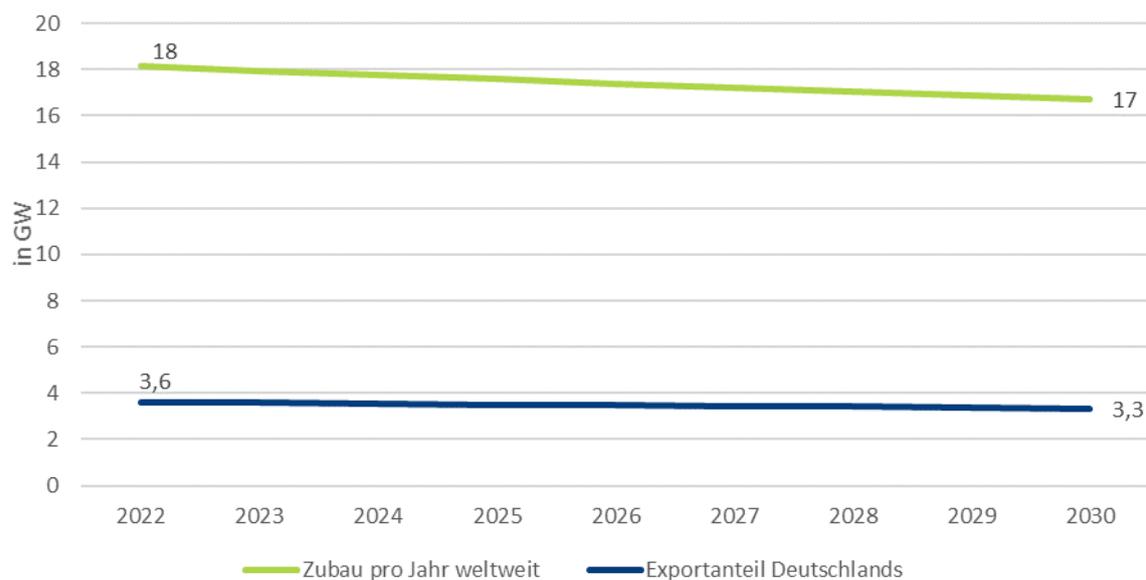
Die Exportmöglichkeiten deutscher Unternehmen hängen zum einen davon ab, wie hoch der Elektrolysebedarf im Ausland ist, und zum anderen davon, wie hoch der Marktanteil deutscher Unternehmen am weltweiten Export von Elektrolyseuren liegt. Das Wasserstoff-Szenario unterstellt, dass nicht nur Deutschland, sondern auch die übrige Welt in die Produktion von grünem Wasserstoff einsteigt und somit der Bedarf an Elektrolyseuren weltweit anwächst.<sup>5</sup> Die internationale Bedarfsprojektion orientiert sich dabei an der Prognose der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency, IEA), die bis 2030 den globalen grünen Wasserstoffbedarf auf 467 TWh schätzt (vgl. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2020). Wird davon der in Deutschland hergestellte grüne Wasserstoff (bis 2030 28 TWh) abgezogen, ergibt sich der Produktionsbedarf in der übrigen Welt. Um diese Bedarfe decken zu können, ist der Aufbau einer globalen Elektrolyseleistung in Höhe von 157 GW notwendig. Dabei wird ebenfalls eine Volllaststundenanzahl von 4.000 Stunden pro Jahr und eine lineare Wirkungsgradverbesserung von heute 67 Prozent auf 70 Prozent im Jahr 2030 unterstellt (vgl.

<sup>5</sup> Von den Exportmöglichkeiten anderer zuliefernder Investitionsgüter infolge des Hochlaufs grüner Wasserstofftechnologien im Ausland wird in diesem Szenario abgesehen.

Abschnitt 3.1.1). Der Kapazitätszubau beläuft sich auf rund 17 GW pro Jahr. Der Marktanteil deutscher Elektrolyseurexporteure beträgt laut dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V (2022) 20 Prozent. Im Wasserstoff-Szenario wird unterstellt, dass Deutschland diese Position auch bis 2030 halten kann. Entsprechend wird es Deutschland möglich sein, im Schnitt jährlich circa 3,5 GW Elektrolyseurkapazität zu exportieren. Mit den unterstellten Investitionskosten aus Abschnitt 3.1.2 ergibt sich das zusätzliche Exportvolumen in Euro. Das Exportvolumen wird im Zeitablauf etwas absinken, da zum einen die Investitionskosten für die Elektrolyseure einer Kostendegression unterstehen (vgl. Abschnitt 3.1.2, Abbildung 5 ) und zum anderen der jährliche Kapazitätszubau leicht abnimmt (vgl. Abbildung 12).

Die hier formulierte Annahme bezieht sich auf den Technologieexport von Elektrolyseuren. Sie geht nicht davon aus, dass es gleichzeitig zu einem Exportrückgang von fossilen Kraftwerkstechnik kommen wird. Diese Annahme unterstellt, wie bei der Importannahme, dass auch das Ausland keine Substitution von fossilen Kraftstoffen vornimmt und somit der Exportbedarf von fossiler Kraftwerkstechnik weiter Bestand haben wird.

**Abbildung 12: Zubau und Exportanteil Deutschlands an installierter Elektrolyseleistung im Rest der Welt**



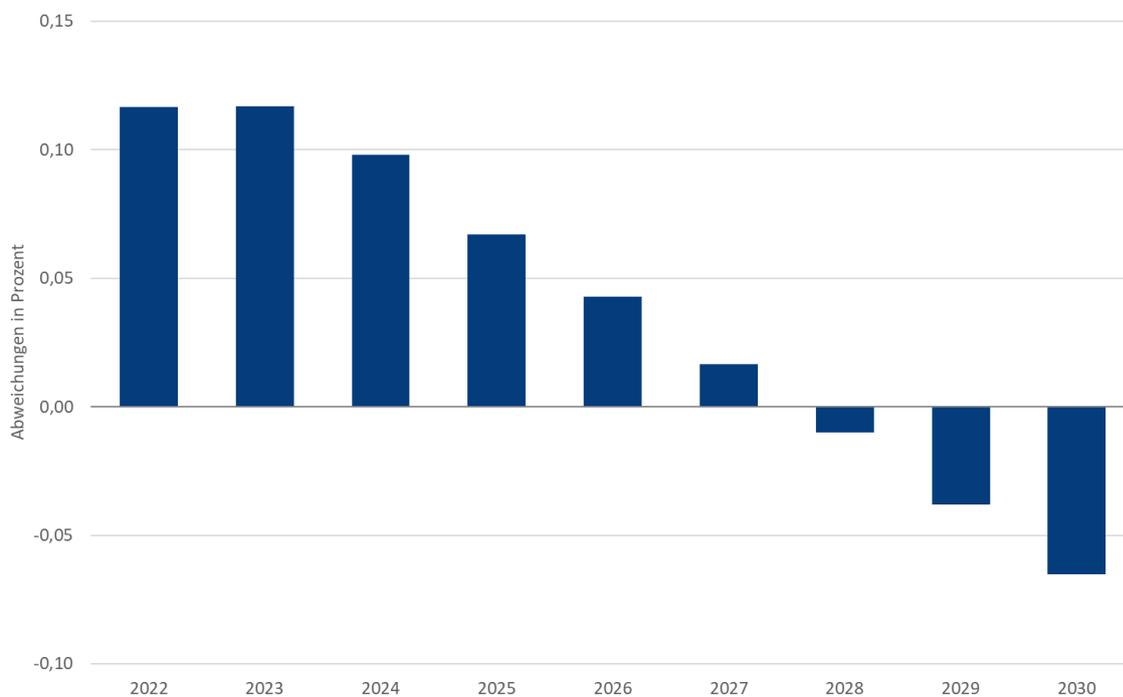
Quelle: QuBe-Projekt

## 4 Ergebnisse des Wasserstoff-Szenarios

Der Blick auf die Ergebnisse zeigt, dass sich die Ziele aus der NWS (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020) und dem KoA (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021) in der Modellrechnung zunächst leicht positiv auf die Wirtschaftsleistung in Deutschland auswirken. Zwischen 2022 und 2027 liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) im Wasserstoff-Szenario jährlich um 0,02 bis 0,12 Prozent höher als im Referenzszenario (vgl. Abbildung 13). Als Wachstumstreiber sind insbesondere die zusätzlich anfallenden Investitionen in Ausrüstungen und Anlagen zu identifizieren. Auch wird die Bautätigkeit, vor allem im Zuge des Ausbaus des Transportnetzes, etwas zunehmen. Zusätzlich positiv wirken sich die Exporte aus, die sich insbesondere für den deutschen Maschinenbau ergeben. Diese flachen allerdings gegen 2030 immer weiter ab. Dagegen steigt der Importbedarf Deutschlands nach grünem Wasserstoff weiter an. Dies ist die Folge eines stärker steigenden Bedarfes an grünem Wasserstoff in

der Wirtschaft, als die Realisierung inländischer Produktionskapazitäten aus der NWS und des KoAV vorhalten kann. Im Jahr 2030 liegt der Wasserstoffbedarf, gemäß der Literaturrecherche, im Median bei 50 TWh. Gemäß der NWS werden 28 TWh aus inländischer Produktion gedeckt. Entsprechend werden 22 TWh grüner Wasserstoff importiert werden müssen. Die positive BIP-Differenz zum Referenzszenario wird folglich immer kleiner bis sie in den Jahren 2028 bis 2030 leicht negativ wird. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es zu einem Rückgang der gesamtwirtschaftlichen Leistung kommen wird. Die negative Wirkung führt in den jeweiligen Jahren lediglich zu einem leicht niedrigeren Wachstum als im Referenzszenario, das in Summe weiter positiv ausfällt. Die Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios resultieren aus den getroffenen Annahmen, die den Ausbaupfad einer Wasserstoffwirtschaft so modellieren, dass die Ziele der NWS und des KoAV bis 2030 erreicht werden können (z.B. Erzeugungsanlagen von 10 GW Gesamtkapazität bis 2030). Sollte der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft länger dauern als im Modell angenommen, würden sich die Effekte zeitlich verschieben und in ihrer Ausprägung gegebenenfalls abweichen.

**Abbildung 13: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt in Prozent, Jahre 2022 – 2030**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

In Abbildung 14 sind die Abweichungen in den einzelnen Komponenten des preisbereinigten BIP bis 2030 zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenzszenario dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Steigerung der Wirtschaftsleistung in den ersten Jahren der Implementierungsphase vor allem auf hohe Investitionstätigkeiten zurückzuführen ist. Dies betrifft sowohl Investitionen im In- als auch im Ausland. Die inländischen Investitionen fließen vor allem durch die Ausrüstungsinvestitionen positiv in das nationale BIP ein. Zu den direkten Ausrüstungsinvestitionen zählen zum einen Investitionen in die Herstellung von Elektrolyseuren, die für die Produktion von grünem Wasserstoff benötigt werden, und zum anderen Investitionen in den Um- und Neubau von Gasleitungen. Für die Herstellung neuer Elektrolyseure dürften in den ersten fünf Jahren jährlich etwa eine Mrd. Euro investiert werden. Die jährlichen Investitionskosten für das Transportsystem dürften sich von rund 16 Mio. Euro im Jahr 2022 auf 140 Mio. Euro im Jahr 2030 steigern (vgl. Abschnitt 3.3, Abbildung 11). Hinzu kommen Ausrüstungsinvestitionen, die durch indirekte und induzierte Effekte entstehen. Diese umfassen

beispielsweise Investitionen, die ihrerseits zur Bereitstellung der spezifischen Investitionsgüter getätigt werden müssen oder Investitionen zur Produktion zusätzlich nachgefragter Güter.

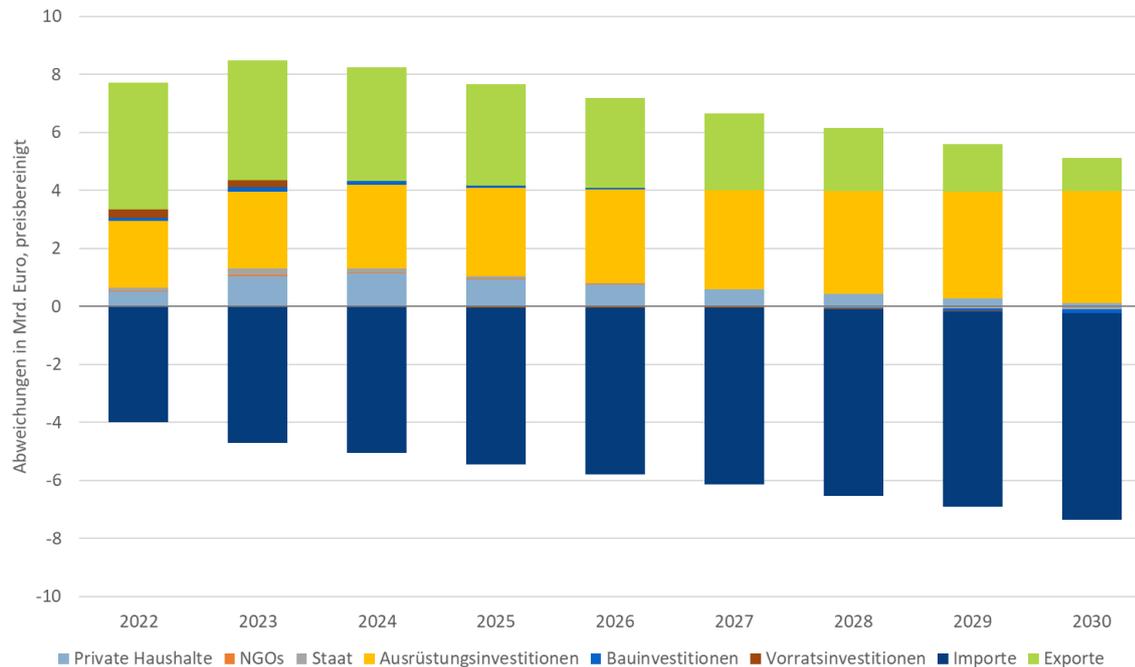
Die Nachfrage nach Wasserstoff steigt nicht nur in Deutschland, sondern weltweit (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2021). Somit wird auch im Ausland in neue Technologien zur Wasserstoffproduktion investiert. Werden diese Technologien aus Deutschland bezogen, fließt die dadurch entstandene Wertschöpfung über die Komponente „Exporte“ positiv in das nationale BIP ein. Die NWS räumt deutschen Unternehmen gute Chancen ein, sich als Anbieter von Wasserstofftechnologien zu etablieren und eine wichtige Rolle auf dem Weltmarkt einzunehmen (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2020). Unter der Annahme eines 20-prozentigen Anteils an den weltweiten Elektrolyseurexporten (vgl. Abschnitt 3.4), tragen die Exporte im Wasserstoff-Szenario einen erheblichen Teil zur erhöhten Wirtschaftsleistung bei.

Der modellierte Wachstumspfad der Wasserstoffwirtschaft zeigt eine Zunahme verschiedener Wirtschaftsaktivitäten. Diese lassen wiederum die Erwerbsbeteiligung steigen. Aufgrund verbesserter Verdienstmöglichkeiten bieten also mehr Personen ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt an als zuvor (vgl. KALINOWSKI/MÖNNIG/SÖHNLEIN 2021). Der Einstieg in den regulären Arbeitsmarkt geht in der Regel mit besseren Haushaltseinkommen einher und führt somit zu einem höheren aggregierten Einkommensniveau in der Volkswirtschaft. Dadurch erhöhen sich unter anderem die inländischen Konsumausgaben der Privathaushalte, was sich ebenfalls positiv auf das BIP auswirkt (vgl. SCHNUR/ZIKA 2009).

Neben den positiven Einflussfaktoren Investitionen, Export und Konsum kommt es im Zuge des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft auch zu dämpfenden Effekten. Diese gehen hauptsächlich von steigenden Importen aus, die negativ in die Berechnung des BIP einfließen. Da die Nachfrage nach Wasserstoff in der NWS höher eingeschätzt wird als die inländischen Produktionsmöglichkeiten, wird der zusätzlich benötigte Wasserstoff importiert werden müssen. Außerdem dürfte ein Teil der Ausrüstungsinvestitionen aus dem Ausland bezogen werden. Dies erhöht die Importe im Modell ebenso wie indirekte und induzierte Effekte. So ist anzunehmen, dass ein Teil der Vorleistungsgüter zur inländischen Herstellung von Elektrolyseuren aus dem Ausland importiert wird. Zusätzlich dürfte ein gewisser Teil der steigenden Konsumausgaben für importierte Güter und Dienstleistungen ausgegeben werden, was einen negativen Effekt auf die Außenhandelsbilanz nach sich zieht. In den Jahren 2028 bis 2030 führt der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft dazu, dass der Wert der zusätzlichen Importe die zusätzliche Wertschöpfung im Inland übersteigt, sodass es in Summe zur bereits oben erwähnten negativen Wirkung auf das BIP kommt.

Im Modell wurde der Rückgang des Imports fossiler Energieträger bislang nicht berücksichtigt, die zu einem gewissen Teil durch Wasserstoff substituiert werden können. Annahmen hierzu könnten die negative Wirkung der Importe abfedern. Andererseits könnten damit einhergehende Energiepreiserhöhungen zu einem Wettbewerbsverlust inländisch produzierter Güter führen und die Exporte reduzieren. Der Gesamteffekt auf die Außenhandelsbilanz kann somit nicht eindeutig abgeschätzt werden, ohne weitere Annahmen zu treffen und in das Modell mit einfließen zu lassen.

**Abbildung 14: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts in Mrd. Euro; Jahre 2022 – 2030**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

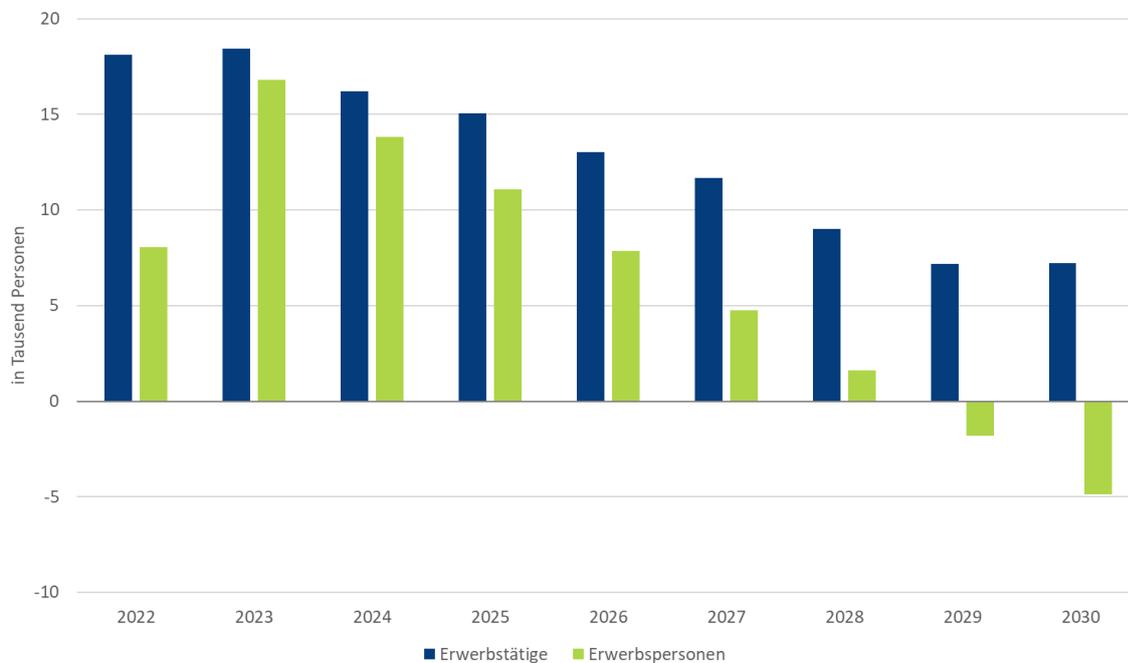
Auf den Arbeitsmarkt werden die getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durchweg positive Effekte haben. In Abbildung 15 sind die Abweichungen der Zahl der Erwerbstätigen und Erwerbspersonen zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenzszenario bis 2030 dargestellt. So wird es in den ersten Jahren der Implementierungsphase zu einem Anstieg der Erwerbstätigen um rund 18.000 Personen jährlich gegenüber dem Referenzszenario kommen. Ab 2024 ist die Zahl der zusätzlich erwerbstätigen Personen nicht mehr so hoch wie in den beiden Vorjahren. Die Erwerbstätigkeit liegt dann jedoch weiterhin über dem Niveau des Referenzszenarios und dies sogar in den Jahren, in denen ein negativer Effekt auf das BIP erwartet wird. Dies begründet sich dadurch, dass die negativen Wachstumseffekte insbesondere bei solchen Branchen auftreten, die einen geringeren Arbeitseinsatz pro Produktionswert aufweisen – wie beispielsweise die Chemie- oder Stahlbranche – als diejenigen Branchen, die positiv von der Transformation betroffen sind wie beispielsweise der Maschinenbau. So erwirtschaftet eine im Maschinenbau erwerbstätige Person rund 218.000 Euro, in der Stahlbranche sind es 358.000 Euro und in der Chemieindustrie bereits 378.000 Euro pro Jahr.<sup>6</sup>

Zwischen 2022 und 2028 liegt auch die Zahl der Erwerbspersonen über der im Referenzszenario, also diejenigen Personen, die ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt zur Verfügung stellen (vgl. Abbildung 15). Das heißt, dass durch die positive Wirtschaftsentwicklung im Vergleich zum Referenzszenario mehr Personen ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt anbieten werden. Einzig in den Jahren 2029 und 2030 liegt die Zahl der Erwerbspersonen um 2.000 respektive 5.000 niedriger. Bei gleichzeitig höherem Erwerbstätigenniveau führt dies zu einer Reduktion der Erwerbslosenzahlen im Vergleich zum Referenzszenario. Der reduzierende Effekt bei der Erwerbslosigkeit kann auch in den Vorjahren beobachtet werden, da die Zahl der zusätzlichen Erwerbstätigen stets über der Zahl der zusätzlichen

<sup>6</sup> Die Arbeitsproduktivität ist definiert als Quotient zwischen dem preisbereinigten Produktionswert und der Zahl der Erwerbstätigen in der jeweiligen Branche gem. der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen für das Jahr 2019 (vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT 2021).

Erwerbspersonen liegt. Besonders stark ist dieser Effekt im Jahr 2022. Die zusätzlichen Erwerbspersonen werden jedoch nicht ausreichen, eine steigende Knappheit auf dem Arbeitsmarkt zu vermeiden. Die Rekrutierung geeigneter Fachkräfte wird entsprechend schwieriger, wie sich auch in Abbildung 23 zeigt.

**Abbildung 15: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen in Tausend Personen, Jahre 2022 – 2030**



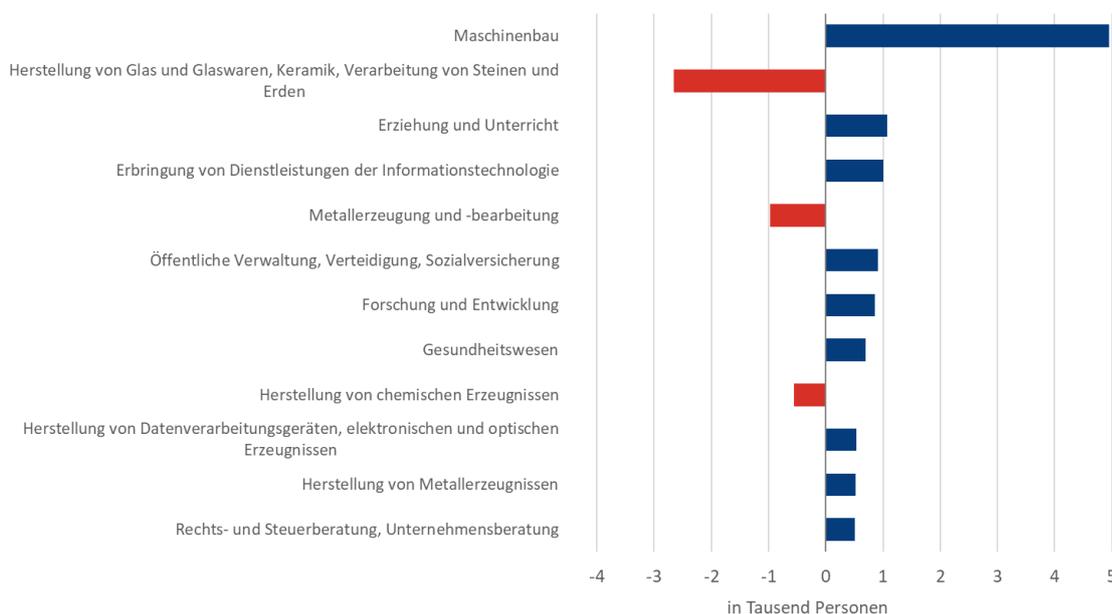
Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Der Blick auf die Erwerbstätigen getrennt nach Wirtschaftsbereichen zeigt ein heterogenes Bild. In Abbildung 16 sind die zwölf Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Abweichungen zum Referenzszenario im Jahr 2030 dargestellt. So gibt es Wirtschaftsbereiche, deren Erwerbstätigenzahlen vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft profitieren werden, während andere Wirtschaftsbereiche Erwerbstätige verlieren. Die Höhe der Verluste ist jedoch geringer als die Zahl der insgesamt aufgebauten Arbeitsplätze. Analog zu Abbildung 16 stellt Abbildung 17 die Wirtschaftsbereiche mit den zwölf größten relativen Abweichungen bei den Erwerbstätigen im Vergleich zum Referenzszenario im Jahr 2030 dar. Die Abweichungen werden hier ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen eines Wirtschaftsbereichs im Referenzszenario gesetzt.

Absolut betrachtet werden vor allem mehr Erwerbstätige im Maschinenbau beschäftigt sein (vgl. Abbildung 16). Dies ist insbesondere den Ausrüstungsinvestitionen und der Herstellung von Elektrolyseuren zuzuschreiben sowie den Exportchancen von Elektrolyseuren, die ebenfalls hauptsächlich dem Maschinenbau zugutekommen werden. Der Anstieg im Bereich Erziehung und Unterricht ist auf die Betriebskosten der installierten Elektrolyseure zurückzuführen. Hierfür fallen unter anderem auch Kosten für die Weiterbildung von internem Personal an. Darüber hinaus wirken auch induzierte Effekte. So geben Privathaushalte mit zunehmendem Einkommen beispielsweise mehr Geld für Bildungs- und Betreuungsangebote (beispielsweise Musik- oder Sportunterricht, Nachhilfeunterricht) aus, wodurch entsprechend mehr Personal für Erziehung und Unterricht benötigt wird (vgl. SCHRÖDER/SPIEB/STORCK 2015). Positive indirekte Effekte entstehen für Erwerbstätige, die IT-Dienstleistungen für diverse andere Wirtschaftsbereiche erbringen.

Zu den Wirtschaftsbereichen, in denen die Erwerbstätigenzahlen niedriger liegen, zählen die Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, die Metallherzeugung und -bearbeitung sowie die Herstellung von chemischen Erzeugnissen (vgl. Abbildung 16). Auch die Energieversorgung wird 2030 einen geringeren Beschäftigungsbedarf haben, wie sich in der relativen Betrachtung in Abbildung 17 zeigt. Dies ist die direkte Folge der Importannahme in den vier Sektoren Chemie, Stahl, Zement und Energieversorger. Unter der Annahme, dass keine Substitution der fossilen Importe durch grünen Wasserstoff vonstattengehen wird, wird es bei einem bestehenden Budget und einem steigenden Einkaufsbedarf zu einer Senkung der inländischen Produktion und somit zu einem Abbau an Erwerbstätigen in diesen Branchen kommen. Andere zuliefernde Branchen werden indirekt davon betroffen sein.

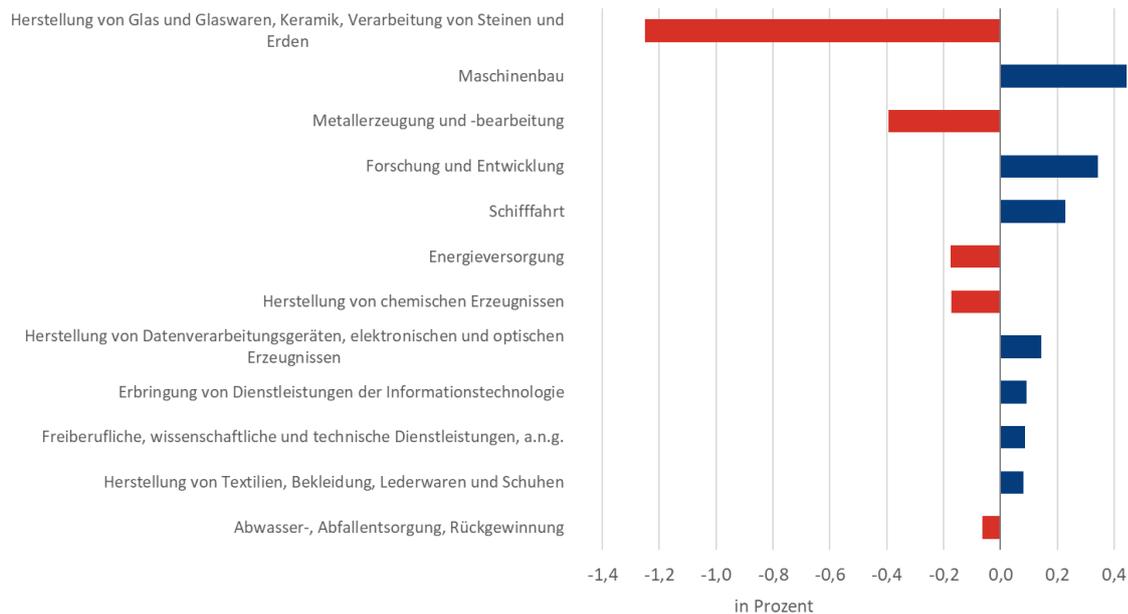
**Abbildung 16: Zwölf Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Durch die relative Auswertung kommt es in Abbildung 17 im Vergleich zu Abbildung 16 zu leichten Verschiebungen in der Rangordnung der Wirtschaftsbereiche. Die in der absoluten Betrachtungsweise auf Platz eins und zwei liegenden Bereiche wechseln in der relativen Betrachtungsweise die Reihenfolge. So ist die größte relative Abweichung bei Erwerbstätigen in der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden zu beobachten. Die Zahl der Erwerbstätigen dieses Wirtschaftsbereichs sinkt im Vergleich zum Referenzszenario um rund 1,3 Prozent. Bei den positiven Effekten auf die Zahl der Erwerbstätigen rücken – nach dem Maschinenbau – auch kleinere Bereiche in den Vordergrund. So sind die zweit- und drittstärkste relative Zunahme in der Forschung und Entwicklung und in der Schifffahrt zu verorten. Dies ist einerseits auf den anhaltenden und verstärkten Forschungsbedarf im Bereich der Wasserstofftechnologie und -anwendung zurückzuführen. Andererseits kommt es durch den Transport von Wasserstoff per Schiff und anderen Gütern zu einer zunehmenden Beschäftigung in diesem Verkehrsweig.

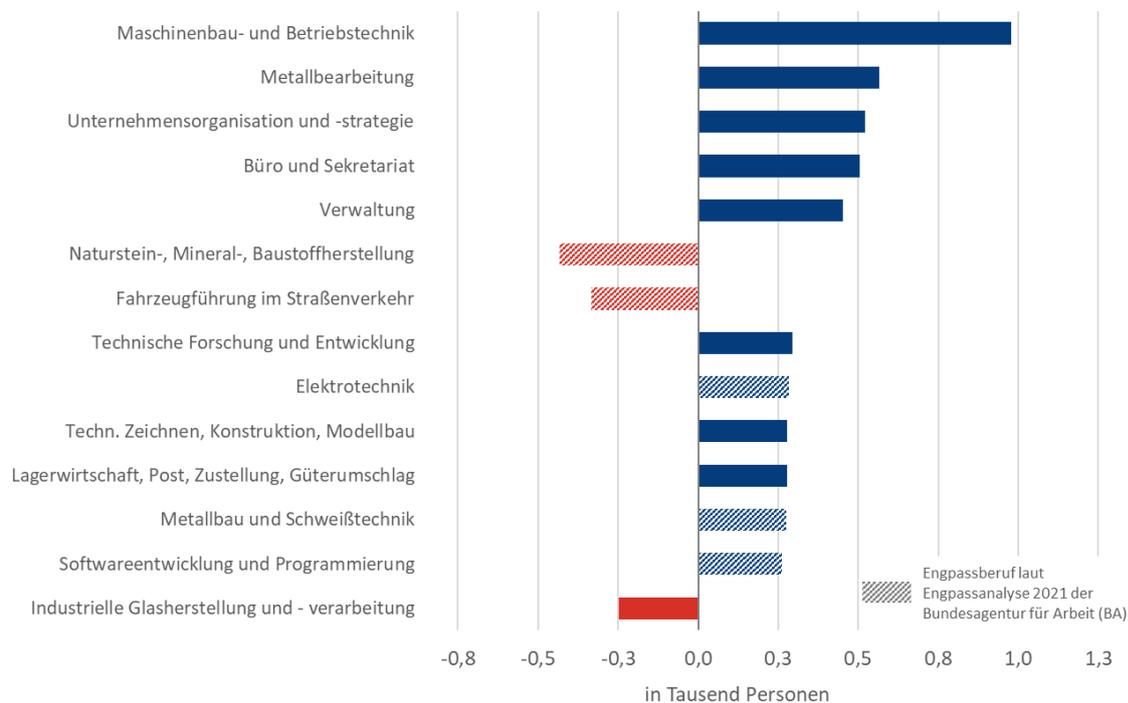
**Abbildung 17: Zwölf Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Für eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios auf die Berufsstruktur stellt Abbildung 18 die 14 Berufsgruppen (3-Steller der KldB 2010) mit den größten absoluten Abweichungen zum Referenzszenario im Jahr 2030 dar. Die beiden Berufsgruppen mit dem größten Aufbau an Erwerbstätigen bestätigen den Trend in den Wirtschaftsbereichen: So handelt es sich um Maschinenbau- und Betriebstechniker:innen sowie Metallbearbeiter:innen, die vermehrt nachgefragt und eingestellt werden. Zwar hat sich bei den Wirtschaftszweigen herausgestellt, dass weniger Personen im Bereich der Metallerzeugung und -bearbeitung beschäftigt sind, Metallbearbeiter:innen sind daneben aber zu einem großen Teil auch im Maschinenbau tätig (BUNDESINSTITUT FÜR BERUFSBILDUNG/INSTITUT FÜR ARBEITSMARKT- UND BERUFSFORSCHUNG/GESELLSCHAFT FÜR WIRTSCHAFTLICHE STRUKTURFORSCHUNG MBH 2020). Der Anstieg an Erwerbstätigen in der Unternehmensorganisation und -strategie liegt daran, dass diese Berufsgruppe in sämtlichen Branchen mit einem recht hohen Anteil vertreten ist. Die Rückgänge in den Berufsgruppen Naturstein-, Mineral-, Baustoffherstellung sowie Industrielle Glasherstellung- und Verarbeitung sind Folge der geringeren Beschäftigungsbedarfe der entsprechenden Wirtschaftszweige. Der negative Effekt auf die Fahrzeugführung im Straßenverkehr dürfte auf die zunehmenden Importaktivitäten der vier Branchen Chemie, Stahl, Zement und Energie im Jahr 2030 zurückzuführen sein, wodurch es – im Vergleich zum Referenzszenario – zu einer geringeren Produktion in den betreffenden Industrien kommt. Zwar müssen auch die importierten Güter transportiert werden, durch wegfallende Zulieferketten im Inland fällt der Transportbedarf insgesamt jedoch geringer aus.

**Abbildung 18: 14 Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030**

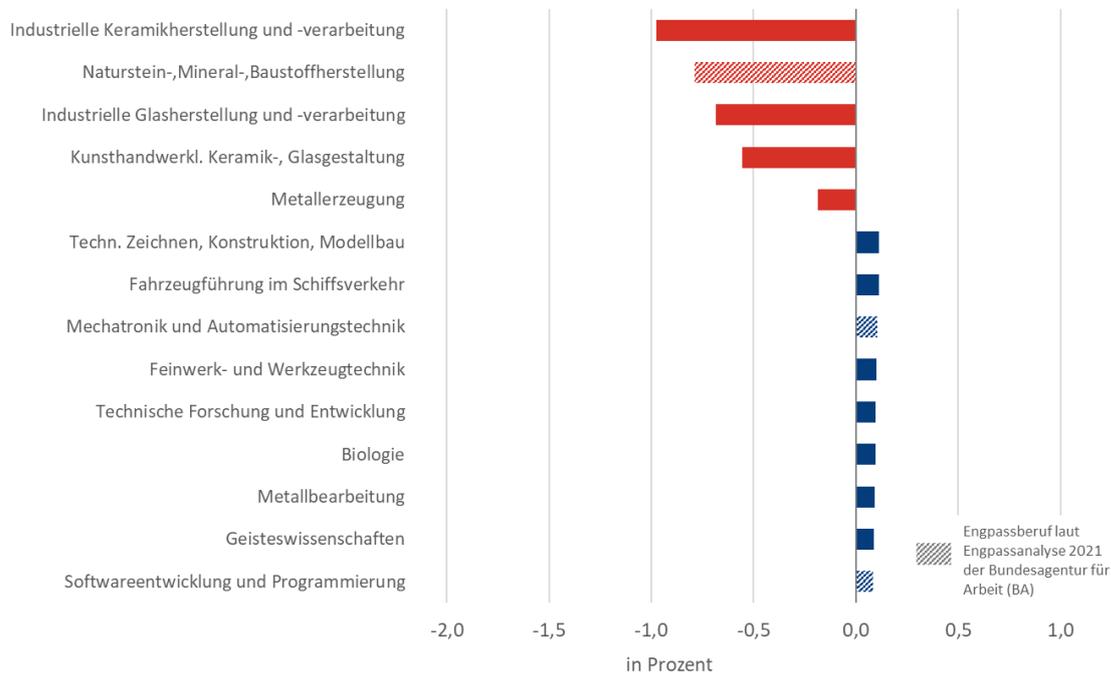


Quelle: STATISTIK DER BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT/ARBEITSMARKTBERICHTERSTATTUNG (2020); QuBe-Projekt, 6. Welle

Analog zu Abbildung 18 stellt Abbildung 19 die Berufsgruppen mit den 14 größten relativen Abweichungen bei den Erwerbstätigen im Vergleich zum Referenzszenario im Jahr 2030 dar. Die Abweichungen werden hier ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen eines Berufs im Referenzszenario gesetzt. Dabei fällt auf, dass die größten prozentualen Veränderungen in den Berufsgruppen in die negative Richtung ausschlagen. Es handelt sich dabei erneut um diejenigen Berufsgruppen, die vor allem im Wirtschaftsbereich Herstellung von Glas- und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden beschäftigt sind. Der prozentuale Rückgang im Vergleich zum Referenzszenario ist hier stärker ausgeprägt, da es sich um eine verhältnismäßig kleine Berufsgruppe handelt. Der Rückgang in der Berufsgruppe Metallerzeugung bei gleichzeitiger Zunahme in der Berufsgruppe Metallbearbeitung zeigt, dass bei den Erwerbstätigen eine Verschiebung weg aus der Schwerindustrie (z. B. Stahlproduktion) hin zur Investitionsgüterindustrie stattfindet, was wiederum auf die zunehmende Importkonkurrenz in der einen und zunehmende Exporte im anderen Industriezweig zurückzuführen ist. Trotz der verhältnismäßig stärkeren Rückgänge in einzelnen Berufsgruppen, bleibt der Gesamteffekt auf die Erwerbstätigen durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Summe positiv.

Die Schraffierung der Balken in Abbildung 18 und Abbildung 19 veranschaulicht die Schwierigkeiten für Betriebe, geeignete Fachkräfte, Spezialist:innen und Expert:innen für die Besetzung ihrer offenen Stellen in den jeweiligen Berufsgruppen zu finden. In den Berufsgruppen mit schraffierten Balken befindet sich mindestens eine Berufsuntergruppe (4-Steller der KldB 2010), für die die Bundesagentur für Arbeit einen Fachkräfteengpass für das Jahr 2021 identifiziert hat. Es handelt sich somit um eine retrospektive Analyse und nicht um eine Prognose (STATISTIK DER BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT/ARBEITSMARKTBERICHTERSTATTUNG 2020). Besonders in den absoluten Veränderungen in Abbildung 18 zeigt sich, dass in einzelnen dargestellten Berufsgruppen mit zunehmenden Erwerbstätigenzahlen schon heute ein Engpass besteht. Dies betrifft die Elektrotechnik, den Metallbau und die Schweißtechnik sowie die Softwareentwicklung und Programmierung.

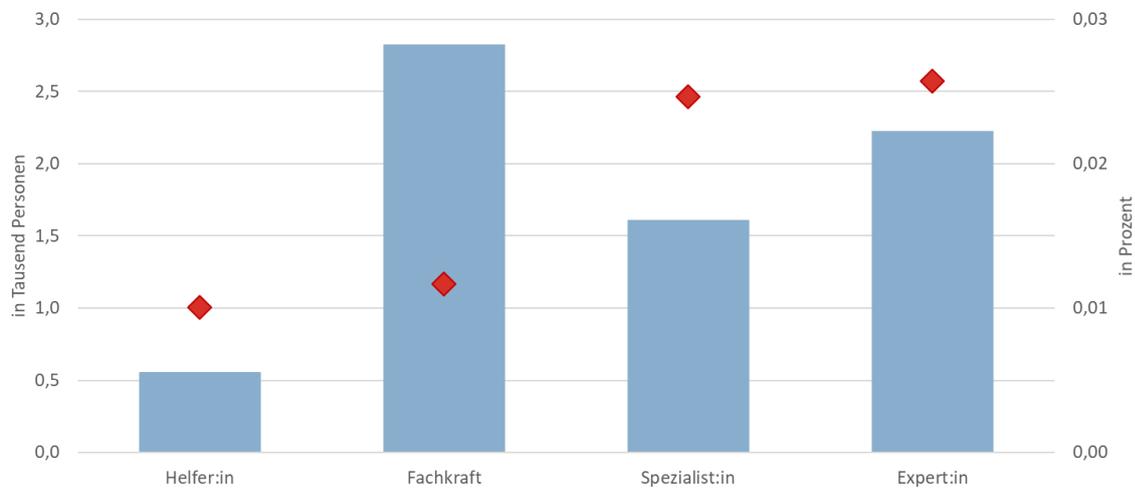
**Abbildung 19: 14 Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle, Bundesagentur für Arbeit (2022)

Abbildung 20 stellt die Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen zum Referenzszenario im Jahr 2030 getrennt nach Anforderungsniveau sowohl absolut als auch relativ dar. Sie zeigt, dass der Bedarf an Erwerbstätigen im Wasserstoff-Szenario im Jahr 2030 in allen vier Anforderungsniveaus höher liegt als im Referenzszenario. Am stärksten nimmt der Bedarf mit fast 3.000 Erwerbstätigen auf dem Niveau der Fachkräfte zu. Relativ betrachtet, also bezogen auf die Gesamtzahl der Personen, die auf diesem Niveau tätig sind, ist der Anstieg bei Expert:innen und Spezialist:innen am größten. Sowohl in absoluten als auch in relativen Zahlen verändert sich der Bedarf an Helfer:innen gegenüber dem Referenzszenario nur gering. Es zeigt sich somit, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft mit höheren Ansprüchen an die ausgeübten Tätigkeiten der Beschäftigten einhergeht.

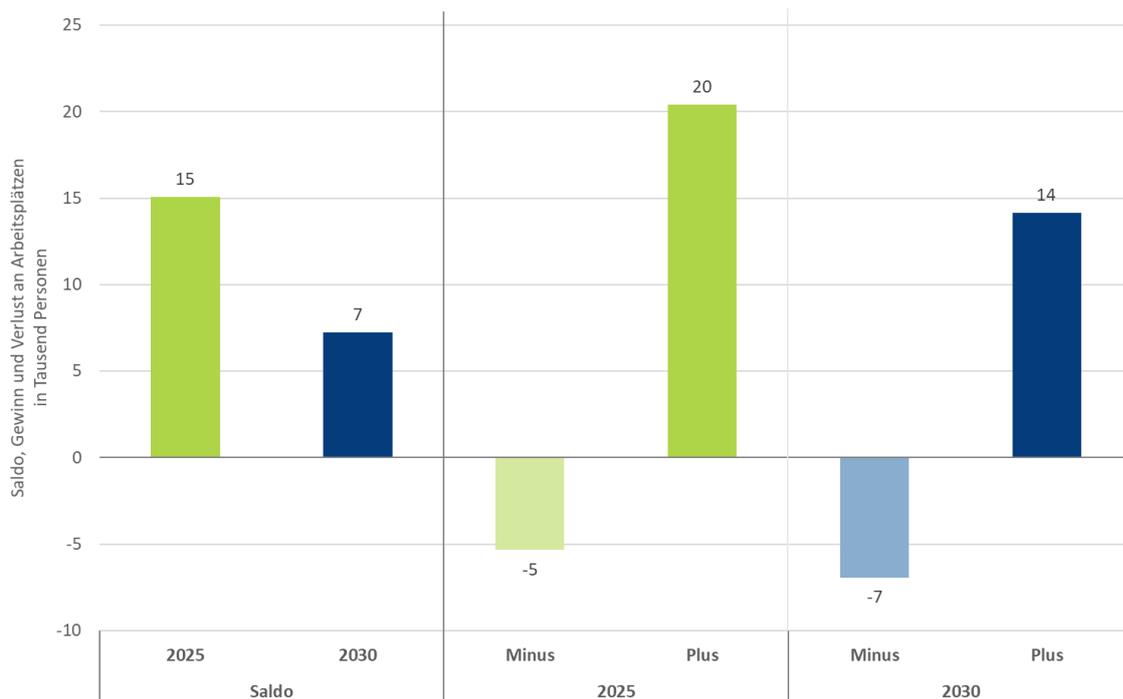
**Abbildung 20: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 in Tausend Personen (blaue Säulen, linke Achse) und in Prozent (rote Rauten, rechte Achse)**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Wird die Arbeitswelt im Wasserstoff-Szenario mit der Arbeitswelt des Referenzszenarios hinsichtlich des Arbeitsplatzauf- und -abbaus nach Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombinationen (63 Wirtschaftsbereiche x 144 Berufsgruppen = 9.072 Kombinationen) verglichen, so dominiert der Arbeitsplatzaufbau sowohl im Jahr 2025 als auch 2030 (vgl. Abbildung 21). Im Jahr 2030 werden im Wasserstoff-Szenario 14.000 neue Arbeitsplätze vorhanden sein, die es im Referenzszenario nicht gibt. Umgekehrt gibt es im Referenzszenario 7.000 Arbeitsplätze, die im Wasserstoff-Szenario nicht mehr vorhanden sind (vgl. blaue Säulen in der rechten Spalte in Abbildung 21). In Summe werden im Wasserstoff-Szenario damit 7.000 Arbeitsplätze mehr entstehen als im Referenzszenario. Bei dieser konsolidierten Betrachtung können zwar auch neue Arbeitsplätze in spezifischen Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination entstehen. Wenn in der gleichen Wirtschafts-Berufs-Kombination aber gleichzeitig Arbeitsplätze abgebaut werden, wird implizit angenommen, dass die vorher neu geschaffenen Arbeitsplätze wieder reduziert werden. Damit beziffert Abbildung 21 den Strukturwandel auf dem Arbeitsmarkt im Jahr 2030 auf rund 21.000 Arbeitsplätze, die entweder auf- oder abgebaut werden und damit einem Wandel unterliegen. Ein Vergleich mit dem Strukturwandel auf dem Arbeitsmarkt mit dem ebenfalls dargestellten Jahr 2025 von 25.000 Arbeitsplätzen im Wandel zeigt, dass sich die Dynamik bis 2030 bereits leicht abschwächt.

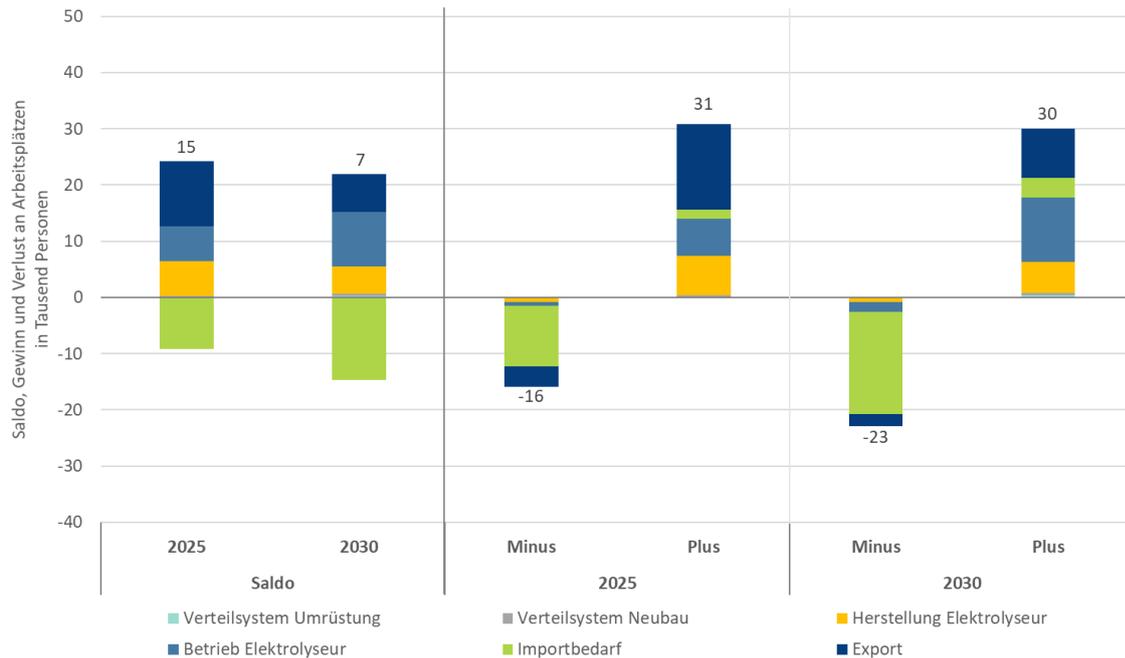
**Abbildung 21: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025 und 2030 in Tausend Personen**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Im Gegensatz zur konsolidierten Betrachtung zeigt Abbildung 22 den Arbeitsplatz-Umschlag nach Teilszenarien. Kommt es zu einem Arbeitsplatzabbau in einer Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination, wird hier trotzdem davon ausgegangen, dass neue Arbeitsplätze in der gleichen Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination parallel dazu aufgebaut werden können, es sich somit um unterschiedliche Arbeitsplätze handelt. Es kann in einer Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination also gleichzeitig zu einem Arbeitsplatzaufbau und -abbau kommen. Der Saldoeffekt für die Jahre 2025 und 2030 ist auf der linken Seite in Abbildung 22 dargestellt und bleibt im Vergleich zu Abbildung 15 und Abbildung 21 entsprechend unverändert. Die rechte Seite zeigt hingegen den kumulierten Arbeitsplatzaufbau und -abbau in den beiden Jahren nach Teilszenarien. Die Teilszenarien bilden die unterschiedlichen Annahmen ab, die in das Wasserstoff-Szenario einfließen (vgl. Kapitel 3). Es zeigt sich, dass der größte Arbeitsplatzaufbau im Jahr 2025 von den zusätzlichen Exporten von Elektrolyseuren ausgeht, während 2030 der Betrieb von Elektrolyseuren der Haupttreiber für den Arbeitsplatzaufbau ist. Ebenfalls zu sehen ist, dass sowohl die Exportaktivitäten als auch der Betrieb von Elektrolyseuren nicht nur zu positiven Effekten führen, sondern auch negativ auf andere Bereiche wirken. Es kommt hier also zu Verschiebungen bei den Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombinationen, die für bestimmte Kombinationen positiv und für andere negativ ausfallen können. Durch die Annahmen zum Wasserstoffimport ergeben sich hingegen überwiegend negative Effekte auf die Zahl der Arbeitsplätze und nur wenig positive Wirkungen. Die Differenzierung nach Teilszenarien macht deutlich, dass sowohl der kumulierte Auf- als auch Abbau an Arbeitsplätzen in dieser Betrachtungsweise höher liegt als in der konsolidierten Sicht in Abbildung 21. Im Jahr 2025 ist der Arbeitsplatz-Umschlag, also der kumulierte Effekt, um rund 22.000 Arbeitsplätze höher als in der konsolidierten Betrachtung. Im Jahr 2030 beträgt die Differenz rund 32.000 Arbeitsplätze. Der Arbeitsplatz-Umschlag beläuft sich in der Aufschlüsselung nach Teilszenarien für das Jahr 2030 somit auf etwa 53.000 Arbeitsplätze, die entweder auf- oder abgebaut werden.

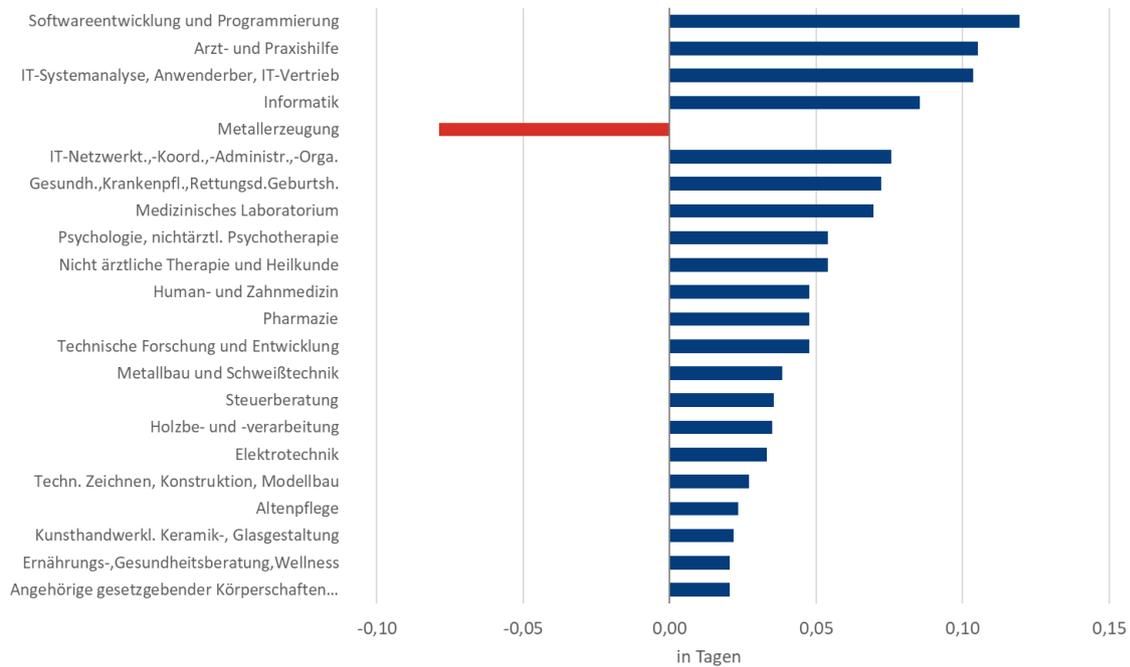
**Abbildung 22: Wirkungen der Teilszenarien auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025 und 2030 in Tausend**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass es im Wasserstoff-Szenario zu verschiedenen Bewegungen auf dem Arbeitsmarkt kommt, die letztlich dazu führen, dass in Summe mehr Arbeitsplätze aufgebaut werden und mehr Personen erwerbstätig sind. Abbildung 18 und Abbildung 19 haben darüber hinaus verdeutlicht, dass es sich bei den zusätzlich benötigten Arbeitskräften teilweise um Personen mit Berufen handelt, für die es bereits heute Engpässe auf dem Arbeitsmarkt gibt. Für die Betriebe kann dies zusätzliche Rekrutierungsschwierigkeiten nach sich ziehen. Ein Indikator dafür ist die adjustierte Suchdauer (Median-Suchdauer) der Betriebe nach neuen Mitarbeitenden für offene Stellen, die mindestens auf Fachkraftniveau angesiedelt sind. Abbildung 23 zeigt, wie sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf die adjustierten Suchdauern je Berufsgruppe im Jahr 2030 auswirkt. Berücksichtigt sind in der Abbildung jene Berufsgruppen, für die eine überdurchschnittlich lange Suchdauer von mehr als 72 Tagen im Jahr 2021 beobachtet wurde. Im Durchschnitt über alle Berufsgruppen müssen Betriebe im Wasserstoff-Szenario im Mittel 0,015 Tage, also rund 20 Minuten länger nach einer geeigneten Person zur Besetzung ihrer offenen Stellen suchen als im Referenzszenario. In der Softwareentwicklung und Programmierung verlängert sich die Suche im Mittel hingegen bereits um fast drei Stunden, bei bereits überdurchschnittlich langer Suchdauer. Für die Rekrutierung mehrerer Personen schlägt sich dies in einem merklich erhöhten Zeitaufwand für Betriebe nieder, zumal die Wahrscheinlichkeit, die Personalsuche erfolglos abzubrechen, mit zunehmender Suchdauer steigt (vgl. MAIER/STEEG/ZIKA 2020).

**Abbildung 23: Wirkung auf die Suchdauer der Betriebe nach neuen Mitarbeitenden nach Berufsgruppe im Jahr 2030 in Tagen, Auswahl mit überdurchschnittlicher Suchdauer in 2021**



## 5 Sensitivitätsanalysen

Das vorgestellte Wasserstoff-Szenario ist Folge eines Annahmesets, das sich auf Basis von Literaturstudien und aus Plausibilitätsgründen ergeben hat. Es wurden dabei Annahmen hinsichtlich der Herstellung und des Betriebes von Elektrolyseuren, des Importbedarfes von Wasserstoff, eines Transportsystems und der Exportmöglichkeiten von Elektrolyseuren getroffen. Die modellspezifischen Stellschrauben waren zum einen Ausrüstungs- und Bauinvestitionen, Vorleistungsimporte, Exporte sowie Betriebskosten für den Betrieb von Elektrolyseuren und des Wasserstofftransportnetzes.

Um die Stabilität der Ergebnisse des Wasserstoff-Szenarios evaluieren zu können, wurden Sensitivitäten gerechnet. Darunter wird die Änderung einzelner Annahmen unter Beibehaltung der restlichen Annahmen verstanden. Damit kann herausgefunden werden, welche Annahme die höchste Sensitivität aufweist und somit am stärksten das Endergebnis beeinflusst (vgl. KAUSCHE 2018).

**Tabelle 3: Überblick Sensitivitätsrechnungen**

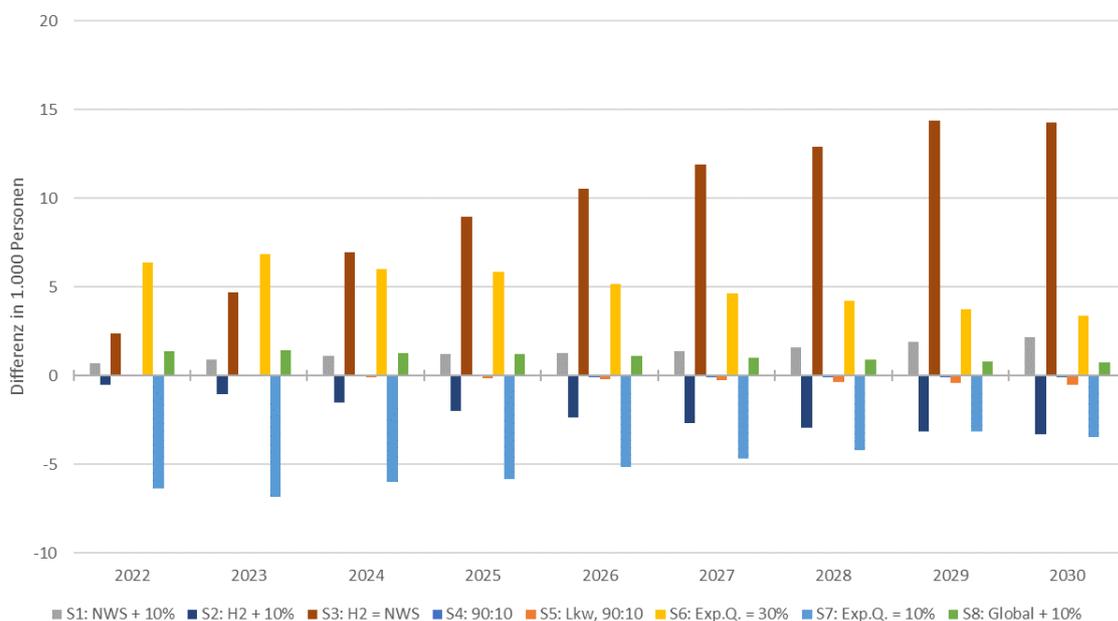
Position in der Wertschöpfungskette	Sensitivität
Herstellung von Wasserstoff im Inland	Sensitivität 1: Inländischen Kapazitätsaufbau um 10% erhöhen
	Sensitivität 2: Inländischen Wasserstoffbedarf um 10% erhöhen
Importbedarf von Wasserstoff	Sensitivität 3: Wasserstoffbedarf wird von Produktionskapazitäten gemäß NWS bzw. KoAV vollständig gedeckt
	Sensitivität 4: Verhältnis umgerüsteter zu neugebauten Pipelines auf 90:10 setzen
Wasserstoff-Transportsystem	Sensitivität 5: Wasserstoffbedarf im Verkehr über Lkw, der Rest mit 90:10 in Pipelines
	Sensitivität 6: Exportanteil Deutschlands von 20% auf 30% erhöhen
Export von Elektrolyseuren	Sensitivität 7: Exportanteil Deutschland von 20% auf 10% verringern
	Sensitivität 8: Globaler Wasserstoffbedarf um 10% stärker

Quelle: QuBe-Projekt

Für die Sensitivitätsanalysen wurden insgesamt acht Sensitivitäten berechnet und mit dem Wasserstoff-Szenario verglichen. In Tabelle 3 ist eine Übersicht der durchgeführten Sensitivitätsrechnungen dargestellt. Die Beurteilung der Sensitivitäten erfolgt insbesondere anhand zweier Größen: der Erwerbstätigenzahl und des BIP. Dazu werden die jeweiligen Abweichungen der Größen in den einzelnen Sensitivitäten zum Wasserstoff-Szenario in Abbildung 24 und Tabelle 4 dargestellt.

Die folgenden Abschnitte stellen dar, welche Annahmeparameter in welchem Maße in den einzelnen Sensitivitäten im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario abgewandelt wurden. Daran schließt sich jeweils eine Darstellung und Einordnung der Ergebnisse an.

**Abbildung 24: Differenz der Erwerbstätigen zum Wasserstoff-Szenario-v1.0**



Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

**Tabelle 4: Kumulierte Effekte des preisbereinigten Bruttoinlandsproduktes (BIP, in Mrd. Euro) und die Differenz der Erwerbstätigen (ETS, in 1.000 Personen) zwischen den Sensitivitäten und dem Wasserstoff-Szenario-v1.0 im Jahr 2030**

	Herstellung S1	Import S2	S3	Transport S4	S5	Export S6	S7	S8
BIP kum. (in Mrd. €)	4,6	-5,8	25,6	-0,1	-0,2	11,7	-11,9	2,5
Erwerbstätige (in 1000)	2,2	-3,3	14,3	-0,1	-0,5	3,4	-3,5	0,7

Quelle: QuBe-Projekt, 6. Welle

### 5.1 Sensitivität 1: Inländische Kapazitäten zur Herstellung von Wasserstoff um zehn Prozent erhöhen (S1: NWS + 10%)

In Sensitivität 1 wird unterstellt, dass die inländische Wasserstoffproduktion in 2030 um zehn Prozent über dem aktualisierten Ziel der NWS liegt. Das heißt, im Jahr 2030 wird die Kapazität von elf GW Elektrolysekapazität erreicht. Bei sonst gleichen Einstellungen impliziert dies, dass mehr Investitionen in die Herstellung von Elektrolyseuren fließen und mehr Ausgaben für deren Betrieb getätigt werden. Gleichzeitig wird weniger Wasserstoff importiert werden müssen, da annahmegemäß der inländische Wasserstoffbedarf unverändert bleibt. Gleichzeitig gehen auch die Exporte von Elektrolyseuren leicht zurück, da der globale Wasserstoffbedarf annahmegemäß unverändert bleibt.<sup>7</sup>

Insgesamt ergibt sich ein positives Bild sowohl für das Wirtschaftswachstum als auch für die Entwicklung der Erwerbstätigen (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S1). Kumuliert über die Jahre bis 2030 wird das preisbereinigte BIP um 4,6 Mrd. Euro und die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 um 2.200 Personen höher liegen als im Wasserstoff-Szenario. Das zusätzliche BIP-Wachstum ergibt sich aus den Zusatzinvestitionen für den Ausbau der inländischen Wasserstoffproduktion und den niedrigeren Importbedarfen. Die hierfür benötigten zusätzlichen Erwerbstätigen erwirtschaften Einkommen, das der Wirtschaft zusätzlich zugutekommt. Die etwas niedrigere Exportnachfrage hemmt den positiven Effekt nur wenig.

Insbesondere werden Arbeitsplätze im Verarbeitenden Gewerbe geschaffen und in den Branchen der unternehmensnahen Dienstleister.

### 5.2 Sensitivitäten zu den Importbedarfen von Wasserstoff

Die folgenden zwei Sensitivitäten adressieren die Importnachfrage. Dabei ist entscheidend, wie hoch der inländische Wasserstoffbedarf ausfällt (Sensitivität 2) und ob dieser aus inländischer Wasserstoffproduktion gedeckt (Sensitivität 3) werden kann. Da sich in beiden Sensitivitäten der inländische Wasserstoffbedarf ändert, verändert sich auch der Netzausbaubedarf. In Tabelle 5 sind die Abwandlungen der Annahmen im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario in den beiden Sensitivitäten zusammenfassend dargestellt.

<sup>7</sup> Bei einem unveränderten globalen Wasserstoffbedarf (und damit auch Wasserstoff-Produktionsmenge) und einer höheren Produktionskapazität in Deutschland bleibt rein rechnerisch eine geringere Produktionsmenge im Rest der Welt übrig, wodurch im Ausland weniger Elektrolyseanlagen benötigt werden.

**Tabelle 5: Überblick Import-Sensitivitäten**

	<b>Sensitivität 2</b>	<b>Sensitivität 3</b>
Inländischer Wasserstoffbedarf	10% höher ↑	Geringer (entspricht NWS) ↓
Netzausbaubedarf	Höher ↑	Niedriger ↓

Quelle: QuBe-Projekt

### 5.2.1 Sensitivität 2: Wasserstoffbedarf um zehn Prozent erhöhen (S2: H2+10%)

Sollte der inländische Wasserstoffbedarf höher ausfallen als im Wasserstoff-Szenario angenommen, und sollte es gleichzeitig zu keinem Ausbau der inländischen Elektrolysekapazität kommen, wird sich der Importbedarf nach grünem Wasserstoff erhöhen. Dadurch erhöht sich auch der Netzausbaubedarf.

Eine zehnprozentige Erhöhung der inländischen Wasserstoffnachfrage würde, kumuliert über die Jahre bis 2030, das BIP um 5,8 Mrd. Euro erhöhen und die Zahl der Erwerbstätigen senke im Jahr 2030 um 3.300 Personen (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S2). Der höhere Netzausbaubedarf federt zwar die negativen Effekte des höheren Importbedarfes etwas ab, wirkt aber nicht überkompensierend.

Insbesondere das Verarbeitende Gewerbe aber auch das Baugewerbe werden dadurch im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario Stellenabbau betreiben.

### 5.2.2 Sensitivität 3: Wasserstoffbedarf wird von NWS vollständig gedeckt (S3: H2 = NWS)

Diese Sensitivität geht davon aus, dass der inländische Wasserstoffbedarf genauso hoch ist, dass er vollständig von der angestrebten Elektrolysekapazität von zehn GW in 2030 gedeckt wird. Dadurch entfällt der Importbedarf komplett. Allerdings ergeben sich daraus auch weniger Transportbedarfe von grünem Wasserstoff.

Das BIP-Wachstum wird deutlich stärker ausfallen als im Wasserstoff-Szenario. Der geringere Netzausbaubedarf schwächt zwar den positiven Effekt etwas ab. Bis 2030 fällt das BIP dennoch kumuliert um 25,6 Mrd. Euro und die Zahl der Erwerbstätigen wird im Jahr 2030 um 14.400 Personen höher liegen als im Wasserstoff-Szenario (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S3).

Davon profitieren insbesondere die importierenden Branchen Chemie, Zement, Stahl und Energie, aber auch sämtliche zuliefernden Branchen und unternehmensnahe Dienstleistungen. Durch die Einkommenseffekte der zusätzlich Beschäftigten wird zusätzliche Konsumnachfrage generiert, wodurch die Gastronomie und der Einzelhandel profitieren.

## 5.3 Sensitivitäten zum Wasserstoff-Transportsystem

In Bezug auf das innerdeutsche Wasserstoff-Transportsystem wurden zwei Sensitivitäten berechnet: Zunächst wurde dabei in Sensitivität 4 das Verhältnis aus umgerüsteten zu neu gebauten Gaspipelines von 80:20 auf 90:10 gesetzt. Dadurch werden insgesamt weniger neue Leitungen verlegt, wodurch sowohl die Bau- und Ausrüstungsinvestitionen als auch die Wartungskosten geringer ausfallen als im Wasserstoff-Szenario. In Sensitivität 5 wird dagegen angenommen, dass der Wasserstoffbedarf im Verkehr (Tankstellen) nicht über das Pipeline-Netz mit Wasserstoff bedient wird, sondern mit Lieferungen per Lastkraftwagen (Lkw). Die Kosten dafür werden mit 13,2 Euro pro MWh angesetzt (vgl. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018, Teil B, S. 222). Der verbleibende, zu transportierende Wasserstoff wird zu 90 Prozent über umgerüstete und zu zehn Prozent über neu verlegte Gaspipelines transportiert. Tabelle 6 fasst die Annahmen der Sensitivitäten zusammen.

**Tabelle 6: Überblick Transport-Sensitivitäten**

	<b>Sensitivität 4</b>	<b>Sensitivität 5</b>
Gesamtkosten	Kleiner ↓	Größer ↑
Bauinvestitionen	Weniger ↓	Noch weniger ↓
Ausrüstungsinvestitionen	Weniger ↓	Mehr ↑
Wartungskosten	Weniger ↓	Weniger ↓

Quelle: QuBe-Projekt

Die Effekte beider Sensitivitäten sind sehr klein (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S4 und S5). Sie zeigen, dass Änderungen im Transportweg sowohl zu einem leicht niedrigeren Wachstum als auch zu einer leicht niedrigeren Arbeitsnachfrage führen können. Wobei der Fokus auf Umrüstung (Sensitivität 4) weniger stark wirkt als die Transportverlagerung auf die Straße (Sensitivität 5). Der Hauptgrund liegt darin, dass in beiden Sensitivitäten weniger stark in den Bau investiert wird – eine klassischerweise sehr beschäftigungsintensive Branche. Auch wird in beiden Sensitivitäten weniger in Wartungsarbeiten investiert.

### 5.3.1 Sensitivität 4: Verhältnis umgerüsteter zu neugebauten Pipelines auf 90:10 setzen (S4: 90:10)

In Sensitivität 4 sinken die Gesamtkosten für den Ausbau des Verteilnetzes. Zwar entstehen mehr Kosten für die Umrüstung von Pipelines, allerdings werden weniger Investitionen in den Neubau getätigt. Letzteres ist vom Volumen größer, was die Gesamtinvestitionen niedriger ausfallen lässt. Da zudem weniger neu gebaut wird, fallen auch die zusätzlichen Kosten für den Betrieb der neuen Pipelines geringer aus.

Insgesamt fällt durch die geringeren Investitionen und Tätigkeiten für den Betrieb neuer Anlagen das Wirtschaftswachstum etwas niedriger aus mit entsprechender Wirkung auf den Arbeitsmarkt (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S4). Den höchsten Beschäftigungsverlust im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario verzeichnet das Baugewerbe, das wiederum baunahe Branchen wie Architektur- und Ingenieurbüros usw. negativ beeinflusst.

### 5.3.2 Sensitivität 5: Wasserstoffbedarf im Verkehr über Lkw, der Rest mit 90:10 in Pipelines (S5: Lkw, 90:10)

In Sensitivität 5 werden sowohl weniger Geld in den Neubau und Betrieb neuer Pipelines gesteckt als im Wasserstoff-Szenario, als auch weniger Geld für Umrüstungsarbeiten ausgegeben. Da Wasserstoff statt über Pipelines über die Straße transportiert wird, fallen dagegen zusätzliche Ausrüstungsinvestitionen im Bereich Landverkehr an. Insgesamt wird mehr investiert als im Wasserstoff-Szenario angenommen (vgl. Tabelle 6). Vor allem kommt es aber zu Umschichtungen zwischen Bau- und Ausrüstungsinvestitionen: Im Wasserstoff-Szenario fließen 68 Prozent der Gelder in Bauinvestitionen, in der Sensitivität 5 nur noch 13 Prozent.

Trotz der insgesamt höheren Gesamtausgaben zeigt sich im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario kein positiver Wachstumsimpuls. Die zusätzlichen Ausrüstungsinvestitionen werden überkompensiert durch den dadurch induzierten höheren Importbedarf der Automobilindustrie und die deutlich niedrigeren Bauinvestitionen. Die investierende Branche Landverkehr kauft insbesondere zusätzlich Fahrzeuge, was vor allem der weniger beschäftigungsintensiven Automobilbranche zugutekommt. Im Gegensatz zur Baubranche ist die Automobilindustrie aber in ihren Vorleistungen stark mit dem Ausland verflochten, weshalb durch jede zusätzliche Nachfrage auch zusätzlicher Importbedarf generiert wird.

Insgesamt fällt durch die geringeren Investitionen und Tätigkeiten für den Betrieb neuer Anlagen das Wirtschaftswachstum etwas niedriger aus. Aufgrund der deutlich niedrigeren Bautätigkeit fällt die Arbeitsnachfrage geringer aus als in Sensitivität 4 (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S5). Der Aufbau an Erwerbstätigen in beispielsweise der Automobilindustrie ist zu gering, um den Wegfall im Baugewerbe kompensieren zu können.

## 5.4 Sensitivitäten zum Export von Elektrolyseuren

Drei Sensitivitäten beziehen sich auf die Stellgröße der Elektrolyseurexporte. Zwei der Sensitivitäten unterstellen eine Änderung der Exportquote von Elektrolyseuren um plus bzw. minus zehn Prozentpunkte (Sensitivität 6 und 7). Die dritte Sensitivität (Sensitivität 8) nimmt eine zehnjährige Erhöhung des globalen Wasserstoffbedarfes an (vgl. Tabelle 7).

Die Ergebnisse zeigen, dass wenngleich Deutschland von einer internationalen Erhöhung des Wasserstoffbedarfes profitieren wird (Sensitivität 8), es deutlich mehr gewinnt, wenn Exportpotentiale gehoben werden können.

**Tabelle 7: Überblick Export-Sensitivitäten**

	<b>Sensitivität 6</b>	<b>Sensitivität 7</b>	<b>Sensitivität 8</b>
Exportquote	10%-Punkte höher ↑	10%-Punkte geringer ↓	Unverändert
Globaler Wasserstoffbedarf	Unverändert	Unverändert	10% höher ↑

Quelle: QuBe-Projekt

### 5.4.1 Sensitivität 6: Exportanteil Deutschlands von 20 auf 30 Prozent erhöhen (S6: Exp.Q. = 30%)

In Sensitivität 6 wird angenommen, dass es den deutschen Maschinenbauunternehmen gelingt, Exportweltmeister bei Elektrolyseuren zu werden und ihren globalen Exportanteil von 20 auf 30 Prozent zu steigern.

Bis zum Jahr 2030 wird dadurch das preisbereinigte BIP kumuliert um 11,7 Mrd. Euro höher liegen als im Wasserstoff-Szenario. Auch die Zahl der Erwerbstätigen wird im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario im Jahr 2030 um 3.400 Personen angewachsen sein (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S6). Da zusätzliche Exporte durch die internationale Arbeitsteilung auch zusätzliche Importe induzieren, wird der Wachstumseffekt etwas gedämpft. Allerdings wird durch die Einkommenseffekte der zusätzlich Beschäftigten auch neue Konsumnachfrage generiert.

Die meisten zusätzlichen Arbeitsplätze im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario liegen im Maschinenbau und den zuliefernden Industrien. Auch die Vermittlung von Arbeitskräften und andere unternehmensnahe Dienstleistungen profitieren davon.

### 5.4.2 Sensitivität 7: Exportanteil Deutschlands von 20 auf zehn Prozent verringern (S7: Exp.Q. = 10%)

Sensitivität 7 funktioniert genau umgekehrt zu Sensitivität 6. Durch den Verlust an Exportführerschaft wird Deutschland annahmegemäß nur noch einen globalen Exportanteil von zehn Prozent erreichen können. Im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario bedeutet dies einen Exportverlust. Hier wirkt zwar die ebenfalls reduzierte zusätzliche Importnachfrage kompensierend. Bis 2030 wird das preisbereinigte BIP kumuliert jedoch um 11,9 Mrd. Euro niedriger liegen als im Wasserstoff-Szenario. Im Jahr 2030 werden 3.500 Personen weniger erwerbstätig sein (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S7).

Die meisten Arbeitsplätze fallen im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario entsprechend im Maschinenbau und den zuliefernden Industrien weg. Auch die Vermittlung von Arbeitskräften und andere unternehmensnahe Dienstleistungen sind davon betroffen.

#### 5.4.3 Sensitivität 8: Globaler Wasserstoffbedarf um zehn Prozent höher (S8: Global + 10%)

Die Exportmöglichkeiten von Elektrolyseuren hängen davon ab, ob und wieviel grüner Wasserstoff im Ausland überhaupt produziert und nachgefragt werden wird. Im Wasserstoff-Szenario wird von einem Anstieg der globalen Wasserstoffnachfrage ausgegangen. Diese wird in der Sensitivität 8 um zehn Prozent erhöht.

Wenn die globale Nachfrage nach grünem Wasserstoff steigt, so steigt auch die Nachfrage nach Elektrolyseuren. Bei einer unverändert zum Wasserstoff-Szenario bestehenden Exportquote von 20 Prozent wird Deutschland entsprechend mehr exportieren können. Die Wachstums- und Beschäftigungseffekte sind positiv, fallen allerdings kleiner aus, als wenn die Exportquote erhöht werden könnte (vgl. Sensitivität 6).

Der kumulierte Wachstumsgewinn beläuft sich bis 2030 auf 2,5 Mrd. Euro. Im Jahr 2030 werden 700 zusätzliche Stellen im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario vorhanden sein (vgl. Abbildung 24; Tabelle 4, S8). Auch hier werden die meisten zusätzlichen Stellen im Verarbeitenden Gewerbe und vor allem im Maschinenbau entstehen. Die unternehmensnahen Dienstleistungen werden ebenfalls profitieren.

### 5.5 Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen

Die zuvor dargestellten Berechnungen der Sensitivitätsanalysen veranschaulichen, welche der getroffenen Annahmen im Wasserstoff-Szenario die stärksten Effekte für die wirtschaftliche Entwicklung und den Arbeitsmarkt nach sich ziehen.

Dabei wird zunächst deutlich, dass Änderungen im Transportsystem nur minimale Effekte auf Wirtschaftswachstum und Arbeitsmarkt haben (vgl. Sensitivitäten 4 und 5).

Anhand von Sensitivität 1 wird deutlich, dass sich eine ambitioniertere Ausformulierung und Umsetzung der NWS in Bezug auf die inländischen Elektrolysekapazitäten positiv auf den Arbeitsmarkt auswirken würde.

Die größten Hebelwirkungen für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt liegen jedoch im Außenhandel. Sowohl der Export- als auch der Importkanal sind wichtige Stellgrößen. Der Export von Elektrolyseuren könnte zunächst deutliche Wachstumschancen bergen. Eine stärkere Ausrichtung des Auslandes auf grüne Wasserstoffproduktion (vgl. Sensitivität 8) hat weniger starke Effekte auf Deutschland als der Ausbau der deutschen Exportpotentiale (vgl. Sensitivität 6). Allerdings ist ohne eine gleichzeitige globale grüne Wasserstofftransformation auch kein Export von Elektrolyseanlagen möglich.

Dem Importkanal liegt jedoch das größte Wachstumspotential zugrunde. Die größten Wachstums- und Beschäftigungseffekte sind zu erwarten, wenn Deutschland in seiner Versorgung mit grünem Wasserstoff autark werden könnte (vgl. Sensitivität 3). Außerdem wurden in dieser Studie bislang noch keine Substitutionseffekte fossiler Importbedarfe berücksichtigt. Diese dürften sich zusätzlich positiv auf die Außenhandelsbilanz Deutschlands auswirken, wodurch die zukünftigen Wachstums- und Beschäftigungspotenziale größer ausfallen dürften, als hier berechnet. Sensitivität 2 macht zudem deutlich, dass eine Steigerung des inländischen Bedarfes an grünem Wasserstoff nicht ohne die Steigerung der inländischen Produktionsmöglichkeiten angedacht werden sollte. Ein

Auseinanderdriften der Nachfrage und der inländischen Produktionsmöglichkeiten erhöht den Importbedarf.

Insgesamt geht damit aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen hervor, dass es sich empfiehlt eine wirtschaftspolitische Strategie zu fahren, die zum einen die inländische Produktion fördert (Beschleunigung des Ausbaupfades erneuerbarer Energien, schnelle Genehmigungsverfahren für Elektrolyseure, klare Rahmenbedingungen für deren Betrieb etc.) und damit die Importbedarfe reduziert. Zum anderen sollten die Exportmöglichkeiten von Elektrolyseanlagen erhöht und die aktuelle Position Deutschlands am Markt mindestens gehalten werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie führt eine erste Wirkungsabschätzung der Umsetzung der NWS und des KoAV bis zum Jahr 2030 für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt in Deutschland durch. Auf Basis von Modellrechnungen werden zwei Szenarien verglichen: das QuBe-Basiszenario der sechsten Welle, welches den Vergangenheitsrend fortzuschreibt und somit keine Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft beinhaltet (Referenzszenario), und ein Szenario mit den entsprechenden Zielen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft gemäß NWS und KoAV (Wasserstoff-Szenario). Im Wasserstoff-Szenario wird der Fokus auf die Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff gelegt. Dazu werden

1. die Herstellung von Wasserstoff im Inland (mittels Elektrolyseanlagen),
2. der Import der darüberhinausgehenden Wasserstoffbedarfe aus dem Ausland,
3. der Aufbau und Betrieb eines Wasserstoff-Transportsystems innerhalb Deutschlands sowie
4. der Export von Elektrolyseuren

berücksichtigt.

Weitergehende Effekte wie beispielsweise Veränderungen in den Produktionsprozessen energieintensiver Industrien wie Stahl, Chemie oder Zement, die Herstellung von Brennstoffzellfahrzeugen oder verstärkte Forschungs- und Entwicklungsausgaben sind dagegen nicht Teil des Wasserstoff-Szenarios. Ebenso wird ein verstärkter Ausbau der erneuerbaren Energien, die für die inländische Produktion von grünem Wasserstoff notwendig sind, nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird eine Substitution fossiler Energieimporte durch grünen Wasserstoff außen vor gelassen. Grund dafür ist, dass der Maßnahmenkatalog der NWS für den Markthochlauf der Produktion und Nutzung von Wasserstoff nur in wenigen Punkten konkret ausformuliert ist. Dadurch ist aktuell schwer abzuschätzen, in welchem Umfang Wasserstoff zukünftig genutzt werden wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in den ersten Jahren zu einem zusätzlichen Anstieg der inländischen Wirtschaftsleistung führt. Dies ist vor allem auf hohe Investitionstätigkeiten und steigende Exporte zurückzuführen. Die positiven Wachstumsimpulse flachen gegen 2030 jedoch ab, während der Importbedarf nach grünem Wasserstoff weiter steigt. Die positive Wirkung auf das BIP wird folglich immer kleiner bis sie in den Jahren 2028 bis 2030 leicht negativ ausfällt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es zu einem Rückgang der gesamtwirtschaftlichen Leistung kommen wird. Die negative Wirkung führt in den jeweiligen Jahren lediglich zu einem leicht niedrigeren Wachstum als im Referenzszenario. Zudem wurde die Substitution fossiler Energieträger in diesem Szenario noch nicht modelliert und dürfte den Negativeffekt zukünftig deutlich abschwächen.

Auf dem Arbeitsmarkt zeigen sich hingegen durchweg positive Effekte. Die Zahl der Erwerbstätigen liegt im Wasserstoff-Szenario in allen betrachteten Jahren höher als im Referenzszenario. Im Durchschnitt liegt die Zahl der Erwerbstätigen zwischen 2022 und 2030 um rund 13.000 Personen

höher als im Referenzszenario. Dies ist das Ergebnis aus einer Umwälzung von Arbeitsplätzen, die aus dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft resultiert. So führt diese Transformation sowohl zu Verlusten von Arbeitsplätzen in bestimmten Bereichen als auch zum Aufbau von Arbeitsplätzen in anderen Bereichen. In Summe übersteigt der Arbeitsplatzaufbau jedoch den Arbeitsplatzabbau, wodurch sich ein insgesamt positiver Effekt auf den Arbeitsmarkt zeigt.

Der Blick auf die Wirtschaftszweige zeigt, dass im Jahr 2030 besonders viele zusätzliche Erwerbstätige im Maschinenbau tätig sind, während die Erwerbstätigkeit bei der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden niedriger liegt. Dieser Trend spiegelt sich in den Ergebnissen nach Berufsgruppen wider. Die Erwerbstätigkeit nach Anforderungsniveau lässt in absoluten Zahlen einen erhöhten Bedarf an Fachkräften erkennen. Relativ betrachtet liegt der zusätzliche Bedarf an Spezialist:innen und Expert:innen im Vergleich zum Referenzszenario am höchsten. In einzelnen Berufen, in denen ein Mehrbedarf auftritt, kommt es bereits heute zu Engpässen auf dem Arbeitsmarkt. Die Rekrutierung geeigneter Fachkräfte wird entsprechend schwieriger. Dies zeigt die adjustierte Suchdauer der Betriebe nach geeigneten Mitarbeitenden, die sich langfristig erhöhen wird.

Neben dem Wasserstoff-Szenario werden zusätzlich Sensitivitätsanalysen berechnet. Darunter wird die Änderung einzelner Annahmen unter Beibehaltung der restlichen Annahmen verstanden. Damit wird veranschaulicht, welche Annahme die höchste Sensitivität aufweist und somit am stärksten das Endergebnis beeinflusst. Im Ergebnis zeigt sich dabei, dass die größten Hebelwirkungen für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt im Außenhandel liegen. So bietet auf der einen Seite der Export von Elektrolyseuren deutliche Wachstumschancen für die deutsche Wirtschaft. Auf der anderen Seite liegen dem Importkanal, durch steigende Einfuhren, die größten Wachstumshemmnisse für die inländische Wertschöpfung zugrunde. Mit dem Ziel einer stärkeren Unabhängigkeit von Energieimporten, empfiehlt sich eine wirtschaftspolitische Strategie, die die inländische Produktion von erneuerbaren Energien und grünem Wasserstoff fördert. Um dies zu erreichen, muss unter anderem der Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigt werden, Genehmigungsverfahren für Elektrolyseure schneller vonstattengehen und klare Rahmenbedingungen für deren Betrieb geschaffen werden. Daneben können sich im Zuge der Entwicklung der weltweiten Wasserstoffwirtschaft Exportchancen im Bereich der Elektrolyseanlagen ergeben. Dazu muss die deutsche Wirtschaft ihre Technologieführerschaft mindestens halten und wettbewerbsfähige Anlagen auf dem Weltmarkt anbieten.

## 7 Ausblick

Das QuBe-Projekt führt im Auftrag des BMBF das Projekt *Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“* durch (Projektwebsite: <https://www.bibb.de/de/153311.php>). Ziel ist es dabei, aufzuzeigen, welche Fachkräftebedarfe sich zukünftig sowohl quantitativ (in Personen- und Stundenzahl) als auch qualitativ (nach Berufen, Wirtschaftszweigen und Anforderungsniveaus) aus einer Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ergeben werden. Dabei wird eine Erreichung der in der NWS und im KoA-V formulierten Ziele unterstellt. Darüber hinaus wird der Frage nachgegangen, ob diese Bedarfe zukünftig auch vom vorhandenen Angebot an Arbeitskräften quantitativ und qualitativ gedeckt werden können.

In Abbildung 25 findet sich eine schematische Darstellung der dafür durchzuführenden Arbeitspakete der ersten Projektphase. In einem ersten Projektschritt wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, deren Ergebnisse bereits veröffentlicht wurden. Dabei stellen STEEG u. a. (2022) den Forschungsstand bis Januar 2022 zu möglichen Arbeitsmarktfolgen der Umstellung auf eine

Wasserstoffwirtschaft in Deutschland dar. Zudem leiten MÖNNIG u. a. (2022) anhand einer Metaanalyse die zukünftigen Importbedarfe von grünem Wasserstoff für Deutschland ab.

### Abbildung 25: Projektplan, erste Projektphase



Die Ergebnisse dieser Recherchen sind in die Durchführung der im vorliegenden Diskussionspapier dargestellten Szenarioanalyse eingeflossen (vgl. Abbildung 25, „Wasserstoff-Szenario-v1.0 (6. Welle)“). Diese basiert auf den Daten und der Modellierung der sechsten Welle des QuBe-Projektes (vgl. MAIER u. a. 2020), welche über einen Datenstand zum Sommer 2020 verfügt. Seitdem kam es zu erheblichen wirtschaftlichen, (außen-)politischen und sozialen Verwerfungen: Dazu zählt zum einen der weitere Verlauf der Corona-Pandemie mit weiteren Lockdowns und dem Verlauf der Impfkampagne (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT 2022). Darüber hinaus wurde in den Vereinigten Staaten mit Joe Biden ein neuer Präsident gewählt, der im Januar 2021 sein Amt antrat (vgl. JUNG 2021). Ebenso hat sich in Deutschland nach der Bundestagswahl im September 2021 eine neue Bundesregierung gebildet (vgl. HOFMANN 2021). Zuletzt erschütterte der russische Angriffskrieg auf die Ukraine das Weltgeschehen. Dies wird erhebliche Veränderungen für Deutschland, Europa und den Rest der Welt nach sich ziehen, insbesondere aufgrund von Fluchtbewegungen, Sanktionen und den damit verbundenen verschärften Störungen in den Lieferketten (vgl. SCHLAUTMANN 2022).

Zudem deckt das vorliegende Wasserstoff-Szenario-v1.0 lediglich Teilaspekte einer Wasserstoffwirtschaft ab. Es konzentriert sich auf die Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff, inklusive dessen inländische Produktion und Import, seiner Verteilung innerhalb von Deutschland sowie dem Export von Elektrolyseanlagen. So werden Umstellungen von Produktionsprozessen in der Industrie, der Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätsbereich, Wärme- und Stromnetz sowie der zusätzliche Ausbau erneuerbarer Energien und die Substitution fossiler Rohstoffe durch grünen Wasserstoff nicht in der vorliegenden Analyse berücksichtigt. Grund dafür ist, dass es zum Zeitpunkt der Szenarioerstellung schwer abzuschätzen war, in welchem Umfang Wasserstoff zukünftig genutzt werden wird und wie eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland konkret ausgestaltet sein wird (vgl. STEEG u. a. 2022).

Die vorliegenden Ergebnisse sind damit lediglich als vorläufige Schätzung einer Wirkungsanalyse für die Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff zu interpretieren. Die darüber hinaus berechneten Sensitivitätsanalysen ermöglichen zudem, die Größenordnungen der verschiedenen Aspekte abzuschätzen, die sich aus dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ergeben. Daraus lässt sich ableiten, welche Aspekte einer Wasserstoffwirtschaft in den weitergehenden Arbeiten im Projekt stärker fokussiert werden sollten. Dazu zählen insbesondere die Außenhandelswirkungen mit dem Import von grünem Wasserstoff und dem Export von Elektrolyseuren, da ihnen starke Hebelwirkungen für die wirtschaftliche Entwicklung und den Arbeitsmarkt zugrunde liegen.

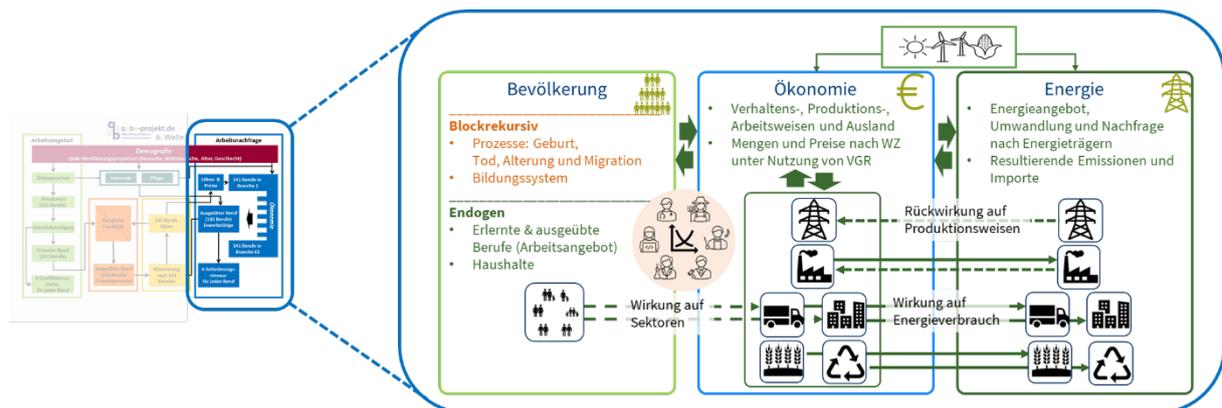
Im weiteren Verlauf der ersten Projektphase werden die Einschränkungen und Interpretationsgrenzen des vorliegenden Wasserstoff-Szenarios-v1.0 sukzessiv angegangen. Dazu wurden in einem anschließenden Arbeitspaket bereits leitfadengestützte Interviews mit Expert:innen geführt, die an verschiedenen Positionen der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ verortet sind und/oder sich durch

wissenschaftliche Expertise in diesem Bereich auszeichnen (vgl. Abbildung 25, „Expert:innen-Interviews“).

Neben den Interviews dient die quantitative Befragung von potenziellen Nutzer:innen von grünem Wasserstoff dem weiteren Informationsgewinn, wie eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland zukünftig ausgestaltet sein könnte (vgl. Abbildung 25, „Quantitative Befragung“). Die Ergebnisse fließen schließlich in einem letzten Projektschritt in die Erstellung eines erweiterten Wasserstoff-Szenarios (Wasserstoff-Szenario-v2.0) auf Basis der siebten Welle des QuBe-Projektes (vgl. Abbildung 25, „Wasserstoff-Szenario-v2.0 (7. Welle)“). Dieses Szenario wird – im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung – eine umfassendere Abbildung der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ mit der Produktion, dem Transport und der Nutzung von Wasserstoff beinhalten.

Die siebte Welle des QuBe-Projektes wurde im Oktober 2022 fertiggestellt und legt damit im Vergleich zur sechsten Welle eine aktualisierte Datengrundlage sowie eine erweiterte Modellierung zugrunde (vgl. MAIER u. a. 2022). In Abbildung 26 findet sich eine schematische Darstellung, wie die Modellierung der sechsten Welle (vgl. Abbildung 1) für die siebte Welle erweitert wurde. Daraus geht hervor, dass die Modellierung der Ökonomie um eine Abbildung des Energiesektors erweitert wurde. Damit ist es möglich, das Energieangebot und die -nachfrage getrennt nach Energieträgern sowie die Umwandlung und zuletzt daraus hervorgehende Emissionen und Energieimporte im Modell abzubilden.

**Abbildung 26: Schematische Darstellung der Modellerweiterungen für die 7. Welle**



Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Dies ermöglicht eine endogene Modellierung und damit in sich geschlossene und ebenso detailliertere Darstellung des Energiesektors. In Bezug auf grünen Wasserstoff sind dabei insbesondere der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Import von fossilen Energieträgern relevant.

## 8. Literaturverzeichnis

- AGORA ENERGIEWENDE (Hrsg.); WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.): 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](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf) (Stand: 19.11.2021)
- AHLERT, Gerd; DISTELKAMP, Martin; LUTZ, Christian; MEYER, Bernd; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.: Das IAB/INFORGE-Modell. In: SCHNUR, Peter; ZIKA, Gerd (Hrsg.): Das IAB/INFORGE-Modell. Ein sektorales makroökonomisches Projektions- und Simulationsmodell zur Vorausschätzung des längerfristigen Arbeitskräftebedarfs. Bielefeld 2009
- BOCHOLTER ENERGIE- UND WASSERVERSORGUNG GMBH (Hrsg.): Glossar 2022. URL: <https://www.bew-bocholt.de/die-bew/infos/glossar> (Stand: 27.05.2022)
- BUNDEINSTITUT FÜR BERUFSBILDUNG (Hrsg.); INSTITUT FÜR ARBEITSMARKT- UND BERUFSFORSCHUNG (Hrsg.); GESELLSCHAFT FÜR WIRTSCHAFTLICHE STRUKTURFORSCHUNG MBH (Hrsg.): Berufe-Dossiers nach 36 Berufshauptgruppen für die QuBe-Basisprojektion – Berufshauptgruppe „Metallerzeugung und -bearbeitung, Metallbauberufe“ 2020. URL: [https://www.bibb.de/dokumente/pdf/Berufe\\_Dossier\\_7\\_Metallerzeugung\\_bearbeitung\\_Metallbauberufe.pdf](https://www.bibb.de/dokumente/pdf/Berufe_Dossier_7_Metallerzeugung_bearbeitung_Metallbauberufe.pdf) (Stand: 01.06.2022)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT (Hrsg.): Coronavirus-Pandemie: Was geschah wann? 2022. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/coronavirus/chronik-coronavirus.html> (Stand: 22.06.2022)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (Hrsg.): Die nationale Wasserstoffstrategie. Berlin 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (Stand: 19.11.2021)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.): Fortschrittsbericht Energiesicherheit. Berlin 2022. URL: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0325\\_fortschrittsbericht\\_energiesicherheit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0325_fortschrittsbericht_energiesicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=14) (Stand: 02.06.2022)
- BUNDESNETZAGENTUR FÜR ELEKTRIZITÄT, GAS, TELEKOMMUNIKATION, POST UND EISENBAHNEN (Hrsg.); BUNDESKARTELLAMT (Hrsg.): Monitoringbericht 2021 2022. URL: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht\\_Energie2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=7)
- DEGÜNTHER, Charlotte; DUSCHA, Vicki; KÖPPEL, Wolfgang; MICHAELIS, Julia; NEUMANN, Fabian; WACHSMUTH, Jakob; WIETSCHEL, Martin; ZUBAIR, Asif: Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors (2019)
- DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR (Hrsg.): 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](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf) (Stand: 19.11.2021)
- DEUTSCHE VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V. (Hrsg.): DVGW-Regeln für klimafreundliche Energieinfrastrukt. Mehr Wasserstoff technisch sicher verankern. Berlin 2019. URL: [https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/2019-04-09\\_-\\_Wasserstoff\\_technisch\\_verankern.pdf](https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/2019-04-09_-_Wasserstoff_technisch_verankern.pdf)
- FRONTIER ECONOMICS (Hrsg.); INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND NETZE, DIGITALISIERUNG UND ENERGIEWIRTSCHAFT RWTH AACHEN (Hrsg.); FOURMANAGEMENT GMBH (Hrsg.); EMCEL GMBH (Hrsg.): Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland. Eine modellbasierte Analyse 2017.

URL: <https://www.frontier-economics.com/media/2260/der-wert-der-gasinfrastruktur.pdf> (Stand: 27.05.2022)

GERBERT, Philipp; HERHOLD, Patrick; BURCHHARDT, Jens; SCHÖNBERGER, Stefan; RECHENMACHER, Florian; KIRCHNER, Almut; KEMMLER, Andreas; WÜNSCH, Marco: Klimapfade für Deutschland 2018. URL: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/> (Stand: 02.02.2022)

HEBLING, C.; RAGWITZ, M.; FLEITER, T.; GROOS, U.; HÄRLE, D.; HELD, A.; JAHN, M.; MÜLLER, N.; PFEIFER, T.; PLÖTZ, P.; RANZMEYER, O.; SCHAADT, A.; SENSFUß, F.; SMOLINKA, T.; WIETSCHEL, M.: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe und Freiburg 2019. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wasserstoff-roadmap-deutschland.html> (Stand: 02.02.2022)

HECKING, Harald; HINTERMAYER, Martin; LENCZ, Dominic; WAGNER, Johannes: Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO<sub>2</sub>-Minderung. Köln 2017. URL: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2017/11/ewi\\_ERS\\_Energiemarkt\\_2030\\_2050.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2017/11/ewi_ERS_Energiemarkt_2030_2050.pdf) (Stand: 02.02.2022)

HELMRICH, Robert; ZIKA, Gerd: Prognosen, Projektionen und Szenarien. In: BAUR, Nina; BLASIUS, Jörg (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden 2019, S. 231-246

HOFERICHTER, Andrea 2019: Energietechnik: Abschied vom Hochofen. In: Süddeutsche Zeitung, Ausgabe vom 02.01.2019. URL: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/stahl-klimawandel-emissionen-wasserstoff-1.4268796>. (Stand: 22.06.2022)

HOFMANN, Kristina 2021: Ampel bildet neue Regierung. Was im Koalitionsvertrag steht. In: zdf heute, Ausgabe vom 24.11.2021. URL: <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/ampel-koalitionsvertrag-vorstellung-100.html> (Stand: 22.06.2022)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Hrsg.): Global Hydrogen Review 2021 2021. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (Stand: 01.06.2022)

INTERNATIONAL RENEWABLES ENERGY AGENCY (Hrsg.): 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](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_Summary_2020.pdf?la=en&hash=1F18E445B56228AF8C4893CAEF147ED0163A0E47) (Stand: 19.11.2021)

INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR (Hrsg.): Global hydrogen production in the Sustainable Development Scenario, 2019-2070 2020. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-production-in-the-sustainable-development-scenario-2019-2070> (Stand: 22.06.2022)

JUNG, Alica 2021: Inauguration in Washington: Wie die Amtseinführung von Biden abläuft. In: zdf heute, Ausgabe vom 20.01.2021. URL: <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/usa-wahl-amtseinfuehrung-biden-ablauf-100.html> (Stand: 22.06.2022)

KALINOWSKI, Michael; MÖNNIG, Anke; SÖHNLEIN, Doris: Annahmen, Modellierung und Ergebnisse der Angebotsprojektion nach Qualifikationsstufen und Berufen bis zum Jahr 2040. Bonn 2021. URL: <https://lit.bibb.de/vufind/Record/DS-779223> (Stand: 22.06.2022)

KAUSCHE, Michael: Sensitivitätsanalyse. In: KAUSCHE, Michael (Hrsg.): Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen. Wiesbaden 2018, S. 71-78

MAIER, Tobias; KALINOWSKI, Michael; ZIKA, Gerd; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.: Es wird knapp. Ergebnisse der siebten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040. In: BIBB-Report (2022) 3

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](https://www.bibb.de/dokumente/pdf/Maier_Steeg_Zika_Preprint_ModellierungadjustierterSuchdauern.pdf) (Stand: 04.01.2022)

MAIER, Tobias; ZIKA, Gerd; KALINOWSKI, Michael; STEEG, Stefanie; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.; HUMMEL, Markus; SCHNEEMANN, Christian: COVID-19-Krise: Die Arbeit geht weiter, der Wohlstand macht Pause. In: BIBB-Report 4/2020 (2020), S. 1-20

MAIER, Tobias; ZIKA, Gerd; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.; KALINOWSKI, Michael; HÄNISCH, Carsten; HELMRICH, Robert; SCHANDOCK, Manuel; NEUBER-POHL, Caroline; BOTT, Peter; HUMMEL, Markus: Löhne und berufliche Flexibilität als Determinanten des interaktiven QuBe-Arbeitsmarktmodells. Ein Methodenbericht zur Basisprojektion der 3. Welle der BIBB-IAB Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. In: Wissenschaftliche Diskussionpapiere (2014) 148

MERTEN, Frank; SCHOLZ, Alexander; KRÜGER, Christine; HECK, Simon; GIRARD, Yann; MECKE, marc; GOERGE, Marius: Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e. V. (LEE-NRW) (2020)

MICHALSKI, Jan; ALTMANN, Matthias; BÜNGER, Ulrich; WEINDORF, Werner: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen 2019. URL: [https://lbt.de/wp-content/uploads/2021/03/LBST\\_Wasserstoffstudie\\_NRW.pdf](https://lbt.de/wp-content/uploads/2021/03/LBST_Wasserstoffstudie_NRW.pdf) (Stand: 02.02.2022)

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. (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)

MÖNNIG, Anke; RONSIEK, Linus; BECKER, Lisa; STEEG, Stefanie: Wasserstoffbasierte Transformation und die Auswirkungen auf den Importbedarf Deutschlands. Bonn 2022. URL: <https://lit.bibb.de/vufind/Record/DS-780209>

NOW (Hrsg.): Integriertes Energiekonzept 2050 Strom Wärme Verkehr Industrie. Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. Berlin 2018. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/iek-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/iek-2050.pdf?__blob=publicationFile) (Stand: 02.02.2022)

PROGNOS AG (Hrsg.); ÖKO-INSTITUT E. V. (Hrsg.); WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE GGMBH (Hrsg.): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals 2021. URL: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf) (Stand: 02.02.2022)

PROJEKTRÄGER JÜLICH (Hrsg.): WASSERSTOFF: EIN SCHLÜSSELEMENT? DER STOFF, AUS DEM DIE ZUKUNFT IST – WIE WASSERSTOFF DIE ENERGIEWENDE UND DEN REGIONALEN STRUKTURWANDEL VORANTREIBT 2022. URL: <https://www.ptj.de/fokusthemen/gruener-wasserstoff/wasserstoff-ein-schlusselement> (Stand: 02.06.2022)

ROBINIUS, Martin; MARKEWITZ, Peter; LOPION, Peter; KULLMANN, Felix; HEUSER, Philipp-Matthias; SYRANIDIS, Konstantinos; CERNIAUSKAS, Simonas; SCHÖB, Thomas; REUß, Markus; RYBERG, Severin; KOTZUR, Leander; CAGLAYAN, Dilara; WELDER, Lara; LINBEN, Jochen; GRUBE, Thomas; HEINRICHS, Heidi; STENZEL, Peter; STOLTEN, Detlef: Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 2020. URL: [https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/\\_Documents/Downloads/transformationStrategies2050\\_studyfinalreport\\_2019-10-31.pdf](https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studyfinalreport_2019-10-31.pdf);jsessionid=B2A8E5CE17E537B365C4FEAA02F42F4D?\_\_blob=publicationFile (Stand: 02.02.2022)

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](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3623514) (Stand: 19.11.2021)

SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (Hrsg.): 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](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)

SCHLAUTMANN, Christoph 2022: Ukrainekrieg sorgt für erhebliche Probleme im Einkauf. In: Handelsblatt, Ausgabe vom 02.05.2022. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/lieferengpaesse-ukrainekrieg-sorgt-fuer-erhebliche-probleme-im-einkauf/28295808.html> (Stand: 22.06.2022)

SCHNUR, Peter; ZIKA, Gerd (Hrsg.): Das IAB/INFORGE-Modell. Ein sektorales makroökonomisches Projektions- und Simulationsmodell zur Vorausschätzung des längerfristigen Arbeitskräftebedarfs. Bielefeld 2009

SCHRÖDER, Carsten; SPIEB, C. K.; STORCK, Johanna: Private Bildungsausgaben für Kinder: einkommensschwache Familien sind relativ stärker belastet. In: DIW Wochenbericht 82 (2015) 8, S. 158-169

SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS (Hrsg.); BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (Hrsg.); FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI (Hrsg.): 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](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf) (Stand: 03.01.2022)

STATISTIK DER BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT (Hrsg.); ARBEITSMARKTBERICHTERSTATTUNG (Hrsg.): Fachkräfteengpassanalyse – 2020 – Deutschland und Länder. Nürnberg. URL: [https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Einzelheftsuche\\_Formular.html?nn=27096&topic\\_f=fachkraefte-engpassanalyse](https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Einzelheftsuche_Formular.html?nn=27096&topic_f=fachkraefte-engpassanalyse) (Stand: 01.06.2022)

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse. Fachserie 18 Reihe 1.4 - 2020 - (Stand: 30. November 2021) (2021)

STEEG, Stefanie; HELMRICH, Robert; MAIER, Tobias; SCHROER, Jan P.; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.; SCHNEEMANN, Christian; ZIKA, Gerd: Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland. Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem ; eine erste Bestandsaufnahme. Bonn 2022

STERCHELE, Philip; BRANDES, Julian; HEILIG, Judith; WREDE, Daniel; KOST, Christoph; SCHLEGL, Thomas; BETT, Andreas; HENNING, Hans-Martin: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg 2020. URL: <https://>

[www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf) (Stand: 02.02.2022)

STIFTUNG ARBEIT UND UMWELT DER IG BCE (Hrsg.): Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa: Potenziale und Rahmenbedingungen für den Wasserstoffbedarf und -ausbau sowie die Preisentwicklungen für die Industrie. Berlin 2021. URL: [https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/Studie\\_Wasserstoff\\_Industrie\\_StiftungIGBCE\\_enervis.pdf](https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/Studie_Wasserstoff_Industrie_StiftungIGBCE_enervis.pdf) (Stand: 02.02.2022)

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

VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E. V. (Hrsg.): Das ist Power-to-X 2022. URL: <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/33756766> (Stand: 22.06.2022)

VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. (Hrsg.): Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030. Umsetzungsbericht 2021a. URL: [https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/fnb\\_gas\\_umsetzungsbericht\\_2021\\_de.pdf](https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/fnb_gas_umsetzungsbericht_2021_de.pdf) (Stand: 27.05.2022)

VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. (Hrsg.): Wasserstoffnetz 2030: Aufbruch in ein klimaneutrales Deutschland 2021b. URL: <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-netz-2030/> (Stand: 27.05.2022)

VEREINIGUNG DER FERNLEITUNGSNETZBETREIBER GAS E.V. (Hrsg.): Wasserstoffnetz 2050: für ein klimaneutrales Deutschland 2021c. URL: <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-netz-2050/> (Stand: 27.05.2022)

WOLTER, Marc I.; MÖNNIG, Anke; MAIER, Tobias; SCHNEEMANN, Christian; STEEG, Stefanie; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd: Langfristige Folgen der Covid-19-Pandemie für Wirtschaft, Branchen und Berufe. Nürnberg 2021. URL: <http://doku.iab.de/forschungsbericht/2021/fb0221.pdf>

WOLTER, Marc Ingo; HELMRICH, Robert; MAIER, Tobias; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd; GROßMANN, Anett; DREUW, Peter: Zeitenwende: Russischer Angriff auf die Ukraine – Herausforderungen für den Arbeitsmarkt – eine Sortierung. Osnabrück 2022. URL: [https://downloads.gws-os.com/QuBe-Essay\\_2\\_2022.pdf](https://downloads.gws-os.com/QuBe-Essay_2_2022.pdf) (Stand: 02.06.2022)

ZIKA, Gerd; MAIER, Tobias; MÖNNIG, Anke; SCHNEEMANN, Christian; STEEG, Stefanie; WEBER, Enzo; WOLTER, Marc I.; KRINITZ, Jonas: Die Folgen der neuen Klima- und Wohnungsbaupolitik für Wirtschaft und Arbeitsmarkt. In: IAB-Forschungsbericht 3 | 2022 (2022)