

Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette

„Wasserstoff“ – Abschlussbericht der ersten Projektphase

Alexander Christian Schur¹, Anke Mönning², Linus Ronsiek², Christian Schneemann³, Jan Philipp Schroer¹, Johanna Zenk³

Abstract:

Grüner Wasserstoff kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten. Damit der Wasserstoffhochlauf nicht durch Fachkräfteengpässe ausgebremst wird, muss frühzeitig identifiziert werden, welche Berufe und Qualifikationen dafür zukünftig benötigt werden.

Im Rahmen des QuBe-Projekts wird anhand einer Szenarioanalyse aufgezeigt, wie bestimmte Maßnahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf den Arbeitsmarkt wirken. Hierzu wurde bereits ein erstes Wasserstoff-Szenario-v1.0 modelliert. Darauf aufbauend wurde das nun vorliegende Wasserstoff-Szenario-v2.0 sowohl hinsichtlich der Annahmen als auch des Zeithorizonts erweitert.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft über den gesamten Projektionszeitraum bis 2045 positive ökonomische Impulse erzeugt. Vor allem zusätzliche Ausrüstungsinvestitionen führen zu einem vergleichsweise höheren Niveau des Bruttoinlandsproduktes. Auf dem Arbeitsmarkt werden mehr Personen beschäftigt sein und in Summe mehr Arbeitsplätze auf- als abgebaut. In absoluten Zahlen haben vor allem das Baugewerbe sowie Architektur- und Ingenieurbüros einen höheren Arbeitskräftebedarf. Die

¹ Bundesinstitut für Berufsbildung, Arbeitsbereich 1.2, „Qualifikation, berufliche Integration, Erwerbstätigkeit“

² Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH, Bereich „Wirtschaft und Soziales“

³ Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung, Forschungsbereich „Prognosen und gesamtwirtschaftliche Analysen“

Entwicklung der Wirtschaftsbereiche spiegelt sich größtenteils bei den Berufen wider. In einzelnen Berufsgruppen mit höherem Arbeitskräftebedarf besteht jedoch bereits heute ein Angebotsengpass und es ist mit einer Zunahme der Suchdauern nach neuen Arbeitskräften zu rechnen.

Um langfristig höhere Wachstums- und Beschäftigungspotenziale erzielen zu können, stehen der Politik verschiedene Handlungsoptionen zur Verfügung. Beispielsweise können Förderprogramme den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft und deren Wettbewerbsfähigkeit unterstützen. Gleichzeitig müssen die Anstrengungen zur Rekrutierung, Aus- und Weiterbildung geeigneter Arbeitskräfte verstärkt werden.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	6
In aller Kürze	7
1 Einleitung	8
2 Methodik.....	9
2.1 Das QuBe-Modell QINFORGE	10
2.2 Szenarienrechnung	13
3 Annahmen.....	15
3.1 Tabellarische Übersicht zu den getroffenen Annahmen	15
3.2 Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import.....	16
3.3 Kosten der Herstellung und des Betriebes von Elektrolyseuren; Kosten der Produktion und des Importes von grünem Wasserstoff; Substitution fossiler Energieträger	19
3.4 Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines und Speicher	22
3.5 Exportannahmen	27
3.6 Weiterverarbeitung von grünem Wasserstoff zu Folgeprodukten	29
4 Ergebnisse	31
4.1 Folgen für Wertschöpfung und Wachstum	31
4.2 Folgen für den Arbeitsmarkt	34
5 Fazit	44
6 Literaturverzeichnis	48
7 Anhang	57
7.1 Wasserstoffbedarf.....	57
7.2 Wasserstoffkosten	58
7.3 Wasserstoffinfrastruktur.....	59
7.4 Exportannahmen	60

Abkürzungsverzeichnis

BIBB	Bundesinstitut für Berufsbildung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
ct	Eurocent
EHB	European-Hydrogen-Backbone
EUR	Euro
GW	Gigawatt
GWS	Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung
IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kW	Kilowatt
MWh	Megawattstunde
NEP	Netzentwicklungsplan
NWS	Nationalen Wasserstoffstrategie
PtL	Power-to-Liquid
QINFORGE	Qualification and Occupation in the INterindustry FORecasting GErmany
QuBe	Qualifikations- und Berufsprojektionen
TWh	Terrawattstunde

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellstruktur des Modellinstrumentariums des QuBe-Projekts	12
Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung	14
Abbildung 3: Wasserstofferzeugung und Importbedarf (in TWh)	17
Abbildung 4: Jährliche Gesamtkosten grüner Wasserstoff (in Mrd. EUR).....	21
Abbildung 5: Substitution fossiler Energieimporte (in Mrd. EUR)	22
Abbildung 6: Kapazität (in TWh) und Investitionskosten (in Mrd. EUR) der Häfen	23
Abbildung 7: Wasserstoff-Speicherbedarf (in TWh) und Investitionskosten (in Mrd. EUR)....	24
Abbildung 8: Wasserstoff-Pipelinennetz: Länge (in Tsd. km) und Kapazität (in TWh)	25
Abbildung 9: Investitionskosten Pipelinennetz (in Mrd. EUR).....	26
Abbildung 10: Exportannahmen (in Mrd. EUR).....	29
Abbildung 11: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (in Prozent)	32
Abbildung 12: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (in Mrd. EUR)	34
Abbildung 13: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen (in Tsd. Personen)	35
Abbildung 14: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045.....	37
Abbildung 15: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045.....	38
Abbildung 16: Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	39
Abbildung 17: Zehn Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	40
Abbildung 18: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 und 2045 (in Tausend Personen und in Prozent)	41
Abbildung 19: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2030 und 2045 (in Tsd. Personen)	42
Abbildung 20: Wirkungen der Teilszenarien auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2030 und 2045 (in Tsd. Personen)	43
Abbildung 21: Wirkung auf die Suchdauer der Betriebe nach neuen Mitarbeitenden nach Berufsgruppe im Jahr 2045 (in Tagen), Auswahl mit überdurchschnittlicher Suchdauer in 2021	44
Abbildung 22: Elektrolysekapazität (in GW) und Wirkungsgrades (in Prozent).....	57
Abbildung 23: Investitionskosten für Elektrolyseure (in EUR/kW)	58

Abbildung 24: Wasserstoff-Produktionskosten (in ct/kWh)	58
Abbildung 25: Betriebskosten Wasserstoffinfrastruktur (in Mio. EUR).....	59
Abbildung 26: Globaler Bedarf an grünem Wasserstoff (in TWh).....	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen im Wasserstoff-Szenario-v2.0	15
--	----

In aller Kürze

- In diesem Bericht werden die Auswirkungen eines Wasserstoffhochlaufs anhand von Annahmen bis zum Jahr 2045 mittels Szenarioanalyse beschrieben.
- Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft wirkt sich positiv auf das Wirtschaftswachstum aus. Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) liegt zwischen 2022 und 2045 jährlich um durchschnittlich 0,32 Prozent (11,70 Mrd. Euro) höher als in einem Referenz-Szenario ohne Wasserstoffhochlauf.
- Das höhere BIP-Niveau wird vor allem durch zusätzlich anfallende Ausrüstungs- und Bauinvestitionen sowie zusätzliche private Konsumausgaben erreicht. Höhere Importausgaben dämpfen die positive Wirkung ab.
- Auf den Arbeitsmarkt haben die getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durchweg positive Effekte. Zwischen 2022 und 2045 kommt es zu einem Anstieg der Erwerbstätigen um durchschnittlich 61.000 Personen gegenüber dem Referenz-Szenario ohne Wasserstoffhochlauf.
- Je nach Wirtschaftszweig und Beruf werden Arbeitsplätze auf- oder abgebaut. In Summe übersteigt der Arbeitsplatzaufbau den Arbeitsplatzabbau. Verluste in einzelnen Wirtschaftsbereichen fallen sehr gering aus.
- In absoluten Zahlen haben vor allem das Baugewerbe sowie Architektur- und Ingenieurbüros einen höheren Arbeitskräftebedarf. Ursache sind die zusätzlichen Investitionen in die Wasserstoffinfrastruktur sowie der zusätzliche Ausbau erneuerbarer Energien.
- Direkte Wirkungen des Wasserstoffhochlaufs zeigen sich auch in der Berufsstruktur anhand höherer absoluter Bedarfe in den Berufsgruppen Maschinenbau- und Betriebstechnik, Hochbau sowie in der Bauplanung und -überwachung, Architektur.
- In einzelnen Berufen, in denen ein Mehrbedarf auftritt, kommt es bereits heute zu Angebotsengpässen auf dem Arbeitsmarkt. Die projizierten adjustierten Suchdauern der Betriebe nach geeigneten Mitarbeitenden lässt schlussfolgern, dass sich der Rekrutierungsdruck durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft weiter erhöht.
- Der Arbeitskräftebedarf steigt in allen vier ausgewiesenen Anforderungsniveaus. Während in absoluten Zahlen vor allem mehr Fachkräfte benötigt werden, ist der relativ höhere Bedarf bei den Spezialist:innen und Expert:innen am größten.

1 Einleitung

Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wird auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung eine zentrale Rolle zugesprochen. Er kann dazu beitragen die Klimaziele gemäß des Pariser Klimaabkommens (UN 2015) respektive des Klimaschutzgesetzes (BUNDESREGIERUNG 2021) zu erreichen. Die Bundesregierung hat im Jahr 2020 die zentrale Bedeutung von grünem Wasserstoff im Rahmen der Energiewende durch den Beschluss der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) anerkannt (BMW 2020). Grüner Wasserstoff hat das Potential, als Speicher von erneuerbaren Energien sowie dessen Folgeprodukte (Power-to-X), eine flexible Nutzung erneuerbarer Energien zu ermöglichen und einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Energie-, Wärme-, Wirtschafts- und Verkehrssystems in Deutschland zu leisten. Die aktuelle Bundesregierung der Ampel-Koalition hält an dieser Strategie fest und beabsichtigt Deutschland bis 2030 zu einem „Leitmarkt für Wasserstofftechnologien“ zu entwickeln (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021).

Der Beginn des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine am 24. Februar 2022 hat gezeigt, dass Deutschland nicht nur vor einer energiepolitischen „Zeitenwende“ steht (MAIER u. a. 2022). Im Zuge von Unsicherheiten einer globalisierten Wirtschafts- und Arbeitswelt und der hohen Abhängigkeit Deutschlands von russischen Gasimporten ist laut BMW (2022a) ein schnellerer Hochlauf von Wasserstoff und der massive Ausbau erneuerbarer Energien erforderlich.

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) 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 Strukturforschung 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.

Unter Anwendung der Szenarioanalyse können durch den Vergleich von einem Referenz- mit einem Alternativ-Szenario die Wirkungen von bestimmten Maßnahmen auf den Arbeitsmarkt aufgezeigt und analysiert werden (vgl. ZIKA u. a. 2023). Dazu werden im Projekt *Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“* Annahmen getroffen, die den bislang noch nicht im QuBe-Modellsystem abgebildeten Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft modellieren und die Grundlage für die Projektion des alternativen „Wasserstoff-Szenarios“ bilden. Um die Größenordnungen der verschiedenen Aspekte des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft zu quantifizieren, wurde bereits ein erstes Wasserstoff-Szenario-v1.0 mit verschiedenen Sensitivitätsanalysen gerechnet (Redaktionsschluss: Juni 2022). Dabei lag der Fokus auf der Sicherstellung der Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff durch die inländische Produktion und den Import, seiner Verteilung sowie dem Export von Elektrolyseanlagen (ZENK u. a. 2023a).

Ausgehend von dieser vorläufigen Wirkungsanalyse wurden die Einschränkungen und Interpretationsgrenzen des Wasserstoff-Szenarios-v1.0 sukzessive angegangen. Neben leitfadengestützten Interviews von Expert:innen aus verschiedenen Positionen der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ untersuchen RONSIEK u. a. (2022) anhand einer Metaanalyse mögliche Kooperationspartnerschaften für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. Zusätzlich analysieren ZENK u. a. (2023b) Exportpotentiale von Wasserstofftechnologien für Deutschland, die sich im Zuge eines globalen Wasserstoffhochlaufs ergeben können. Die Ergebnisse aus Expert:innen-Interviews und Literaturrecherche fließen nun in das in diesem Bericht vorgestellte **Wasserstoff-Szenario-v2.0** ein.

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 Alternativ-Szenario vorgestellt. Kapitel 3 widmet sich einer detaillierten Darstellung der Annahmen, welche das Alternativ-Szenario formen. Nach der Darstellung der Ergebnisse zu den Effekten des Markthochlaufs von Wasserstoff auf die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt in Kapitel 4 schließt der Bericht mit einem Fazit.

2 Methodik

Akteure aus Politik, Gesellschaft oder Wirtschaft entscheiden sich bei der Generierung von Handlungsempfehlungen immer öfter für ein formales und evidenzbasiertes Verfahren, um herauszufinden, „was funktioniert, was nicht funktioniert, wo und warum“ (GARBARINO/HOLLAND 2009). Mit dem Ziel Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte zu ermitteln, hat sich in den letzten Jahren der Rückgriff auf ökonomische Rechenmodelle

durchgesetzt. Dabei steht eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen zur Verfügung, die von 3-Gleichungs-Wachstumsmodellen (z. B. VAR-Modelle wie beschrieben in HOLTEMÖLLER u. a. (2015)) bis zu multiregionalen, makroökonomischen Input-Output-Modellen (z. B. MRIO-Modelle wie bei TUKKER/DIETZENBACHER (2013) beschrieben) reichen. Die Wahl des Rechenmodells muss sich dabei an der Fragestellung und dem Analyseobjekt orientieren. Für die Berechnung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte einer grünen Wasserstofftransformation in Deutschland ist es einerseits wichtig, die Wirtschaftsstruktur Deutschlands detailliert zu erfassen. Andererseits sollen zukünftige alternative Entwicklungspfade mit ihren makroökonomischen Wirkungen auf Bundesebene nach Branche und Beruf erfasst und in ihrer Wirkung quantifiziert werden. Da es sich bei Transformationspfaden um vielschichtige Entwicklungen handelt, die Einfluss auf unterschiedliche Teile der Wirtschaft haben (Investitionen in Ausrüstungen oder Bau, Export- und Importbedarfe, Kosten- und Produktionsstrukturen und Nachfragepotentiale), sollte das ökonomische Rechenmodell auch dazu in der Lage sein, diese unterschiedlichen Bereiche anzusprechen.

2.1 Das QuBe-Modell QINFORGE

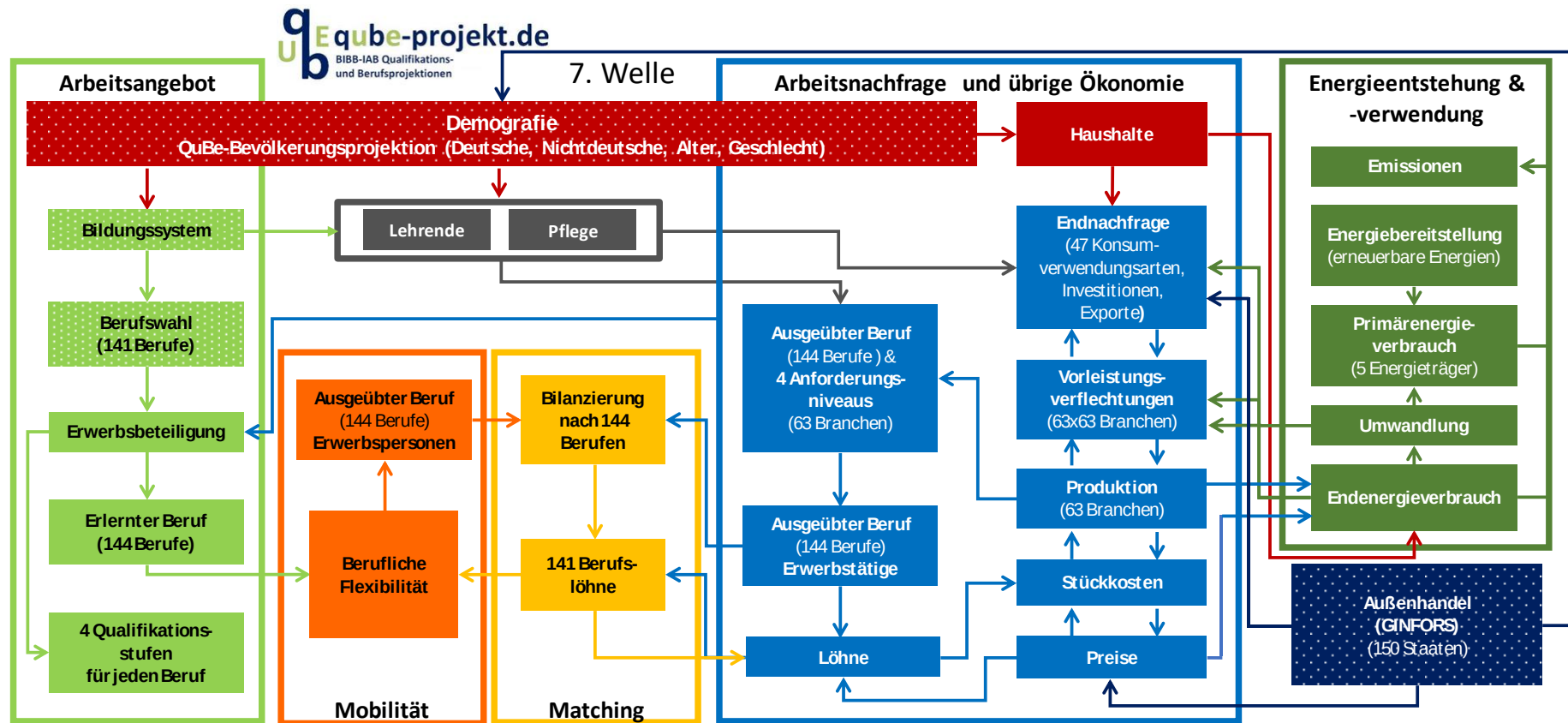
Das Deutschlandmodell QINFORGE (Qualification and Occupation in the INterindustry FORecasting GErmany) wird verwendet (MAIER u. a. 2022; AHLERT u. a. 2009), um die Transformationen hin zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland darzustellen. Mittels Anwendung der Szenariotechnik (ZIKA u. a. 2022a; ZIKA u. a. 2021) werden die ökonomischen Auswirkungen der grünen Wasserstofftransformation quantifiziert.

QINFORGE ist ein makroökonomisches nationales Totalmodell, in das nur wenige Parameter als exogene Vorgabe eingehen, etwa Steuersätze, die Bevölkerungsentwicklung (KALINOWSKI/MÖNNIG/SÖHNLEIN 2021; STUDTRUCKER u. a. 2022), aber auch Annahmen zum internationalen Handel und zu internationalen Rohstoffpreisen (AHLERT u. a. 2009). Es ermittelt in Jahresschritten bis 2045 die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, die sektorale Entwicklung nach 63 Wirtschaftsbranchen beziehungsweise Gütergruppen einschließlich Vorleistungsverflechtung, Wertschöpfung, Produktion, Preisentwicklung und Endnachfrage, getrennt für privaten und staatlichen Konsum, unterschiedliche Investitionskategorien sowie Im- und Exporte. Auch die Energiemärkte sind sowohl monetär im Strukturzusammenhang als auch in Energieeinheiten enthalten. Die Entwicklung auf dem Arbeitsmarkt ist detailliert abgebildet und auch der Arbeitsbedarf ist sowohl „in Köpfen“ als auch in Stunden jeweils nach 63 Branchen, 144 Berufen und vier Anforderungsniveaus abgebildet. Das Arbeitsangebot (KALINOWSKI/MÖNNIG/SÖHNLEIN 2021) stellt sich zunächst in Erwerbspersonen nach erlerntem Beruf dar. Über berufliche Flexibilitätsmatrizen (MAIER u. a. 2014) bildet sich das Arbeitsangebot nach ausgeübtem Beruf. Die Ermittlung von sektoralen

Wachstums- und Beschäftigungseffekten ist eine der Kernanwendungen des Modells QINFORGE (ZENK u. a. 2023a; MÖNNIG u. a. 2021; MÖNNIG u. a. 2018; WOLTER u. a. 2019; ZIKA u. a. 2019; KALINOWSKI/ZIKA/MÖNNIG 2018).

Einen schematischen Überblick der sozioökonomischen Zusammenhänge des aktuell verwendeten Modellinstrumentariums der siebten Projektionswelle gibt die nachfolgende Abbildung 1. Der im Februar 2023 erschienene Sammelband beschreibt die Modelle, Module und Methoden des QuBe-Modellsystems im Detail (ZIKA u. a. 2023).

Abbildung 1: Modellstruktur des Modellinstrumentariums des QuBe-Projekts



Dabei kennzeichnen ■ ■ ■ eigenständige Modelle. Alle anderen Teile sind im Modell QINFORGE integriert.

Quelle: QuBe-Projekt, ZIKA u. a. (2023)

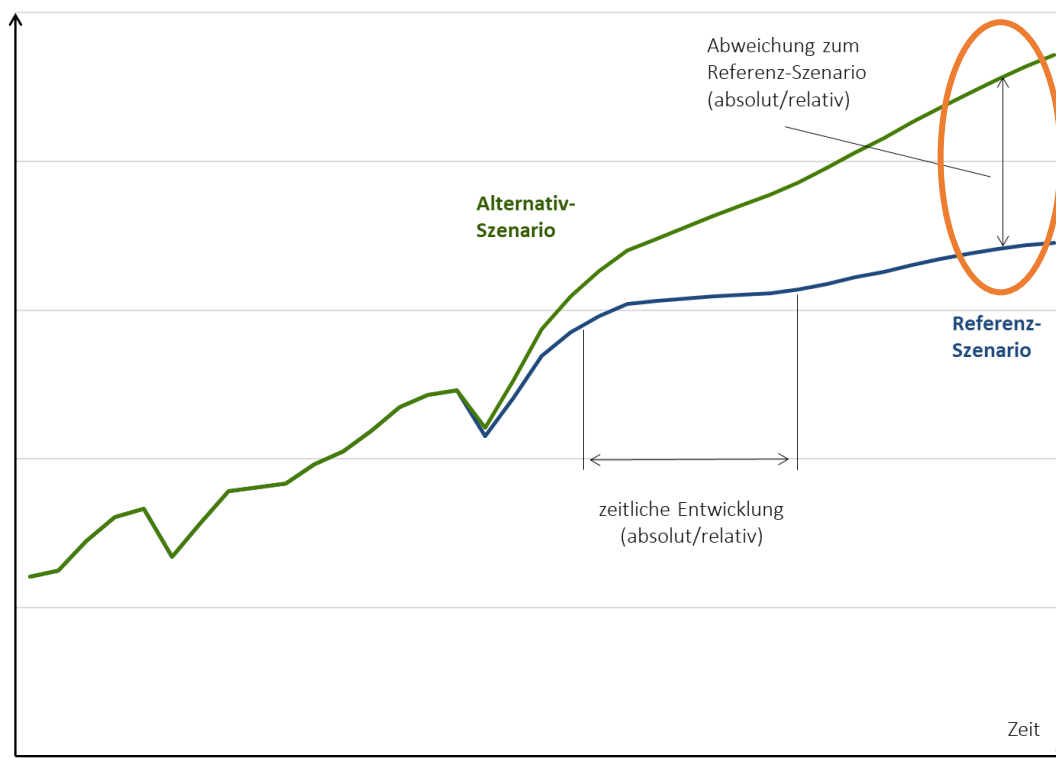
2.2 Szenarienrechnung

Bei einer Szenarienrechnung wird ein Referenz-Szenario mit einem oder mehreren Alternativ-Szenarien verglichen, welche sich in spezifizierten Annahmen von dem Referenz-Szenario unterscheiden. Allen Projektionen gemein sind dieselben Modellzusammenhänge und Datengrundlagen. Die Abweichungen in den Ergebnissen zwischen Referenz- und Alternativ-Szenario sind ausschließlich auf die getroffenen Annahmen zurückzuführen. Die Darstellung der Ergebnisse kann im zeitlichen Ablauf für ein Szenario oder im Vergleich des Alternativ-Szenarios zum Referenz-Szenario zu einem Zeitpunkt erfolgen (vgl. Abbildung 2).

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsberichtes werden als Abweichung zum Referenz-Szenario ausgewiesen (orange umkreiste Variante in Abbildung 2). Diese Darstellung zeigt, ob eine Entwicklung im Alternativ-Szenario stärker oder schwächer ist im Vergleich zum Referenz-Szenario. Allerdings gibt dies keine Auskunft darüber, ob der grundsätzliche Verlauf steigend oder fallend ist. Eine positive Abweichung zum Referenz-Szenario bei den Erwerbstätigen kann also heißen, dass im Alternativ-Szenario die Zahl der Erwerbstätigen stärker ansteigt oder schwächer abnimmt als im Referenz-Szenario – je nachdem wie der Basisverlauf im Referenz-Szenario ausfällt. Eine Positiv- oder Negativabweichung zwischen zwei Szenarien zu einem **Zeitpunkt** heißt also nicht zwingend, dass Arbeitsplätze im **Zeitverlauf** auf- beziehungsweise abgebaut werden. In der Evaluierung von alternativen Wachstumspfaden ist der Basisverlauf aber auch sekundär. Entscheidend ist nur, ob eine Maßnahme beziehungsweise eine Transformation das Wachstum oder die Beschäftigung positiv oder negativ **im Vergleich** zu einer „anderen Welt“ beeinflusst.

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), die langfristigen Folgen der Covid-19-Pandemie (vgl. WOLTER u. a. 2019) oder die Folgen des Kriegs in der Ukraine und der Energiekrise (vgl. ZIKA u. a. 2022b) auf die Ökonomie und den Arbeitsmarkt in Deutschland zu quantifizieren.

Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung



Quelle: QuBe-Projekt

In der vorliegenden Studie wird als **Referenz-Szenario** die QuBe-Basisprojektion der siebten Welle des QuBe-Projektes verwendet (MAIER u. a. 2022). Sie gibt einen Überblick über eine voraussichtliche Entwicklung des deutschen Arbeitsmarktes bis zum Jahr 2040. Das Referenz-Szenario zeigt, dass die Wirtschaft und der Arbeitsmarkt vor einem Umbruch stehen, der von Knappheiten geprägt ist. Knappheiten an Ressourcen in Folge der COVID-19-Pandemie und des Krieges in der Ukraine sorgen für steigende Preise, fehlende Fachkräfte verhindern ein langfristiges Beschäftigtenwachstum. Langfristig sind Engpässen vor allem im Bau sowie in Gesundheits-, IT- und technischen Berufen spürbar. Auch die Zeit zum Erreichen der Klimaziele wird knapp, trotz eines beschleunigten Ausbaus erneuerbarer Energien. Das Referenz-Szenario beinhaltet keine Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft.

Das Alternativ-Szenario – im Folgenden als **Wasserstoff-Szenario**⁴ bezeichnet - wird mit seinen Annahmen in Kapitel 3 beschrieben. Darin werden Entwicklungen vorgegeben, die über das endogene Maß der Modellierung hinausgehen, wie beispielsweise Investitionsbedarf oder Kostenimplikationen des Strukturwandels. Aber auch

⁴ Sofern im Folgenden nicht weiter konkretisiert, bezieht sich dieser Bericht grundsätzlich auf das „**Wasserstoff-Szenario-v2.0**“. Weitere Informationen zur Versionierung bzw. Erweiterung des Wasserstoff-Szenarios-v1.0 sind Kapitel 7 aus ZENK u. a. (2023a) und dem dort illustrierten Projektplan (Abbildung 25) zu entnehmen.

Verschiebungen in internationalen Handelsströmen oder Technologiebedarfe sind Bestandteil der getroffenen Annahmen.

Für die Szenarioanalyse ist vor allem die detaillierte Modellierung der Branchen mit ihren Kostenstrukturen auf Basis der Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes und die feingliedrige Darstellung nach 63 Wirtschaftszweigen, 144 Berufen und vier Anforderungsniveaus wertvoll. Dadurch sind Veränderungen der Produktionsweise in den Branchen, wie auch der Berufs- und Anforderungsstrukturen nach Branchen abbildbar.

3 Annahmen

Die Abschätzung der Effekte einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff auf die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt in Deutschland bedarf verschiedener Eingriffe in das makroökonomische Prognosemodell. Diese Eingriffe basieren auf Annahmen, die sowohl auf Grundlage von Literaturrecherchen als auch von Expert:innen-Interviews getroffen wurden. In vielen Fällen bauen Annahmen aufeinander auf oder beeinflussen sich gegenseitig. In diesem Abschnitt werden die Annahmen, die dem Wasserstoff-Szenario zugrunde liegen, erläutert. In ihrer Gesamtheit sollen sie die Transformation Deutschlands hin zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft beschreiben. Die Annahmen beziehen sich auf einen Zeitraum bis 2045, auch wenn viele Hypothesen auf Ergebnissen aus der Literatur herangezogen werden, die für das Jahr 2050 gelten.

3.1 Tabellarische Übersicht zu den getroffenen Annahmen

In Tabelle 1 werden die in diesem Kapitel erläuterten Annahmen zusammengefasst und quantitativ dargestellt. Es werden jeweils die Annahmen für die Jahre 2030 und 2045 gezeigt.

Tabelle 1: Annahmen im Wasserstoff-Szenario-v2.0

Annahmen		2030	2045
Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import	Wasserstoffgesamtbedarf	96 TWh	412 TWh
	Benötigte Strommenge aus erneuerbaren Energien (Inland)	40 TWh	175 TWh
	Installierte Elektrolyseleistung	10 GW	44 GW
	Elektrolyse-Wirkungsgrad	68 %	73 %
	Wasserstofferzeugung in Deutschland	27 TWh	128 TWh
	Wasserstoff-Importbedarf	69 TWh	284 TWh
Kosten der Herstellung, des Betriebes und des Importes von grünem Wasserstoff; Substitution fossiler Energieträger	Investitionskosten Elektrolyseure	642 €/kW	307 €/kW
	Produktionskosten in Deutschland	16 ct/kWh	8 ct/kWh
	Produktionskosten im Ausland	8 ct/kWh	5,4 ct/kWh
	Differenz zwischen Importkosten für Wasserstoff und fossile Energieträger	1,1 Mrd. €	-23,2 Mrd. €
	Importkapazität der Häfen	24 TWh	64 TWh

Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines und Speicher	Bedarf an Speicherkapazität (Anteil vom Gesamtbedarf)	8 %	16 %
	Kapazität der Pipelines	69 TWh	419 TWh
	Gesamte Pipeline-Investitionskosten kumuliert	6,1 Mrd. €	11,4 Mrd. €
Exporte	Globaler Bedarf an grünem Wasserstoff	957 TWh	5981 TWh
	Differenz zwischen Wasserstofftechnologie-Exporten und konventionellen Kraftwerkstechnik-Exporten	1,5 Mrd. €	0,1 Mrd. €
Weiterverarbeitung zu Folgeprodukten	PtL-Bedarf Luftverkehr	3 TWh	79 TWh
	Ammoniak-Bedarf Schifffahrt	6 TWh	48 TWh

3.2 Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import

Den Ausgangspunkt für die Beschreibung des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft bilden Annahmen zum **Bedarf an grünem Wasserstoff**⁵ in Deutschland. Für das Wasserstoff-Szenario wird angenommen, dass Wasserstoff hauptsächlich im Energiesektor sowie den energieintensiven Industrien als Energieträger eingesetzt wird. Hinzu kommt die Nutzung von Wasserstoff im Transportsektor. Dabei wird angenommen, dass Wasserstoff im Schwerlastverkehr eingesetzt wird und im restlichen Straßen- und Schienenverkehr eine überwiegende Elektrifizierung stattfinden wird. Die stoffliche Nutzung von grünem Wasserstoff wird im Wasserstoff-Szenario nicht berücksichtigt.

Um ein Drittel des Erdgas- und Erdölgasbedarfs⁶ von 2020 durch Wasserstoff im Energiesektor und den energieintensiven Industrien⁷ (ohne Stahl) im Jahr 2030 zu ersetzen, würden 2030 bereits 99 Terawattstunden (TWh) Wasserstoff benötigt. Ein 95-prozentiger Ersatz bis 2045 würde einen Wasserstoffbedarf in Höhe von 313 TWh nach sich ziehen (AG ENERGIEBILANZEN E. V. 2022). Für die Stahlindustrie wird auf die geschätzten Wasserstoffbedarfe der Wirtschaftsvereinigung Stahl zurückgegriffen, die diesen 2030 bei 0,66 Mio. Tonnen Wasserstoff (22 TWh) sehen (WV STAHL 2020). Bis 2045 steigt der errechnete Bedarf annahmegemäß auf 63 TWh an.

Im Verkehrsbereich wird im Wasserstoff-Szenario von einer Wasserstoffnutzung vor allem durch schwere Nutzfahrzeuge ab 2030 ausgegangen. Der Pkw- und Bahnverkehr wird, gemäß Expert:innen-Meinungen, mit höherer Wahrscheinlichkeit elektrifiziert werden, während im Flug- und Schiffsverkehr die Verwendung von Wasserstofffolgeprodukten

⁵ Sofern im Folgenden nicht weiter konkretisiert, bezieht sich dieser Bericht grundsätzlich auf sogenannten grünen Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wird.

⁶ Erdölgas: „in der Lagerstätte in Erdöl gelöstes Gas, v.a. Methan, das bei der Erdölförderung frei wird.“

⁷ Berücksichtigte Industriezweige umfassen dabei: Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung, Wasser-, Windkraft-, Photovoltaik- u.a. Anlagen, Heizkraftwerke und Fernheizwerke, Chemische Industrie, Gummi- und Kunststoffwaren, Glas und Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden.

angenommen wird. Für den Wasserstoffbedarf wurde deshalb das Wasserstoff-Szenario des Fraunhofer ISI gewählt, jedoch ausschließlich die Bedarfe im Bereich der Nutzfahrzeuge berücksichtigt (FRAUNHOFER ISI 2021b).⁸

Der gesamte Bedarf an grünem Wasserstoff in Deutschland ergibt sich aus der Addition der Einzelbedarfe, allerdings korrigiert um die Transport- und Erzeugungskapazitäten, die sich aus der erweiterten NWS (BMW i 2020; SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI

DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021) sowie dem Netzentwicklungsplan (NEP) Gas 2022 (FNB Gas 2022) (vgl. Kapitel 3.4) ergeben.

Insgesamt steigt der realisierbare grüne Wasserstoffbedarf auf 412 TWh im Jahr 2045 an.

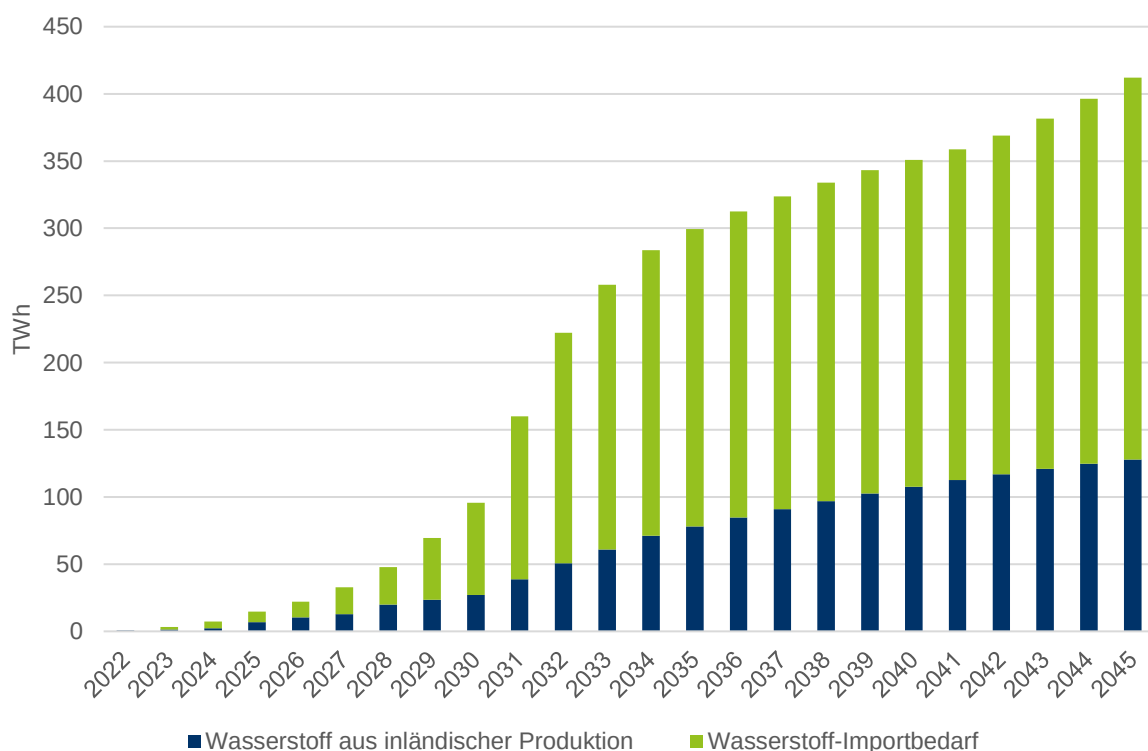
Die Bedarfsannahme liegt damit zwischen dem Stromszenario LFS-TN-Strom (262 TWh Wasserstoff inkl. stofflicher Nutzung) und dem Wasserstoff-Szenario LFS-TN-H2-G

(690 TWh Wasserstoff inkl. stofflicher Nutzung) des Fraunhofer ISI (FRAUNHOFER ISI 2023).

Die Summe aus der in Abbildung 3 dargestellten inländischen Wasserstoffproduktion (blauer Balkenabschnitt) und dem Wasserstoff-Importbedarf (grüner Balkenabschnitt)

veranschaulicht die Entwicklung des gesamten Bedarfs an grünem Wasserstoff bis 2045.

Abbildung 3: Wasserstofferzeugung und Importbedarf (in TWh)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von IEA (2019), SMOLINKA u. a. (2018) und BMW i (2020)

⁸ Für die Interpolation der Jahre, in denen keine Bedarfe explizit angegeben werden, wird im QuBe-Wasserstoff-Szenario sowohl für den Energiesektor und die energieintensiven Industrien als auch für die Stahlindustrie und den Verkehrsbereich ein Kurvenverlauf gemäß der Diffusionstheorie von Everett M. Rogers angenommen (ROGERS (1983)).

Ein Teil des Gesamtbedarfs wird annahmegemäß durch den in Deutschland erzeugten grünen Wasserstoff gedeckt werden können. Grundlage für die Annahmen bezüglich der Produktionskapazitäten bildet der Koalitionsvertrag von 2021, in dem eine Zielvorgabe von zehn Gigawatt (GW) Elektrolysekapazität für das Jahr 2030 formuliert wird (SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS/BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN/FREIE DEMOKRATISCHE PARTEI 2021). Für die restlichen Jahre (bis 2050) orientiert sich die Kapazitätsannahme am Netzentwicklungsplan Gas (vgl. FNB GAS 2022).

Um daraus die **Wasserstoffproduktion** in TWh herzuleiten, müssen auch der Wirkungs- und Nutzungsgrad der Elektrolyseure berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass künftig verschiedene Elektrolyseverfahren unterschiedlicher Effizienz Anwendung finden werden (ZENK u. a. 2023a). Die Annahmen für den Verlauf des Wirkungsgrades basieren auf Prognosen der IEA (2019). Unter Beachtung von der NOW GmbH (SMOLINKA u. a. 2018) angenommener Marktanteile der Elektrolysetechnologien wurden gewichtete Durchschnittswerte gebildet. Aufgrund technischen Fortschritts und intensiver Forschung im Bereich der Wasserstofftechnologien wird davon ausgegangen, dass sich der Wirkungsgrad kontinuierlich von 65 Prozent im Jahr 2019 auf 68 Prozent im Jahr 2030 und schließlich 73 Prozent im Jahr 2045 schrittweise erhöht. Hinsichtlich des Nutzungsgrades werden 4000 Volllaststunden gemäß NWS (BMW I 2020) angenommen. Die gesamte jährliche Wasserstofferzeugung in TWh errechnet sich daraus wie folgt:

$$Wasserstoff\text{erzeugung}_t^{TWh} = \frac{Elektrolyseleistung_t^{GW}}{1000} * Wirkungsgrad_t^{\%} * 4000^h$$

Der in Deutschland erzeugte grüne Wasserstoff reicht allerdings nicht aus, um den Gesamtbedarf zu decken. Die Bedarfslücke wird annahmegemäß aus Importen gedeckt. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche **Importquote** von 68 Prozent (vgl. Abbildung 3). Der angenommene Verlauf der Elektrolysekapazität und des Wirkungsgrades ist in Abbildung 22 dargestellt.

Zur Erzeugung von grünem Wasserstoff wird **Strom aus erneuerbaren Energien** benötigt. Die zusätzlich benötigte Strommenge ergibt sich aus der Multiplikation der installierten Elektrolyseurleistung in Deutschland mit den veranschlagten Volllaststundenanzahl der Anlagen:

$$Benötigte\ Strommenge\ aus\ EE_t^{TWh} = \frac{Elektrolyseleistung_t^{GW}}{1000} * 4000^h$$

Bei zehn GW installierter Leistung im Jahr 2030 ergibt sich dadurch eine benötigte Strommenge aus erneuerbaren Energien in Höhe von 40 TWh. Diese benötigte Strommenge wird als zusätzlich benötigte Strommenge für das Wasserstoff-Szenario definiert. Damit wird

keine Verdrängung der erneuerbaren Energien in der Anwendung in anderen Bereichen wie beispielsweise für den Verkehr oder für Wärme angenommen. Dies wird mit dem Delegated Act der Europäischen Union begründet, der in der aktuellen Fassung zusätzliches Energieaufkommen für die Wasserstoffproduktion verlangt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2023).

3.3 Kosten der Herstellung und des Betriebes von Elektrolyseuren; Kosten der Produktion und des Importes von grünem Wasserstoff; Substitution fossiler Energieträger

Betrachtet man den in Deutschland erzeugten Wasserstoff, müssen Annahmen zum einen über Kosten zur Elektrolyseurherstellung und zum anderen über Kosten durch den Betrieb der Elektrolyseure getroffen werden. Aufgrund der künftigen Realisierung von Skaleneffekten in der Produktion wird angenommen, dass die **Investitionskosten** pro Kilowatt (kW) Elektrolyseurleistung bis 2045 stark sinken. Insbesondere was den Materialeinsatz angeht existieren Kostenreduktionspotentiale. Aktuelle Forschungsprojekte betreffen beispielsweise die Senkung des Bedarfs an Iridium in Elektrolyseuren (BMW 2022c). Das FRAUNHOFER ISI (2021a) prognostiziert Kosten zwischen ca. 400 und 700 Euro (EUR) pro kW, je nach Art und Leistungsfähigkeit des Elektrolysesystems für das Jahr 2030. PATONIA/POUDINEH (2022) nehmen exponentiell abnehmende Kosten bis zum Zeithorizont 2050 an. Die Entwicklung der Investitionskosten für Elektrolyseure im Zeitverlauf wird in Abbildung 23 gezeigt. Die resultierenden jährlichen Kosten für die Herstellung von Elektrolyseuren werden gemäß folgender Rechnung ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Herstellungskosten Elektrolyseure}_t^{\text{Mrd.€}} &= \text{Investitionskosten Elektrolyseure}_t^{\text{€/kW}} \\ &\quad * \left(\frac{\text{Elektrolyseleistung}_t^{\text{GW}} - \text{Elektrolyseleistung}_{t-1}^{\text{GW}}}{1000} \right) \end{aligned}$$

Ebenfalls kann davon ausgegangen werden, dass auch die Stromkosten mit dem geplanten, großflächigen Ausbau erneuerbarer Energien perspektivisch sinken werden. Die sehr hohen Strompreise in 2022 werden allerdings in den **Produktionskosten für Wasserstoff** berücksichtigt und sorgen zu Beginn des Prognosezeitraums für ein Kostenplateau auf hohem Niveau. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass perspektivisch eine Kostenreduktion bis auf unter 3 Euro je Kilogramm (kg) Wasserstoff auch in Deutschland möglich ist (AURORA ENERGY RESEARCH 2022; BHAVNAGRI/KOBAD 2020). Insgesamt wird deshalb eine Kostensenkung bei der Wasserstoffproduktion in Deutschland von 25 Eurocent/kWh auf rund sieben Eurocent/kWh angenommen (vgl. Abbildung 24). Die jährlichen Elektrolyse-Betriebskosten berechnen sich wie folgt:

$$\text{Betriebskosten Elektrolyseure}_t^{\text{Mrd.€}} = \text{Wasserstoffherzeugung}_t^{\text{TWh}} * \frac{\text{Produktionskosten } Dt_t^{\text{ct/kWh}}}{100}$$

Die jährlichen Gesamtkosten, die durch die Erzeugung von grünem Wasserstoff in Deutschland entstehen, resultieren aus Addition der Herstell- und Betriebskosten der Elektrolyseure. Es werden keine Annahmen über Margen und resultierende Verkaufspreise getroffen.

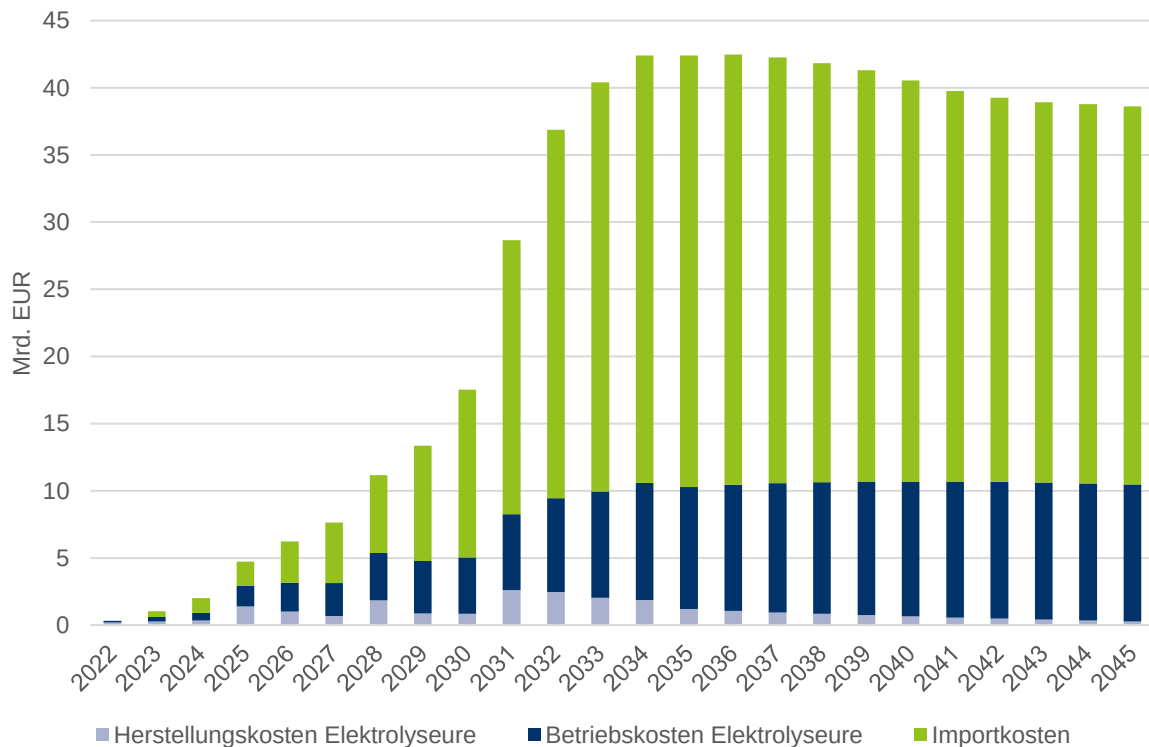
Die **Kosten für den importierten Wasserstoff** setzen sich aus den Produktionskosten und den Transportkosten zusammen. Die Produktionskosten im Ausland liegen annahmegemäß niedriger als in Deutschland, was insbesondere dem Umstand geschuldet ist, dass die Erzeugung von erneuerbaren Energien und damit grünem Strom zur Wasserstoffgewinnung im Ausland aufgrund natürlicher Gegebenheiten kostengünstiger sind – zumindest in den Staaten aus denen Deutschland seinen Wasserstoff potentiell importieren würde (RONSIEK u. a. 2022). Für 2030 werden die Produktionskosten im Ausland auf acht Eurocent/kWh gesetzt und für 2045 auf 5,3 Eurocent/kWh. Diese Werte sind MERTEN u. a. (2020) entnommen und beziehen sich jeweils auf Nordafrika. Dabei handelt es sich um die jeweils niedrigsten Werte der in MERTEN u. a. (2020) genannten Spannbreiten für beide Jahre. In den übrigen Jahren wird eine lineare Interpolation der Werte vorgenommen (vgl. Abbildung 24). Auch die Angaben zu den Transportkosten orientieren sich an den Zahlen von MERTEN u. a. (2020) zum Transport aus Nordafrika. Dabei wird zwischen dem Transport via Schiff und via Pipeline differenziert⁹. Erst nach 2040 wird der Transportkostenvorteil beim Schiff liegen. In den Jahren davor ist der Transport via Pipeline günstiger. Während in den ersten Jahren aufgrund nicht verfügbarer SchiffsKapazitäten zunächst zu 100 Prozent über die Pipeline transportiert wird, wird im Zuge der Kostendegression des Schiffftransportes und der steigenden Verfügbarkeit von logistischer Infrastruktur (siehe Kapitel 3.4) immer mehr grüner Wasserstoff auch via Schiff importiert. Bis 2045 wird der Anteil des Pipelinetransportes annahmegemäß auf 83 Prozent sinken. Zur Errechnung der jährlichen Kosten, die durch den jeweiligen Transport entstehen, wurden Durchschnittsdistanzen von 3000 Kilometer (km) bei der Pipeline und 5000 km beim Schiff angenommen. Die jährlichen Gesamtkosten für den Wasserstoffimport unter Berücksichtigung der jährlichen Importbedarfe berechnen sich anhand der folgenden Formel:

$$\text{Importkosten}_t^{\text{Mrd.€}} = \text{Produktionskosten Ausland}_t^{\text{Mrd.€}} + \text{Transportkosten}_t^{\text{Mrd.€}}$$

⁹ Pipeline Transportkosten: Reduktion von 0,034 auf 0,014 EUR/MWh/km zwischen 2021 und 2045; Schiff Transportkosten: Reduktion von 0,045 auf 0,01 EUR/MWh/km zwischen 2021 und 2045; lineare Interpolation zwischen den Werten.

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der jährlichen Gesamtkosten zur Deckung des Wasserstoffbedarfs. Bis Mitte der 2030er Jahre steigen die Gesamtkosten - getrieben durch die wachsenden Importbedarfe - annahmegemäß dynamisch an. Ab 2036 dominiert der Effekt der sinkenden Produktionskosten im Ausland; die Gesamtkosten sinken leicht.

Abbildung 4: Jährliche Gesamtkosten grüner Wasserstoff (in Mrd. EUR)



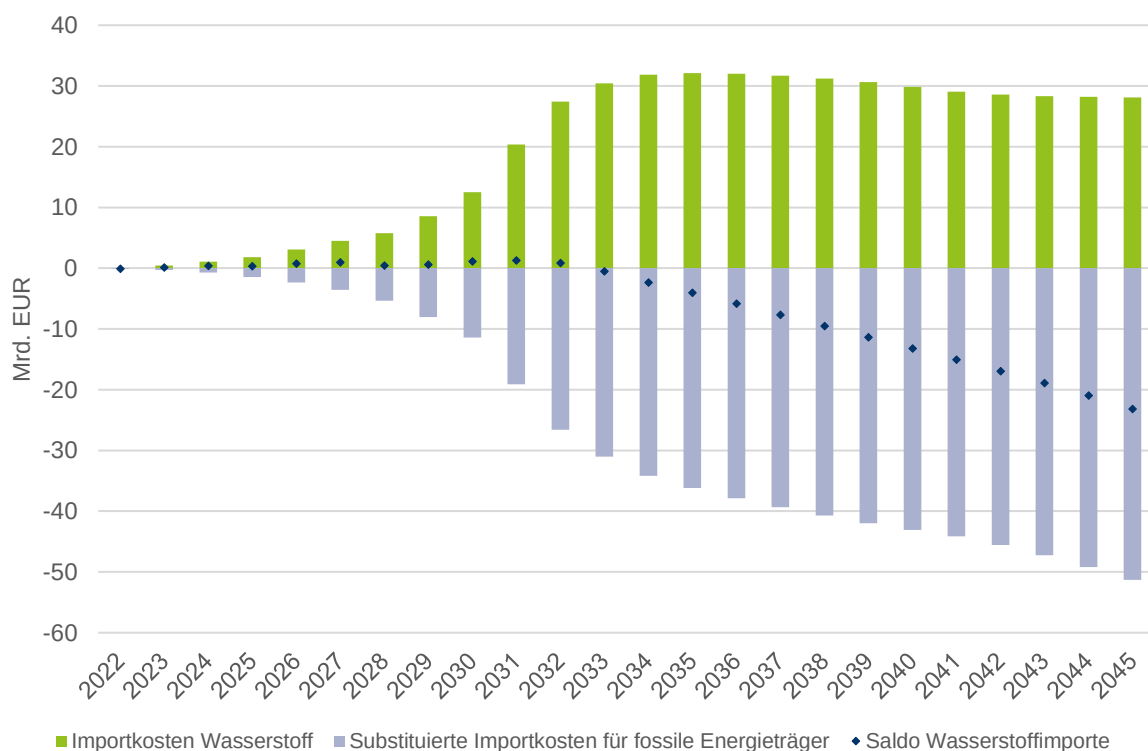
Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von HOLST u. a. (2021) und MERTEN u. a. (2020)

Die Transformation zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft hat annahmegemäß zur Folge, dass sich der Energiemix ändert. Im Vergleich zur Basisprojektion wird kein zusätzlicher Energiebedarf angenommen. Grüner Wasserstoff verdrängt somit fossile Energieträger - wie Gas und Öl - und reduziert deren Import. Folglich wird der Einsatz von grünem Wasserstoff in TWh den fossilen Importbedarf in gleicher Höhe ersetzen. Die importierte Menge und der Preis bestimmen somit, ob der wertmäßige Import beim Umschwung auf eine Wasserstoffwirtschaft höher oder niedriger ausfällt. Für die **Substitutionsannahme** wird der Preis für Erdgas für die Industrie in Eurocent (ct) je kWh verwendet, da Wasserstoff insbesondere als energetisches Substitut für Produktionsprozesse in energieintensiven Industrien Verwendung finden soll. Gemäß den Energiedaten des BMWK (BMWK 2023) lag der Preis für Erdgas für die Industrie in Deutschland im Jahr 2021 bei 2,65 ct/kWh. Für das Jahr 2022 wird eine Preissteigerung um 500 Prozent auf 16 ct/kWh veranschlagt. Für die Jahre 2023 bis 2025 wird die Gaspreisbremse eingerechnet. Demnach reduziert sich der

Preis auf zehn ct/kWh.¹⁰ Für die Folgejahre bis 2050 folgt die Preisentwicklung der Entwicklung des globalen Erdgaspreises, der sich aus den Annahmen des IMF (2021) und der IEA (2021) ergibt.

Aufgrund der hohen Importkosten für grünen Wasserstoff, werden trotz der zuletzt historisch hohen Preise für Erdgas erst ab dem Jahr 2033 nominell weniger Ausgaben für Energieimporte getätigt werden müssen, wie Abbildung 5 zeigt. Erst dann liegt der Kostenvorteil beim grünen Wasserstoff. Dennoch werden aufgrund der hohen Erdgaspreise deutlich weniger zusätzliche Importausgaben notwendig sein, als es sonst der Fall gewesen wäre, wenn die Erdgaspreise auf den früheren historisch niedrigen Preisniveaus liegen würden. Insofern ist die Energiekrise als Treiber einer Transformation zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft einzuordnen.

Abbildung 5: Substitution fossiler Energieimporte (in Mrd. EUR)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von MERTEN u. a. (2020), BMWK (2023), IMF (2021) und IEA (2021).

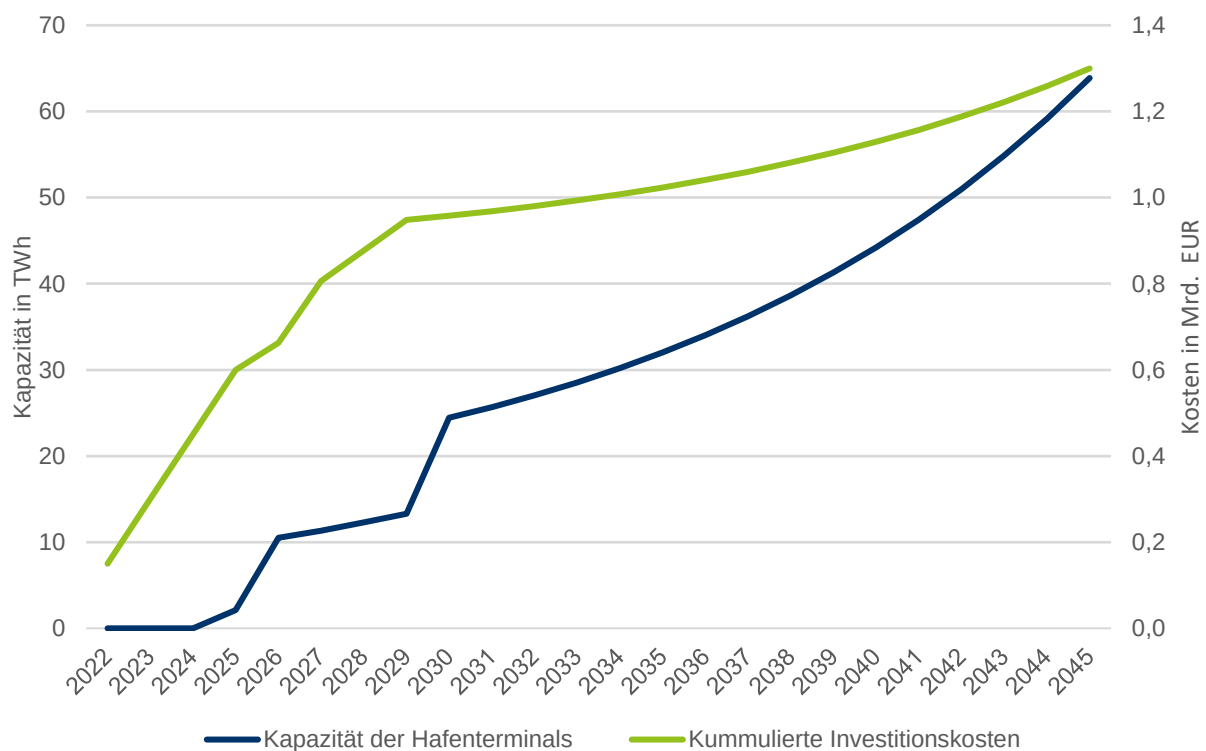
3.4 Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines und Speicher

Für den Import, die Speicherung und die Verteilung des Wasserstoffs müssen Annahmen über Bereitstellung und Kosten der benötigten Infrastruktur getroffen werden. Konkret werden im Wasserstoff-Szenario die **Hafenprojekte** in Brunsbüttel von RWE und in

¹⁰ Der Gaspreis soll für die Industrie auf sieben ct/kWh fallen. Da dieser Preis aber nur für 70 Prozent des Verbrauches gilt, wird vereinfachend ein Aufschlag von drei ct/kWh angenommen.

Wilhelmshaven von TES berücksichtigt. Laut BMWK dauert der Bau eines LNG-Terminals drei bis dreieinhalb Jahre (BMWK 2022b). Eine ähnlich lange Bauzeit wird für das Wasserstoff-Szenario für die Importterminals von Wasserstoff mit vier Jahren angenommen. Die Annahmen über die Kapazitäten sowie die Investitionskosten fußen auf Angaben auf den Internetseiten der jeweiligen Projekte, wobei die Kapazitäten anhand der Importbedarfsannahme (siehe Kapitel 3.2) angepasst werden. Dabei wird der Wasserstoff nicht zwangsläufig direkt, sondern mittels Trägerstoffen wie zum Beispiel grünem Ammoniak importiert¹¹. Die Entwicklung der geplanten, beziehungsweise benötigten Importkapazität sowie der entsprechenden Investitionen wird in Abbildung 6 veranschaulicht. Bei der Verteilung der Investitionen wird davon ausgegangen, dass 80 Prozent auf Bau- und 20 Prozent auf Ausrüstungsinvestitionen entfallen.

Abbildung 6: Kapazität (in TWh) und Investitionskosten (in Mrd. EUR) der Häfen



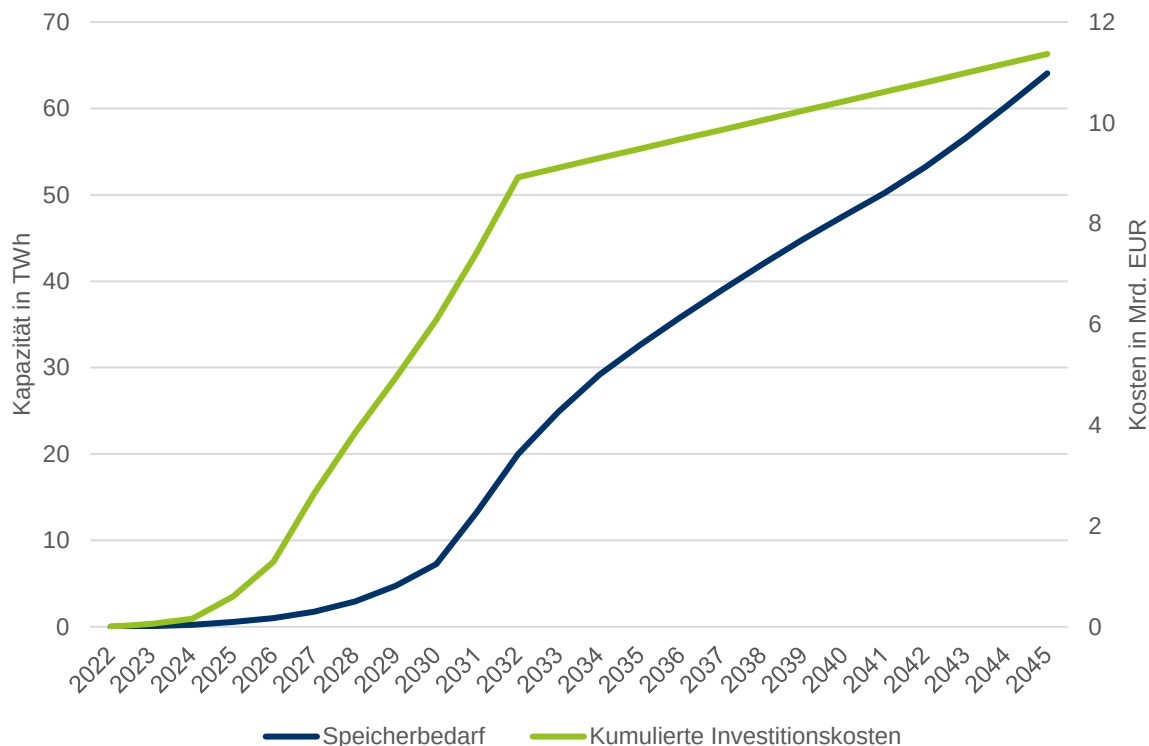
Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von RWE (2023) und TES (2022)

Um einen der großen Vorteile von Wasserstoff - die Möglichkeit zur längerfristigen **Speicherung** - zu realisieren, benötigt es ausreichende Speicherkapazitäten. Der Speicherbedarf an Wasserstoff liegt gemäß LUX u. a. (2021) im Jahr 2050, je nach Szenario, zwischen sieben und 28 Prozent des Gesamtbedarfs. Auf der Website des Fraunhofer-Instituts (FRAUNHOFER ISI 2021b) werden darüber hinaus Wasserstoff- und Speicherbedarfe für die Jahre 2030 und 2040 ausgewiesen. Daraus abgeleitet ergibt sich für das Wasserstoff-

¹¹ Für die Herstellung von einem kg Wasserstoff werden ca. 5,5 kg Ammoniak benötigt.

Szenario ein auf 16 Prozent des Gesamtbedarfes des Jahres 2045 steigender Speicherbedarf (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Wasserstoff-Speicherbedarf (in TWh) und Investitionskosten (in Mrd. EUR)



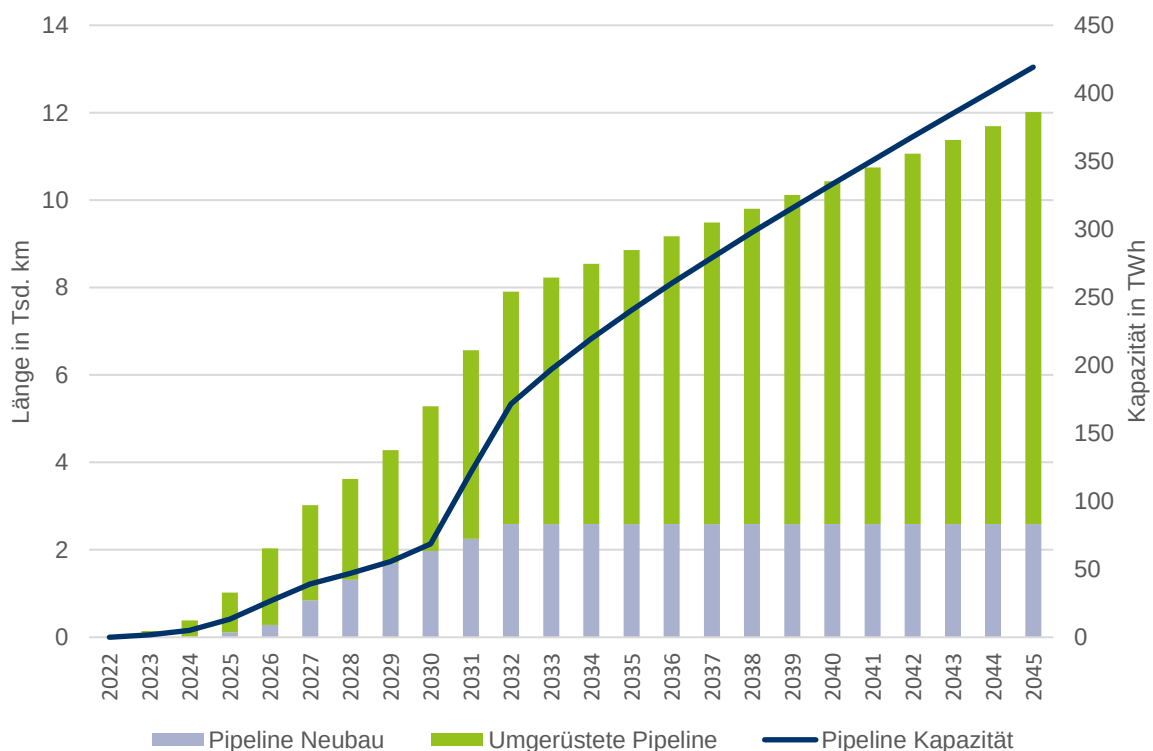
Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von: LUX u. a. (2021), FRAUNHOFER ISI (2021b), BÜLTEMEIER u. a. (2022)

Für die Speicherung kommt zum einen die Umrüstung von Salzkavernen und zum anderen der Neubau von Speichern in Frage. Gemäß BÜLTEMEIER u. a. (2022) könnten ab 2027 durch Umrüstungen von Salzkavernen, die beispielsweise für die Speicherung von Erdgas genutzt werden, Kapazitäten in Höhe von rund 32 TWh bereitgestellt werden, wobei Umrüstungskosten von 34 Mio. Euro pro TWh entstehen. Der darüberhinausgehende Bedarf erfordert den Neubau von Speichern. Dafür werden Kosten in Höhe von 269 Mio. Euro pro TWh angenommen (BÜLTEMEIER u. a. 2022). Für das Wasserstoff-Szenario werden so lange die Umbaukosten von 34 Mio. Euro pro TWh Speicherkapazität zugrunde gelegt, bis der errechnete Speicherbedarf die 32 TWh Wasserstoffspeicherkapazität erreicht hat, die durch den Umbau zur Verfügung gestellt werden. Anschließend wird der Neubau-Kostensatz von 269 Mio. Euro pro TWh Speicherkapazität verwendet. In den Neubau von Speicherkapazitäten investieren die Energieversorger. Auch hier fließen die Kosten zu 80 Prozent in Bauinvestitionen und zu 20 Prozent in Ausrüstungen. Die Entwicklung des notwendigen Investitionsvolumens ist in Abbildung 7 zu sehen. Für die jährlich anfallenden Betriebskosten der Wasserstoffspeicher

werden, SENS u. a. (2022) folgend, im Wasserstoff-Szenario jährlich rund zwei Prozent der Investitionskosten als Betriebskosten angenommen (vgl. Abbildung 25).

Neben den Häfen für den Import und den Kavernen für die Speicherungen wird auch eine Infrastruktur benötigt, um den Wasserstoff im Inland zu transportieren und zu verteilen. Zum Teil bietet sich hier die Umrüstung des Erdgasnetzes an. Darüber hinaus werden allerdings auch neue **Pipelines** benötigt werden. Die konkreten Annahmen zum Pipelinenetz basieren auf dem Netzentwicklungsplan Gas 2022 – 2032¹². Für die Folgejahre wird ein Szenario der FNB Gas (FNB GAS 2022) berücksichtigt. Darin wird von einem im Jahr 2050 etwa 13.300 km langem Wasserstoffnetz ausgegangen, welches zu 11.000 km aus Umrüstungen sowie zu 2.300 km aus neu gebauten Pipelines besteht. Da dieses Neubauziel gemäß NEP (FNB GAS 2022) bereits im Jahr 2032 erreicht werden wird, wird im Wasserstoff-Szenario von keinem weiteren Neubau nach 2032 ausgegangen. Laut VAN ROSSUM u. a. (2022) steigen die Transportkapazitäten bis 2030 auf 0,013 TWh/km und bis 2050 auf 0,037 TWh/km. In der Abbildung 8 werden die Annahmen über die Entwicklung der Länge und Kapazität des für den Wasserstofftransport bereiten Pipelinenetzes dargestellt. Es werden jeweils kumulierte Werte gezeigt.

Abbildung 8: Wasserstoff-Pipelinenetz: Länge (in Tsd. km) und Kapazität (in TWh)

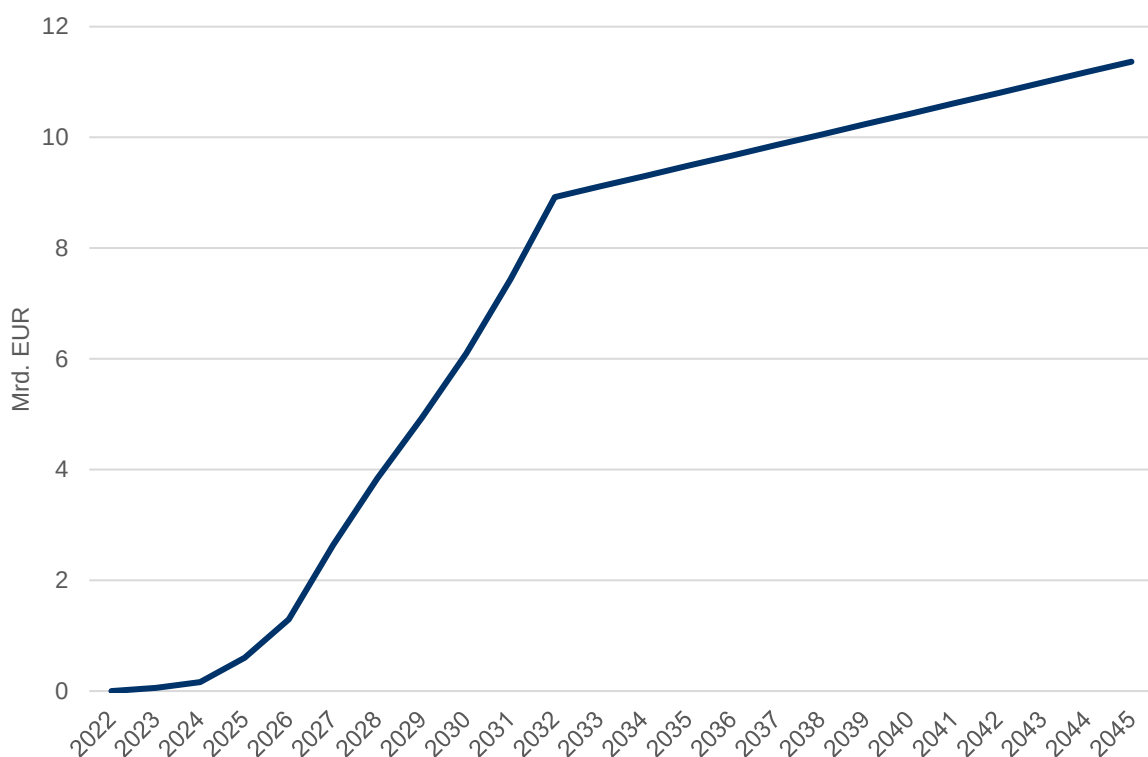


Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von FNB GAS (2022) und VAN ROSSUM u. a. (2022)

¹² Zwischenstand vom 06.07.2022.

Die Annahmen zu den anfallenden Investitionskosten werden im Wasserstoff-Szenario auf Grundlage des NEP (FNB GAS 2022) getroffen. Der Leitungsumbau erfordert demnach Investitionen von 400.000 Euro pro km. Beim Neubau von Pipelines fallen annahmegemäß 2,1 Mio. Euro pro km an. Zusätzliche Investitionskosten entstehen durch Strecken- und Kopfverdichter sowie Regelanlagen. Für das Wasserstoff-Szenario werden die zusätzlichen Investitionskosten den Jahren zwischen 2023 und 2032 entsprechend dem Ausbaufortschritt des Pipelinenetzes zugerechnet. Für die Folgejahre werden Zusatzkosten in Höhe von 196.000 Euro pro zusätzlichem Leitungskilometer angenommen. Abbildung 9 zeigt die Annahmen zu den benötigten jährlichen Investitionen in das Pipelinenetz.

Abbildung 9: Investitionskosten Pipelinenetz (in Mrd. EUR)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von FNB GAS (2022)

Die jährlichen Betriebskosten des Pipelinenetzes belaufen sich laut European-Hydrogen-Backbone (EHB) für das gesamte europäische Netz mit 53.000 Leitungskilometern auf 1,6 Mrd. bis 3,2 Mrd. Euro (vgl. VAN ROSSUM u. a. 2022). Auf den Kilometer gerechnet ergibt sich damit ein Durchschnittswert von 37.736 Euro pro Jahr. Im Wasserstoff-Szenario wird von konstanten Betriebskosten pro Kilometer ausgegangen. Die Betriebskosten werden nur für die neugebauten Pipelines berechnet, die zusätzlich zu den Betriebskosten der bereits bestehenden Pipelines hinzukommen (vgl. Abbildung 25).

Die Kosten durch die Umrüstung werden zu 80 Prozent als Bauinvestitionen gebucht, zu 20 Prozent als Ausrüstungsinvestitionen. Die Neubaukosten gelten als Bauinvestitionen. Als

Ausrüstungsinvestitionen werden die zusätzlichen Kosten für Strecken- und Kopfverdichter und Regelanlagen gebucht. Die Kosten für den Betrieb von Pipelines werden mit den Wartungskosten für die Speicher summiert. Annahmegemäß fallen sämtliche Kosten bei der Branche der Energieerzeugung an.

3.5 Exportannahmen

Der NWS zufolge sollen Wertschöpfungschancen durch den Export von Wasserstofftechnologien realisiert werden (BMW 2020). Stand heute befindet sich Deutschland vor allem im Bereich der Elektrolyseure unter den Technologieführern. Exportdestinationen könnten zum einen Länder sein, die bereits größere Handelsvolumina sowie gute Beziehungen mit Deutschland aufweisen. Potentiale ergeben sich aber vor allem in neuen Märkten. Hierzu zählen Länder, die in großem Maßstab grünen Wasserstoff erzeugen wollen, aber bislang verhältnismäßig wenig Maschinen- und Elektrotechnik aus Deutschland importieren (ZENK u. a. 2023b).

In den Annahmen ist der **Exportwert der Wasserstofftechnologien** abhängig vom weltweiten Bedarf an grünem Wasserstoff, sowie vom Weltmarktanteil Deutschlands an den globalen Wasserstofftechnologieexporten. Im Jahr 2022 lag der Anteil an aus erneuerbaren Energien produzierten, grünem Wasserstoff bei rund fünf Prozent. Bis 2050 könnte er jedoch auf 60 bis 70 Prozent steigen (IRENA 2022; DNV 2022). Der WORLD ENERGY COUNCIL (2021) prognostiziert Anstiege im weltweiten Bedarf sowie im Anteil von grünem Wasserstoff vor allem in den Jahren nach 2030. Darauf aufbauend und unter Berücksichtigung des 1,5°C-Ziels wird im Wasserstoff-Szenario angenommen, dass der weltweite Bedarf an grünem Wasserstoff im Jahr 2030 bei ca. 1.000 TWh und im Jahr 2045 bei ca. 6.000 TWh liegen wird (vgl. Abbildung 26).

Der deutsche Weltmarktanteil an Elektrolyseuren wird auf im Zeitverlauf konstante zehn Prozent geschätzt (BMW 2022c). Der jährliche Exportwert von Wasserstofftechnologien wird der Elektrotechnik und dem Maschinenbau zugeschrieben und errechnet sich folgendermaßen:

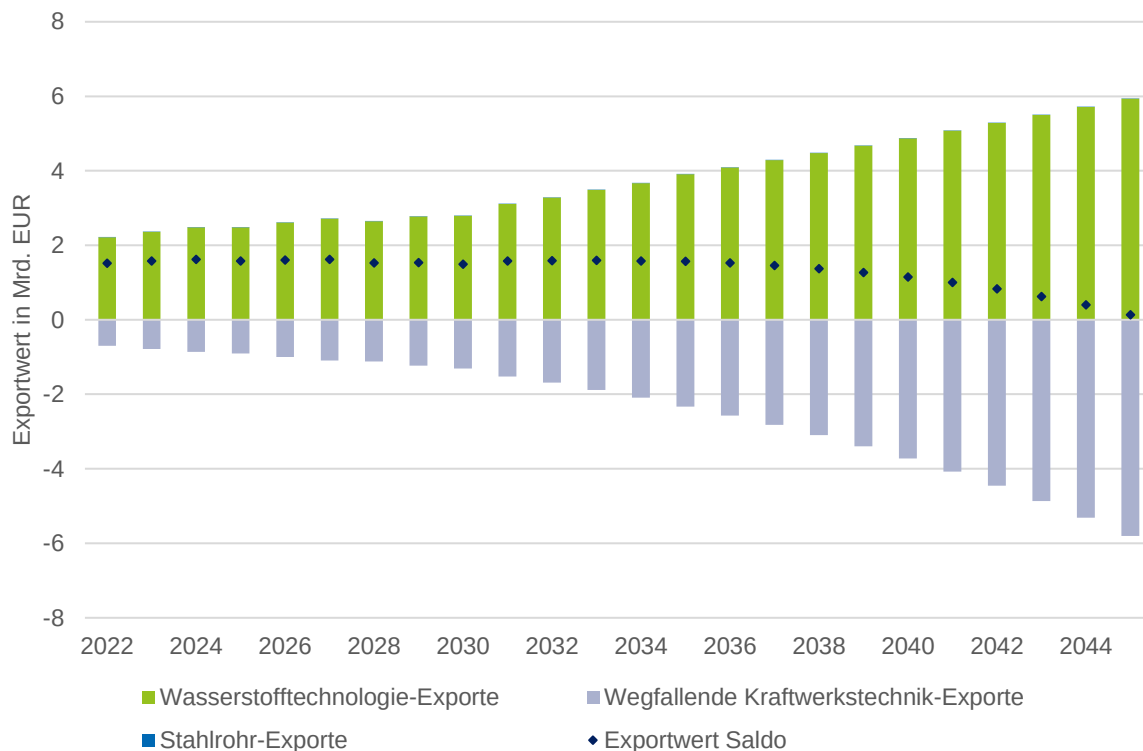
$$\begin{aligned} \text{Wasserstofftechnologie Exporte}_t^{\text{Mrd.€}} &= \left(\text{Globale Elektrolyseleistung}_t^{\text{GW}} - \text{Globale Elektrolyseleistung}_{t-1}^{\text{GW}} \right) * 10\% \\ &\quad * \frac{\text{Investitionskosten Elektrolyseure}_t^{\text{€/kW}}}{1000} \end{aligned}$$

Gleichzeitig wird allerdings auch angenommen, dass der **Export von konventioneller Kraftwerkstechnik** nach und nach wegfallen wird, da diese auch im Ausland mit der Dekarbonisierung der Energiesysteme weniger gebraucht werden wird. Zur Errechnung des wegfallenden Volumens wird im Wasserstoff-Szenario angenommen, dass nur

konventionelle Kraftwerkstechnologie in der Höhe wegfällt, wie grüne Wasserstofftechnologie neu benötigt wird. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass auch durch den Ausbau von erneuerbaren Energien zur Stromgewinnung konventionelle Kraftwerkstechnik substituiert wird. Es wird angenommen, dass Deutschland circa zehn Prozent des weltweiten Exportvolumens bei konventioneller Kraftwerkstechnik abdeckt (LEHR u. a. 2020). Unter der Berücksichtigung von spezifischen Investitionskosten von 300 Euro/kW (POSCH 2010) ergibt sich dann ein wegfallendes Exportvolumen, das sich bis 2045 auf 1,6 Mrd. Euro anhäufen könnte. Der Wegfall der Exporte wird drei Wirtschaftszweigen zugeteilt (Herstellung von Verbrennungsmotoren und Turbinen WZ 28.11, Herstellung von Dampfkesseln WZ 25.3, Herstellung von Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren WZ 27.11) (SUNDMACHER 2015). Um den Transport von grünem Wasserstoff zu gewährleisten ist nicht nur der Aufbau eines nationalen, sondern auch eines europäischen Transportnetzes notwendig. Da davon auszugehen ist, dass zunächst über Rohrfernleitungen grüner Wasserstoff importiert wird, muss die bestehende Rohrinfrastruktur aus- und aufgebaut werden. Gemäß der Initiative EHB sollen bis 2045 26.400 km neue Rohrfernleitungen gebaut werden. Die hierfür notwendige Investitionssumme liegt annahmegemäß bei 2,1 Mio. Euro pro Kilometer. Daraus ergibt sich 2045 eine kumulierte Investitionssumme für den Neubau in Höhe von 55,5 Mrd. Euro. Werden rund 1,4 Prozent der Investitionssumme für den Einkauf von **Stahlrohren** aufgewendet und liegt der deutsche Exportanteil am Weltstahlrohrmarkt bei 1,2 Prozent (WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHLROHRE E.V.), ergeben sich jährliche Exportpotentiale für die deutsche Stahlrohrindustrie in Höhe von 0,4 Mio. Euro pro Jahr. Die zusätzlichen Exporte von Stahlrohren werden dem Wirtschaftszweig Metallerzeugung und -bearbeitung zugeschrieben.

Abbildung 10 stellt die Zugewinne aus dem Export von Wasserstofftechnologien den wegfallenden Kraftwerksexporten gegenüber. Die zusätzlichen Exporte von Wasserstofftechnologien überwiegen die Rückgänge der Kraftwerksexporte, der Saldo nimmt gegen 2045 jedoch ab.

Abbildung 10: Exportannahmen (in Mrd. EUR)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von IRENA (2022), DNV (2022), WORLD ENERGY COUNCIL (2021), BMWK (2022c), LEHR u. a. (2020) und POSCH (2010)

3.6 Weiterverarbeitung von grünem Wasserstoff zu Folgeprodukten

Anders als für den Schwerlasttransport wird für die Schiff- und Luftfahrt angenommen, dass Wasserstoff nicht direkt als Antriebsmittel genutzt wird, sondern in Form von Power-to-Liquid (PtL) als Ersatz für Kerosin oder Schweröl weiterverarbeitet wird. Für PtL-Produkte wird annahmegemäß vollständig auf Importe zurückgegriffen. Die inländische Wasserstoffproduktion wird also nicht für die Herstellung von Folgeprodukten genutzt. Unter Substitutionsaspekten hat die Nutzung von Folgeprodukten aus grünem Wasserstoff für den Schiffs- und Flugverkehr lediglich Preiswirkungen.

Im **Luftverkehr** wurden vor der Corona-Pandemie im Jahr 2019 121 TWh an Flugturbinenkraftstoff verbraucht (AG ENERGIEBILANZEN E. V. 2022). Gemäß Fraunhofer ISI dürfte der Energiebedarf bis 2030 auf 140 TWh und bis 2040 auf 143 TWh ansteigen. Bis 2050 wird aufgrund von Effizienzsteigerungen von einem Rückgang auf 117 TWh ausgegangen (FRAUNHOFER ISI 2021c). Das nationale Luftaufkommen kann gemäß Fraunhofer ISI bis 2050 mit elektrischen Flugzeugen bewältigt werden, wofür 3,5 TWh Strom benötigt würden und sich der Bedarf an PtL-Kerosin somit auf 113,5 TWh reduzieren würde (KRAIL u. a. 2021).

Im Zuge der Umsetzung von RED II (europäische erneuerbare-Energien-Richtlinie) ist eine nationale Quote zum Beimischen von strombasiert hergestelltem, nachhaltigem Kerosin (PtL) zu konventionellem Kerosin im Flugverkehr eingeführt worden. Demnach soll beim Luftverkehr die energetische Quote für PtL-Kerosin in 2026 bei 0,5 Prozent, 2028 bei einem Prozent und 2030 bei zwei Prozent liegen (BMUV 2021). Der PtL-Bedarf im Luftverkehr wird für das Wasserstoff-Szenario deshalb, ausgehend von den nationalen Quoten für PtL-Kerosin hin zu einem vollständigen Ersatz des fossilen Energiebedarfs bis 2050, auf fast 80 TWh bis 2045 ansteigen.

Eine Studie der Deutschen Energie-Agentur (BREYER u. a. 2022) beziffert die Importkosten für PtL-Kerosin von außerhalb der EU und den USA auf 112 Euro je Megawattstunde in 2030, 85 Euro je MWh in 2040 und 69 Euro je MWh in 2050. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Transportkosten (RUNGE u. a. 2020) und den Kosten für fossiles Kerosin (EIA 2023) wird die Preiswirkung berechnet:

$$\begin{aligned}
 & \text{Zusatzkosten PtL Kerosin}_t^{\text{Mrd.€}} \\
 &= \left(\text{PtL Kerosinbedarf}_t^{\text{TWh}} \right. \\
 & \quad \left. * \left(\text{Importkosten PtL Kerosin}_t^{\text{Mrd.€}} + \text{Transportkosten}_t^{\text{Mrd.€}} \right) \right. \\
 & \quad \left. - \left(\text{PtL Kerosinbedarf}_t^{\text{TWh}} * \text{Preis fossilen Kerosins}_{2021}^{\text{Mrd.€}} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Die **Schifffahrt** macht einen sehr kleinen Teil des Energiebedarfs in Deutschland aus. Vor der Corona-Pandemie verbrauchte die Küsten- und Binnenschifffahrt im Jahr 2019 drei TWh an Dieselmotorkraftstoff (AG ENERGIEBILANZEN E. V. 2022). Gemäß Fraunhofer ISI dürfte der Energiebedarf bis 2030 auf rund vier TWh ansteigen und anschließend wieder auf rund drei TWh bis 2050 fallen. Da im Binnenverkehr eine teilweise Elektrifizierung möglich ist, wird davon ausgegangen, dass nur 80 Prozent des Energiebedarfs in 2050 durch PtL-Produkte ersetzt werden muss (KRAIL u. a. 2021). Hochseeschiffe hatten gemäß Fraunhofer ISI einen Energiebedarf von rund 43 TWh, dürften diesen bis 2030 auf rund 48 TWh und bis 2040 auf 49 TWh steigern und bis 2050 auf rund 46 TWh reduzieren (FRAUNHOFER ISI 2021c). Bis 2050 soll der Energiebedarf vollständig durch PtL-Produkte gedeckt werden. Für das Wasserstoff-Szenario wird zunächst davon ausgegangen, dass sich grüner Ammoniak als Treibstoff in der Schifffahrt durchsetzt. Das Vorgehen zur Bestimmung der Preiswirkung gleicht den Berechnungen für den Luftverkehr, wobei für grünen Ammoniak ein Marktpreis von 650 Euro je Tonne angesetzt wurde (WITSCH 2022) und den Kosten für Schiffsdiesel je Tonne gegengerechnet wurde.

4 Ergebnisse

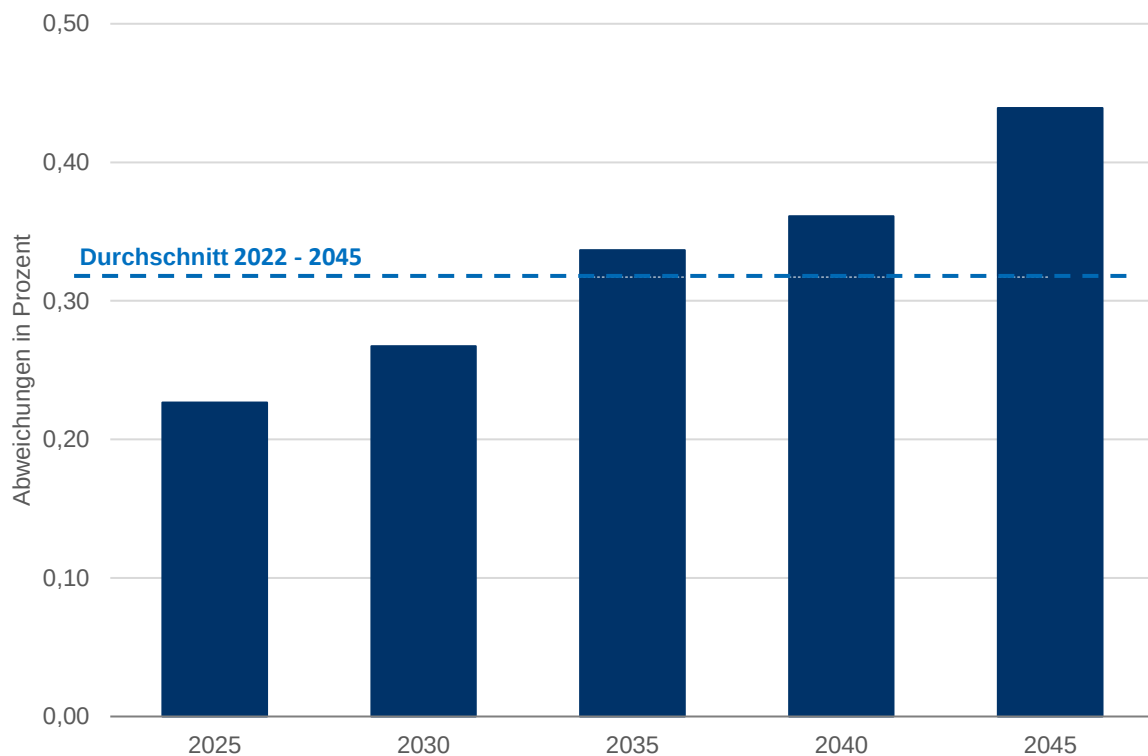
4.1 Folgen für Wertschöpfung und Wachstum

Der Blick auf die Ergebnisse zeigt, dass sich die Aufnahme von Wasserstoff in den Energiemix der Modellrechnung positiv auf das Wirtschaftswachstum und auf den Arbeitsmarkt auswirkt. Über den gesamten Projektionszeitraum, von 2022 bis 2045, liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) im Wasserstoff-Szenario jährlich um durchschnittlich 0,32 Prozent (11,70 Mrd. Euro) höher als im Referenz-Szenario (vgl. Abbildung 11). Das höhere BIP-Niveau wird vor allem durch zusätzlich anfallende Ausrüstungs- und Bauinvestitionen sowie höhere private Konsumausgaben erreicht. Im Fünfjahresvergleich nimmt die Differenz zwischen den beiden Szenarien von 0,23 Prozent im Jahr 2025 auf 0,44 Prozent in 2045 zu. Höhere Importausgaben wirken sich dabei negativ auf das BIP aus und dämpfen die positiven Wirkungen ab. Ab 2035 wird dieser Effekt von niedrigeren Exporteinnahmen verstärkt.

Aufgrund der hohen Importkosten für grünen Wasserstoff, werden trotz der zuletzt historisch hohen Preise für Erdgas erst ab dem Jahr 2033 nominell weniger Ausgaben für Energieimporte getätigt werden müssen. Erst dann liegt der Kostenvorteil bei grünem Wasserstoff und die Substitution von fossilen Energieträgern mit grünem Wasserstoff lässt die Importbedarfe im Vergleich zur Basisprojektion sinken. Niedrigere Importe wirken sich positiv auf die Berechnung des Bruttoinlandsprodukts aus; die positive Abweichung des Bruttoinlandsproduktes zum Referenz-Szenario wird stärker, sodass die Wirtschaftsleistung im Wasserstoff-Szenario im Jahr 2045 um 0,44 Prozent höher liegt als im Referenz-Szenario.

Die Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios resultieren aus den getroffenen Annahmen (z.B. Ausbau erneuerbarer Energien und Wasserstoffinfrastruktur). Sollte der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft länger dauern als im Modell angenommen, würden sich die Effekte zeitlich verschieben und in ihrer Ausprägung gegebenenfalls abweichen.

Abbildung 11: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (in Prozent)



Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

In Abbildung 12 sind die Abweichungen in den einzelnen Komponenten des preisbereinigten BIP in Fünf-Jahres-Schritten bis 2045 zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario dargestellt. Es zeigt sich, dass die höhere Wirtschaftsleistung vor allem auf Ausrüstungsinvestitionen im Inland (z.B. in Elektrolyseure und Pipelines) zurückzuführen ist. Die zusätzlichen Bauinvestitionen, die vor allem durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien getätigt werden, haben einen ebenso positiven Einfluss auf das BIP, wie höhere Konsumausgaben der privaten Haushalte. Die höheren Konsumausgaben sind die induzierte Folge der besseren Beschäftigungssituation, die wiederum Folge der erhöhten Investitionstätigkeit in den Branchen ist. Mehr Menschen in Beschäftigung und bessere Verdienstmöglichkeiten der Erwerbstätigen wirken sich positiv auf den privaten Konsum aus.

Am Anfang des Projektionszeitraums wirken sich auch die Exporte positiv auf das BIP aus, die sich durch zusätzliche Ausfuhren der Maschinenbau- und Elektroindustrie sowie der Stahlrohrhersteller ergeben. Die Differenz der Exporte flacht gegen 2030 allerdings immer weiter ab und wird ab Mitte der 2030er Jahre sogar negativ. Dies liegt zum einen an den sinkenden Ausfuhren konventioneller Kraftwerkstechnik (vgl. Kapitel 3.5) und zum anderen an den sinkenden Investitionskosten für die Herstellung von Elektrolyseuren in Deutschland (vgl. Kapitel 3.3). Aufgrund abnehmender Herstellungskosten können die Elektrolyseure günstiger auf dem Weltmarkt verkauft werden. Der nominelle Exportwert steigt dadurch weniger schnell, als bei höheren Herstellungskosten angenommen werden könnte. Beide

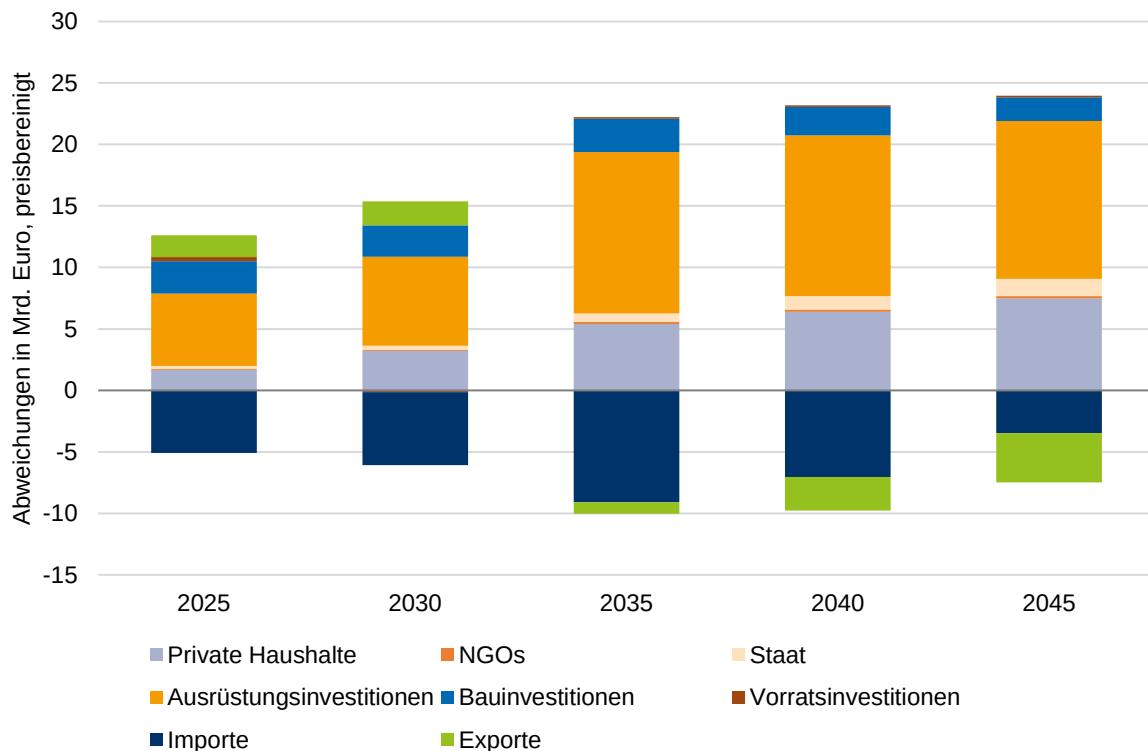
Aspekte tragen zu einer geringeren Nachfrage nach deutschen Exportgütern im Vergleich zum Referenz-Szenario bei. Auch spielt der gesamtwirtschaftliche Preiseffekt eine Rolle. Die durch die hohen Investitionen induzierten Preissteigerungen im Inland lassen Deutschland etwas an seiner internationalen Wettbewerbsfähigkeit einbüßen.

Über den gesamten Zeitraum dämpfen die höheren Importausgaben das BIP im Wasserstoff-Szenario ab. Da die Nachfrage nach Wasserstoff höher eingeschätzt wird als die inländischen Produktionsmöglichkeiten, wird der zusätzlich benötigte Wasserstoff importiert werden müssen (vgl. Kapitel 3.2). Dieser ist zu Beginn der Projektion teurer als die fossilen Energieträger, welche durch Wasserstoff ersetzt werden. Der Negativeffekt schwächt sich gegen Ende des Projektionszeitraum jedoch ab. Obwohl mehr Wasserstoff importiert werden muss, verringern sich die negativen Importeffekte. Dies ist auf einen sinkenden Wasserstoffpreis aufgrund von Effizienzgewinnen und Skaleneffekten zurückzuführen. Die fossilen Energieträger büßen ihren Kostenvorteil ein (vgl. Kapitel 3.3). Es ist somit Ausdruck eines Preiseffekts anstatt eines Mengeneffekts.

Der Grund für den höheren Importbedarf im Wasserstoff-Szenario - verglichen mit dem Referenz-Szenario - sind die hohen zusätzlichen Investitionen in erneuerbare Energien, in die inländische Wasserstoffproduktion und in die Infrastruktur. Vorleistungsgüter für die Bereitstellung dieser Investitionsgüter werden aus dem Ausland importiert. BOYSEN-HOGREFE u. a. (2018) zufolge werden die in der Investitionsnachfrage induzierten Importe auf rund 40 Prozent geschätzt. Insbesondere der Hochlauf der erneuerbaren Energien, die neben Windenergie auch zu einem Großteil auf Photovoltaik beruhen, wird durch Importe gedeckt werden müssen, da es hierzu so gut wie keine inländische Produktion gibt. Dasselbe gilt auch für die Konsumnachfrage, die ebenso zu großen Teilen – wie bspw. bei der Bekleidungsindustrie – durch Lieferungen aus dem Ausland befriedigt wird.

Durch die Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft wird sich das Preisniveau gesamtwirtschaftlich erhöhen und zusätzlichen Druck auf die preisbereinigten Werte des Bruttoinlandsproduktes und seinen Komponenten legen. Dieses Phänomen der „Greenflation“ (KOCH 2022; SALEH/GOLUCHOWICZ/BOVENSCHULTE 2022) zeigt sich in deutlich gestiegenen Stückkosten, insbesondere für Vorleistungen, aber auch für Abschreibungen und Löhne. Der größte Preistreiber ist dabei nicht der bis 2033 teurere Import von grünem Wasserstoff als Alternative zu fossilen Energieträgern, sondern vielmehr die Investitionen in die Herstellung, vor allem aber der Betrieb von Elektrolyseuren zu Gewinnung von grünem Wasserstoff. Auch die höheren Kosten für die Nutzung von Folgeprodukten aus grünem Wasserstoff für den Schiffs- und Luftverkehr (vgl. Kapitel 3.6) erhöhen den Preisdruck.

Abbildung 12: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (in Mrd. EUR)



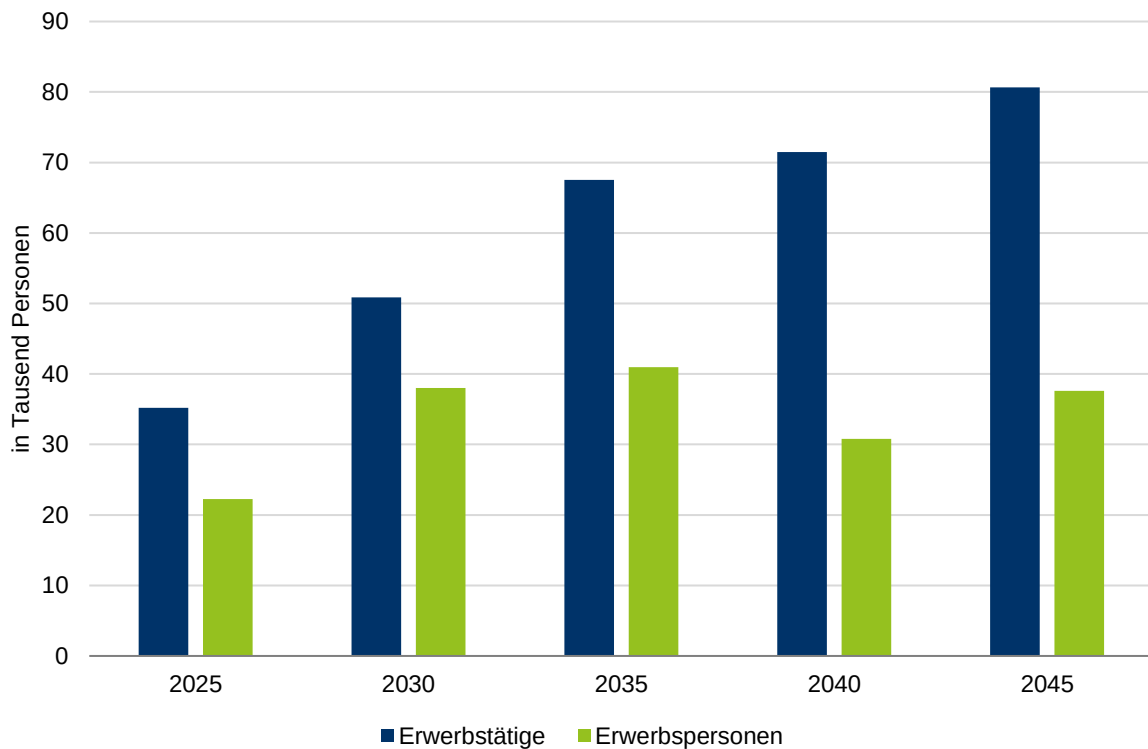
Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

4.2 Folgen für den Arbeitsmarkt

Auf den Arbeitsmarkt haben die getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durchweg positive Effekte. In Abbildung 13 sind die Abweichungen der Zahl an Erwerbstätigen und Erwerbspersonen zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario in Fünf-Jahres-Schritten bis 2045 dargestellt. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2022 bis 2045 wird es zu einem Anstieg der Erwerbstätigen um durchschnittlich 61.000 Personen gegenüber dem Referenz-Szenario kommen.

Auch die Zahl an Erwerbspersonen (Erwerbstätige und Erwerbslose) liegt bis 2045 über der im Referenz-Szenario (vgl. Abbildung 13). Zwischen 2022 und 2045 sind durchschnittlich 34.000 Personen mehr auf dem Arbeitsmarkt aktiv. Das heißt, dass durch die im Vergleich zum Referenz-Szenario positive Wirtschaftsentwicklung und die damit einhergehenden besseren Verdienstmöglichkeiten nicht nur mehr Personen beschäftigt sein, sondern auch mehr Personen ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt zur Verfügung stellen werden (MÖNNIG/ZIKA 2023). Der höhere Anstieg an Erwerbstätigen im Vergleich zu den Erwerbspersonen führt zu niedrigeren Erwerbslosenzahlen im Wasserstoff-Szenario als im Referenz-Szenario.

Abbildung 13: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen (in Tsd. Personen)



Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Der Blick auf die Erwerbstätigen getrennt nach Wirtschaftsbereichen zeigt ein detaillierteres Bild. In Abbildung 14 sind die zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Abweichungen zum Referenz-Szenario im Jahr 2030 und 2045 dargestellt. Die Branchen sind ferner nach ihrer direkten, indirekten oder induzierten Betroffenheit durch die Transformation unterteilt. Darunter befinden sich ausschließlich Wirtschaftsbereiche, deren Erwerbstätigenzahlen vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft profitieren werden. Verluste in einzelnen Wirtschaftsbereichen fallen sehr gering aus und sind nicht unter den zehn Wirtschaftsbereichen mit den größten absoluten Abweichungen vertreten.

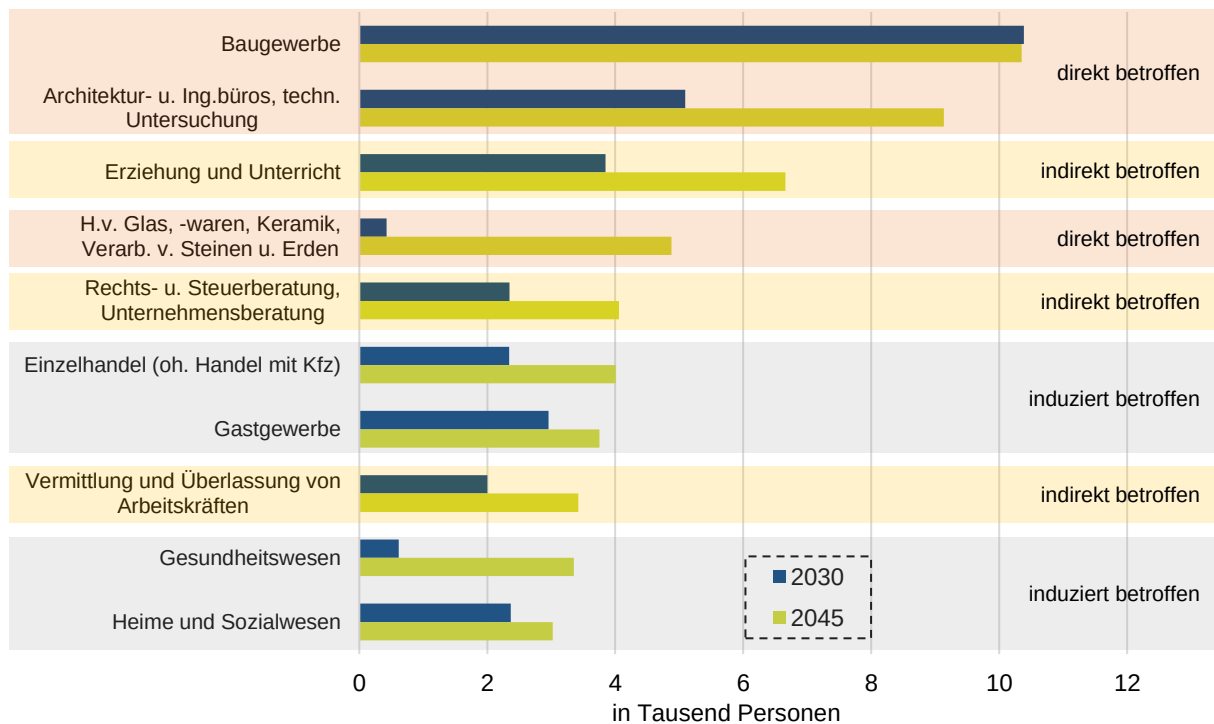
Die Effekte auf Branchenebenen können unterteilt werden in direkte, indirekte und induzierte Effekte. Direkte Effekte sind Effekte, die sich direkt aus den Annahmen ableiten lassen. Zum Beispiel wirkt sich die Annahme der höheren Exportmöglichkeiten der Elektrolyseure direkt auf die betreffenden Exportbranchen, Maschinenbau und Elektrotechnik, aus. Indirekte Effekte sind solche Effekte, die durch die direkten Effekte impliziert werden. So bewirkt der Bau eines Elektrolyseurs, der für den Export bestimmt ist, die Zulieferung von Metallerzeugnissen oder Stahlrohren. Induzierte Effekte wiederum sind solche Effekte, die sich aus den direkten und indirekten Effekten ergeben. Meistens wird damit der Konsummultiplikator angesprochen, weil durch die vorlaufenden Effekte implizites, höheres

verfügbares Einkommen wiederum ausgegeben wird, beispielsweise in Form von zusätzlichen Restaurantbesuchen oder Urlaube.

Absolut betrachtet werden vor allem das Baugewerbe und damit verbundene Architektur- und Ingenieurbüros einen höheren Arbeitskräftebedarf haben (vgl. Abbildung 14). Ursache dafür sind die zusätzlichen Bauinvestitionen in die Wasserstoffinfrastruktur und der zusätzliche Ausbau der erneuerbaren Energien. Der Anstieg im Bereich Erziehung und Unterricht ist unter anderem auf Weiterbildungsbedarfe zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zurückzuführen. Der energieintensive Wirtschaftsbereich Herstellung von Glas, -waren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden kann vom zunehmenden Kostenvorteil des Energieträgers Wasserstoff profitieren. Darüber hinaus wirken auch indirekte und induzierte Effekte. Positive indirekte Effekte entstehen beispielsweise für Erwerbstätige, die Beratungsdienstleistungen für diverse andere Wirtschaftsbereiche erbringen. Die zusätzlichen privaten Konsumausgaben spiegeln sich in Form von induzierten Effekten in den höheren Arbeitskräftebedarfen des Einzelhandels, des Gastgewerbes und im Gesundheitsbereich wider.

Zu den Wirtschaftsbereichen, in denen die Erwerbstätigenzahlen 2045 am stärksten negativ betroffen sind, zählen die Wirtschaftsbereiche Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Kfz-Handel und Sonstiger Fahrzeugbau. Die negativen Effekte können jedoch als gering bewertet werden. Die negativen Auswirkungen auf die Fahrzeugbaubranche sind Folgen von gestiegenen Transportkosten im Schwerlasttransport. Der Kfz-Handel ist von dieser Entwicklung unmittelbar betroffen.

Abbildung 14: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045



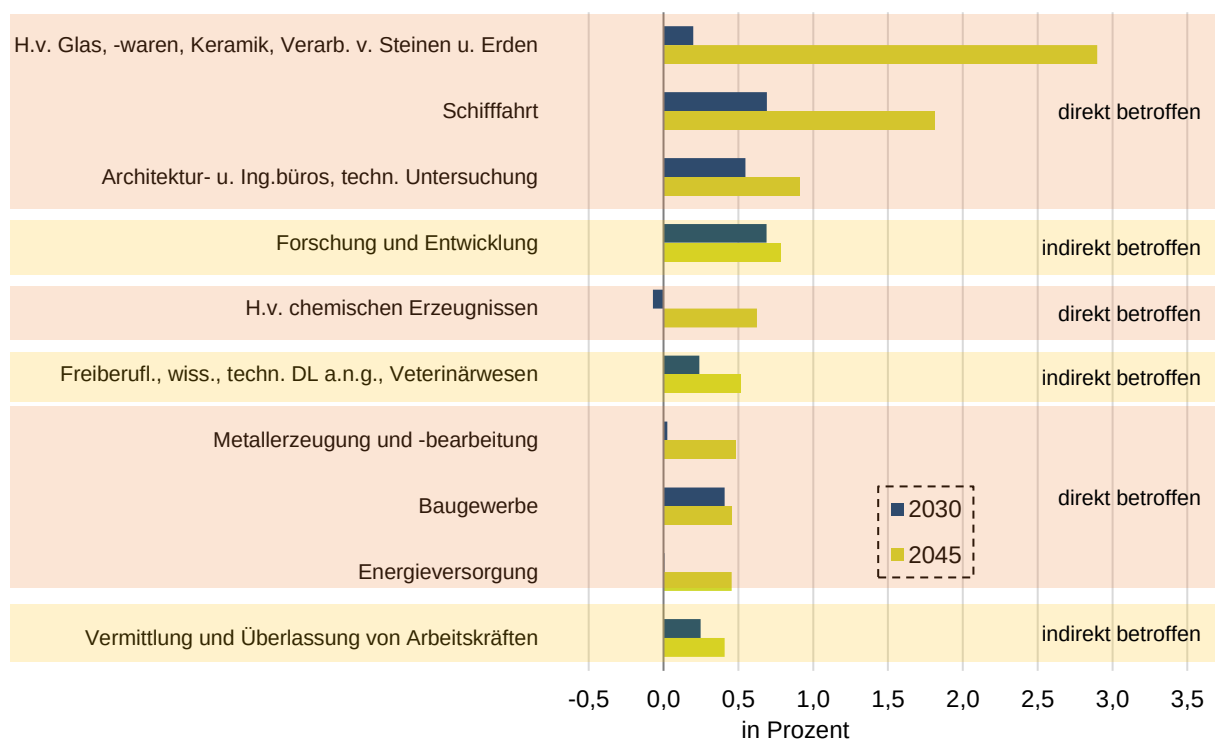
Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Analog zu Abbildung 14 stellt Abbildung 15 die Wirtschaftsbereiche mit den zehn größten relativen Abweichungen bei den Erwerbstätigen im Vergleich zum Referenz-Szenario im Jahr 2030 und 2045 dar. Die Abweichungen werden hier ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen eines Wirtschaftsbereichs im Referenz-Szenario gesetzt.

Aus relativer Sicht kommt es in Abbildung 15 zu Verschiebungen in der Rangordnung der Wirtschaftsbereiche. Zudem sind in der relativen Betrachtung nur noch solche Branchen unter den Top-Zehn der am meisten betroffenen Branchen, die entweder direkt oder indirekt von der Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft betroffen sind. So ist die größte relative Abweichung 2045 bei Erwerbstätigen in der Herstellung von Glas, -waren, Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden zu beobachten. Dort reduziert sich die Beschäftigung durch den zunehmenden Kostenvorteil von Wasserstoff weniger stark als im Referenz-Szenario. Die Zahl der Erwerbstätigen dieses Wirtschaftsbereichs liegt 2045 im Vergleich zum Referenz-Szenario um rund 2,9 Prozent höher. Der Wirtschaftsbereich wird in der langen Frist durch die Nutzung alternativer Energieträger wettbewerbsfähiger bleiben als ohne Umstellung und dem Beibehalt fossiler Energieträger. Dies gilt auch für andere energieintensive Industrien wie die Herstellung von chemischen Erzeugnissen oder die Metallerzeugung und -bearbeitung.

Bei den positiven Effekten auf die Zahl der Erwerbstätigen rücken auch weitere Bereiche in den Vordergrund. So ist die zweitstärkste relative Abweichung in der Schifffahrt zu verorten. Hier reduziert sich die Beschäftigung durch den Transport von Wasserstoff und anderen Gütern per Schiff weniger stark als im Referenz-Szenario. Die höhere Beschäftigung im Bereich Forschung und Entwicklung ist auf den anhaltenden und verstärkten Forschungsbedarf im Bereich der Wasserstofftechnologien und -anwendungen zurückzuführen. Bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, fällt auf, dass die Abweichung zum Referenz-Szenario im Jahr 2030 noch negativ ausfällt und 2045 ins positive gekehrt ist. Hintergrund ist, dass Wasserstoff gegen Ende des Projektionszeitraums günstiger wird als die fossilen Energieträger und der Wirtschaftszweig dadurch in der langen Frist durch die Nutzung alternativer Energieträger wettbewerbsfähiger bleibt als ohne Umstellung und dem Beibehalt fossiler Energieträger.

Abbildung 15: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045

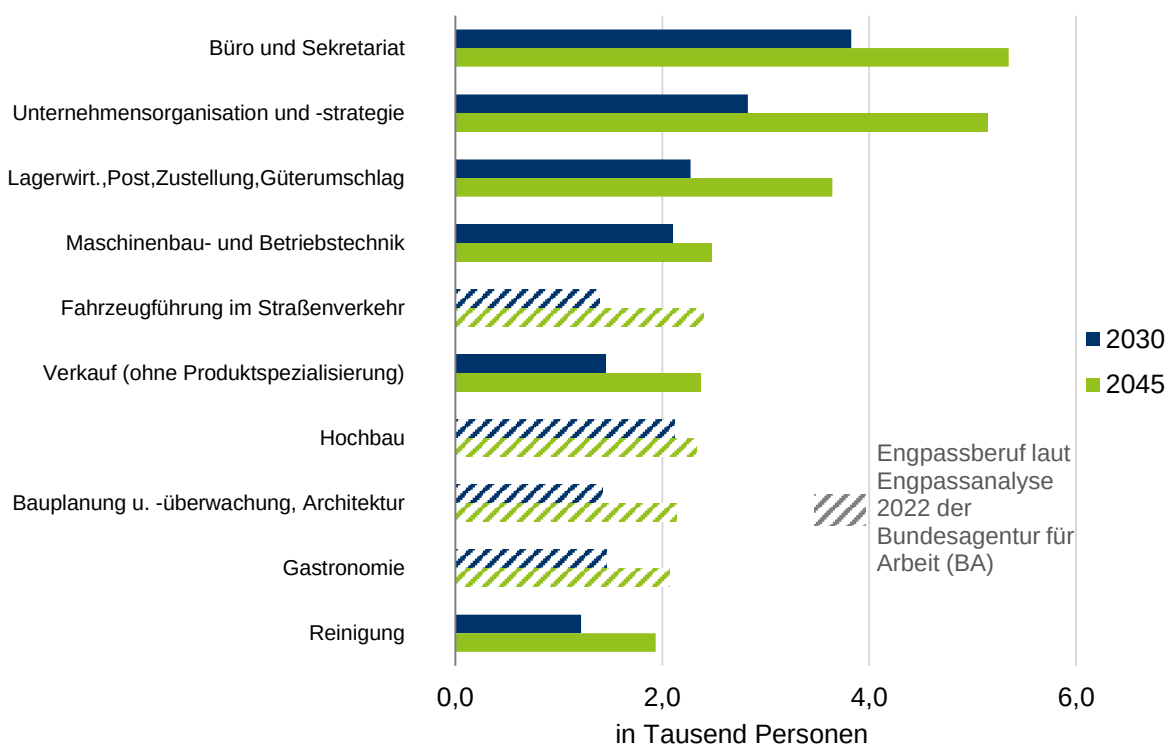


Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Für eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios auf die Berufsstruktur zeigt Abbildung 16 die zehn Berufsgruppen (3-Steller der KldB 2010) mit den größten absoluten Abweichungen zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario im Jahr 2030 und 2045. Anders als für die Betrachtung der Wirtschaftsbereiche ist aufgrund des Branchen-Beruf-Mixes eine einfache Zuordnung der Berufe in direkt, indirekt und induziert betroffene Berufe kaum möglich.

Bei den beiden Berufsgruppen mit den größten Abweichungen an Erwerbstätigen handelt es sich um Büro und Sekretariat und Unternehmensorganisation und -strategie. Die höheren Erwerbstätigenzahlen kommen dadurch zustande, dass diese Berufsgruppen in vielen Wirtschaftsbereichen und in verhältnismäßig hoher Anzahl vertreten sind. Dennoch sind unter den Top-Zehn auch Berufe, welche die Beobachtungen bei den Wirtschaftszweigen widerspiegeln. So werden vermehrt Erwerbstätige in den Berufsgruppen Maschinenbau- und Betriebstechnik, Hochbau sowie Bauplanung und -überwachung, Architektur nachgefragt und eingestellt werden. Für die meisten dieser Berufe besteht bereits heute ein Engpass auf dem Arbeitsmarkt (schraffierte Balken). Auf der Ebene der Berufe sind die negativen Effekte so gering, dass sie an dieser Stelle nicht ausgewiesen werden.

Abbildung 16: Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045



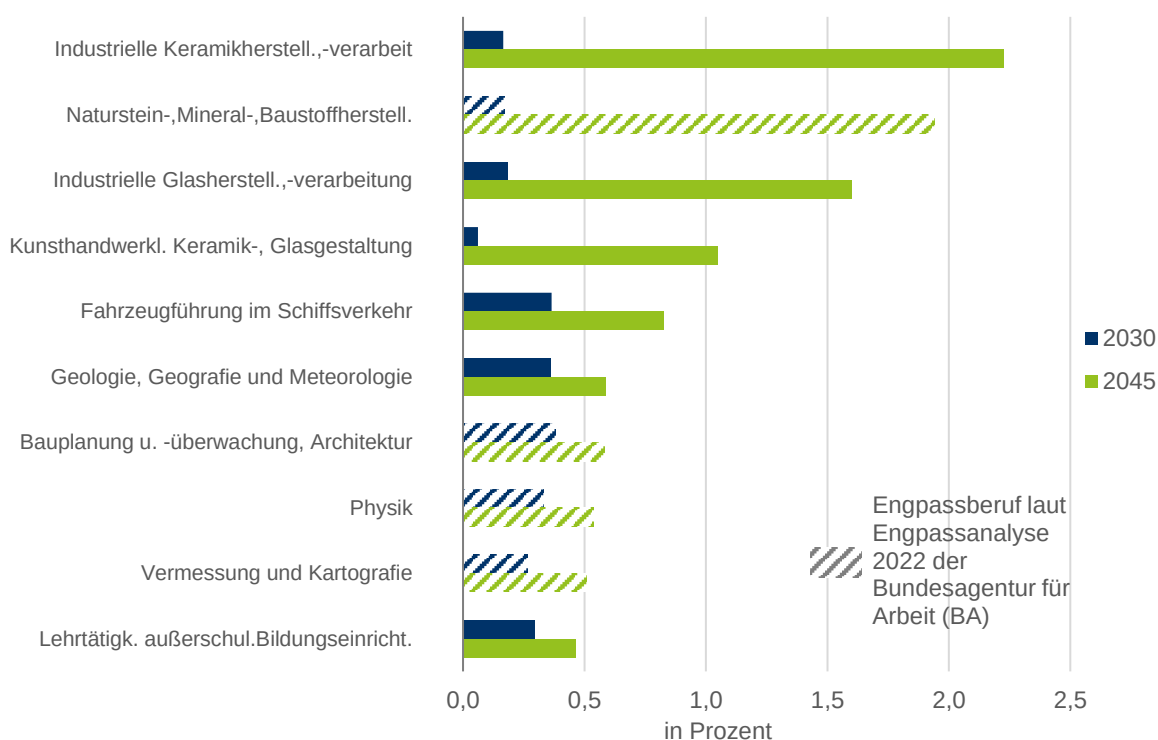
Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle und BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT (2022)

Analog zu Abbildung 16 stellt Abbildung 17 die Berufsgruppen mit den zehn größten relativen Abweichungen bei den Erwerbstätigen im Vergleich zum Referenz-Szenario im Jahr 2030 und 2045 dar. Insgesamt spiegelt sich hier die Entwicklung der Wirtschaftszweige wider. Auch bei der relativen Betrachtung der Berufsgruppen deuten die größten prozentualen Abweichungen ausschließlich in die positive Richtung. Die negativen Effekte für die einzelnen Berufsgruppen sind so gering, dass sie nicht ausgewiesen werden.

Die Schraffierung der Balken in Abbildung 16 und Abbildung 17 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 (3-Steller der KldB 2010) 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). Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen, dass in einzelnen dargestellten Berufsgruppen mit höheren Erwerbstätigenzahlen schon heute ein Engpass besteht.

Abbildung 17: Zehn Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045

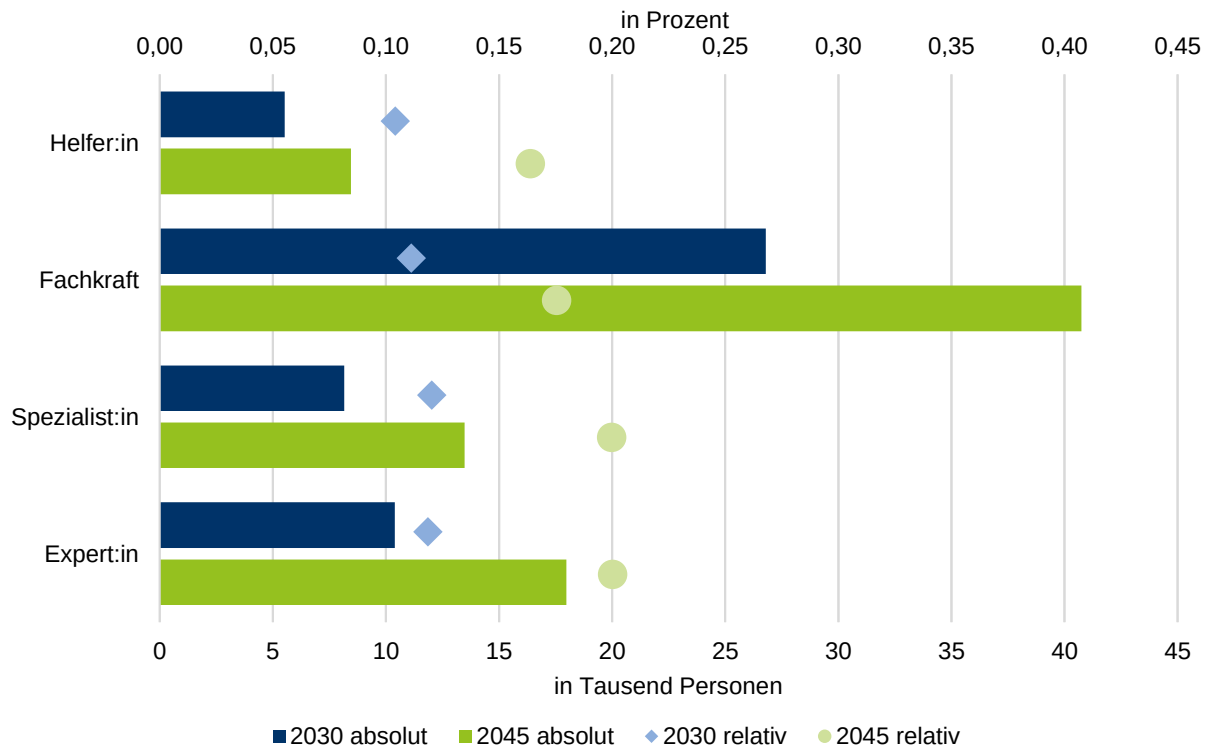


Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle und BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT (2022)

Abbildung 18 stellt die Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen zum Referenz-Szenario im Jahr 2030 und 2045 getrennt nach Anforderungsniveau sowohl absolut als auch relativ dar. Sie zeigt, dass der Bedarf an Erwerbstätigen im Wasserstoff-Szenario im Jahr 2045 in allen vier Anforderungsniveaus höher liegt als im Referenz-Szenario. Am stärksten nimmt der Bedarf mit fast 41.000 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, insbesondere in der langen Frist. In absoluten Zahlen verändert sich der Bedarf an Helfer:innen gegenüber dem Referenz-Szenario vergleichsweise gering. Es zeigt sich, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft

mit einer Tendenz zu höheren Ansprüchen an die ausgeübten Tätigkeiten der Beschäftigten einhergeht, aber dennoch alle Anforderungsniveaus davon profitieren können.

Abbildung 18: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 und 2045 (in Tausend Personen und in Prozent)

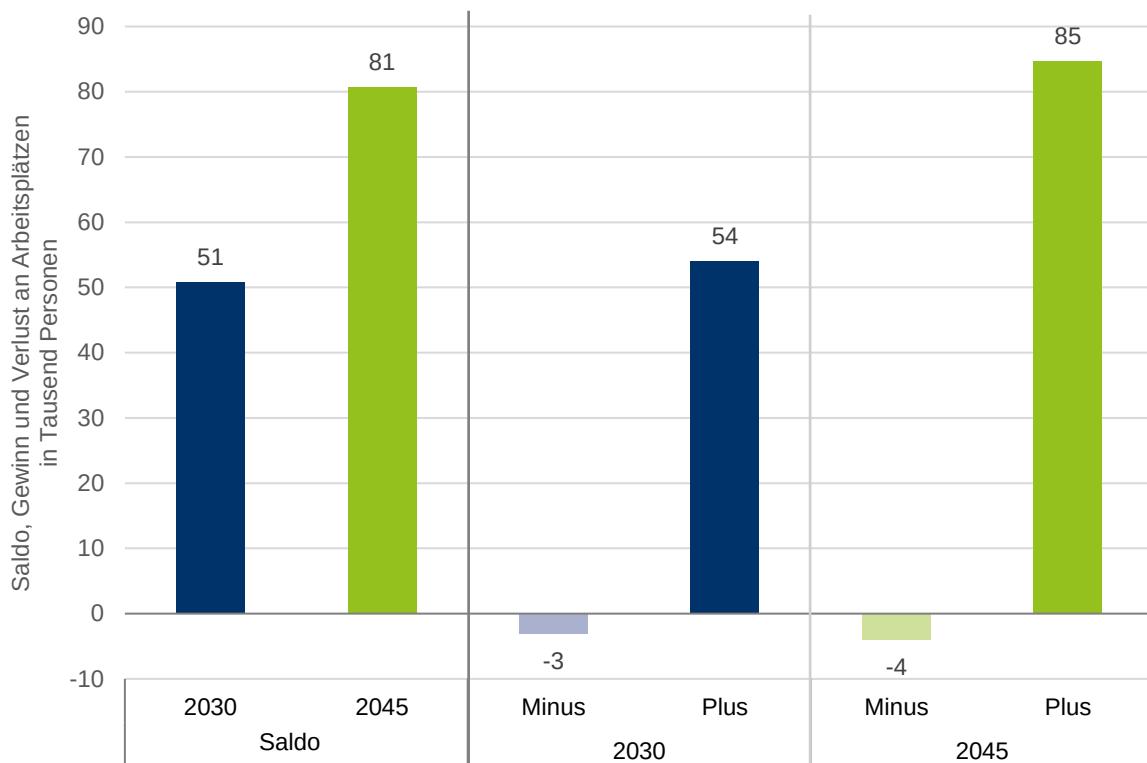


Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Abbildung 19 veranschaulicht die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze nach Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombinationen

(63 Wirtschaftsbereiche x 144 Berufsgruppen = 9.072 Kombinationen) im Vergleich zur Basisprojektion. Im Jahr 2045 werden im Wasserstoff-Szenario 85.000 neue Arbeitsplätze vorhanden sein, die es im Referenz-Szenario nicht gibt. Umgekehrt gibt es im Referenz-Szenario 4.000 Arbeitsplätze, die im Wasserstoff-Szenario nicht mehr vorhanden sind. In Summe werden im Wasserstoff-Szenario damit rund 81.000 Arbeitsplätze mehr vorhanden sein als im Referenz-Szenario. 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 19 den Strukturwandel auf dem Arbeitsmarkt im Jahr 2030 und 2045 auf rund 89.000 Arbeitsplätze, die entweder auf- oder abgebaut werden und damit einem Wandel unterliegen.

Abbildung 19: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2030 und 2045 (in Tsd. Personen)



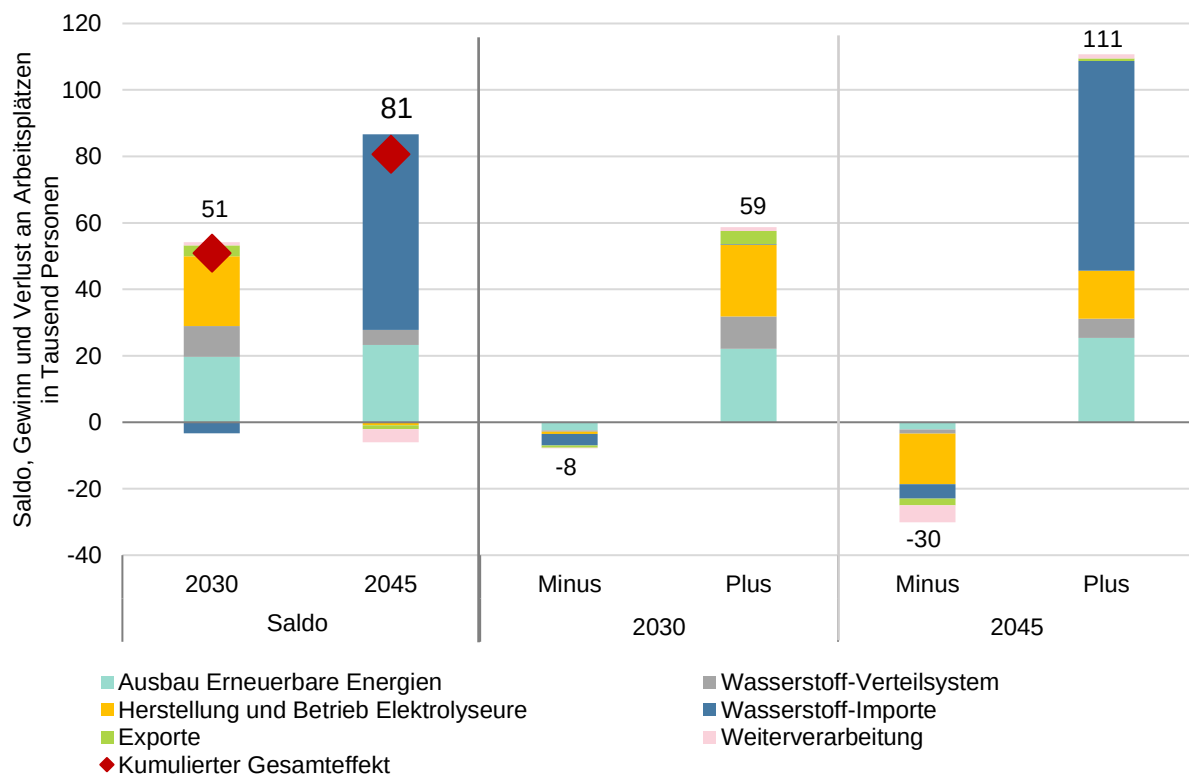
Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Im Gegensatz zur konsolidierten Betrachtung zeigt Abbildung 20 den Arbeitsplatzumschlag, nach den verschiedenen Annahmen (vgl. Kapitel 3) und thematisch gebündelt in 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, da es sich um unterschiedliche Arbeitsplätze handelt. Es kann in einer Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination also gleichzeitig zu einem Arbeitsplatzaufbau und -abbau kommen. Der Saldoeffekt für die Jahre 2030 und 2045 ist auf der linken Seite in Abbildung 20 dargestellt und bleibt im Vergleich zu Abbildung 13 und Abbildung 19 entsprechend unverändert. Die rechte Seite zeigt hingegen den kumulierten Arbeitsplatzaufbau und -abbau in den beiden Jahren nach Teilszenarien.

Es zeigt sich, dass der größte Arbeitsplatzaufbau im Jahr 2030 vom Ausbau der erneuerbaren Energien sowie der Herstellung und dem Betrieb von Elektrolyseuren ausgeht. Auch im Jahr 2045 werden weiterhin Arbeitsplätze durch den Ausbau der erneuerbaren Energien aufgebaut. Der größte Arbeitsplatzaufbau entsteht langfristig jedoch dadurch, dass niedrigerer Ausgaben für Energieimporte getätigt werden müssen. Auch durch die Herstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren entstehen neue Arbeitsplätze. Es wird in

der langen Frist jedoch auch deutlich, dass dadurch im gleichen Zuge Arbeitsplätze wegfallen. Es kommt also zu Verschiebungen bei den Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombinationen, die für bestimmte Kombinationen positiv und für andere negativ ausfallen können. 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 19. Der Arbeitsplatz-Umschlag beläuft sich in der Aufschlüsselung nach Teilszenarien für das Jahr 2030 somit auf rund 67.000 Arbeitsplätze und für das Jahr 2045 auf rund 141.000 Arbeitsplätze, die entweder auf- oder abgebaut werden.

Abbildung 20: Wirkungen der Teilszenarien auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2030 und 2045 (in Tsd. Personen)

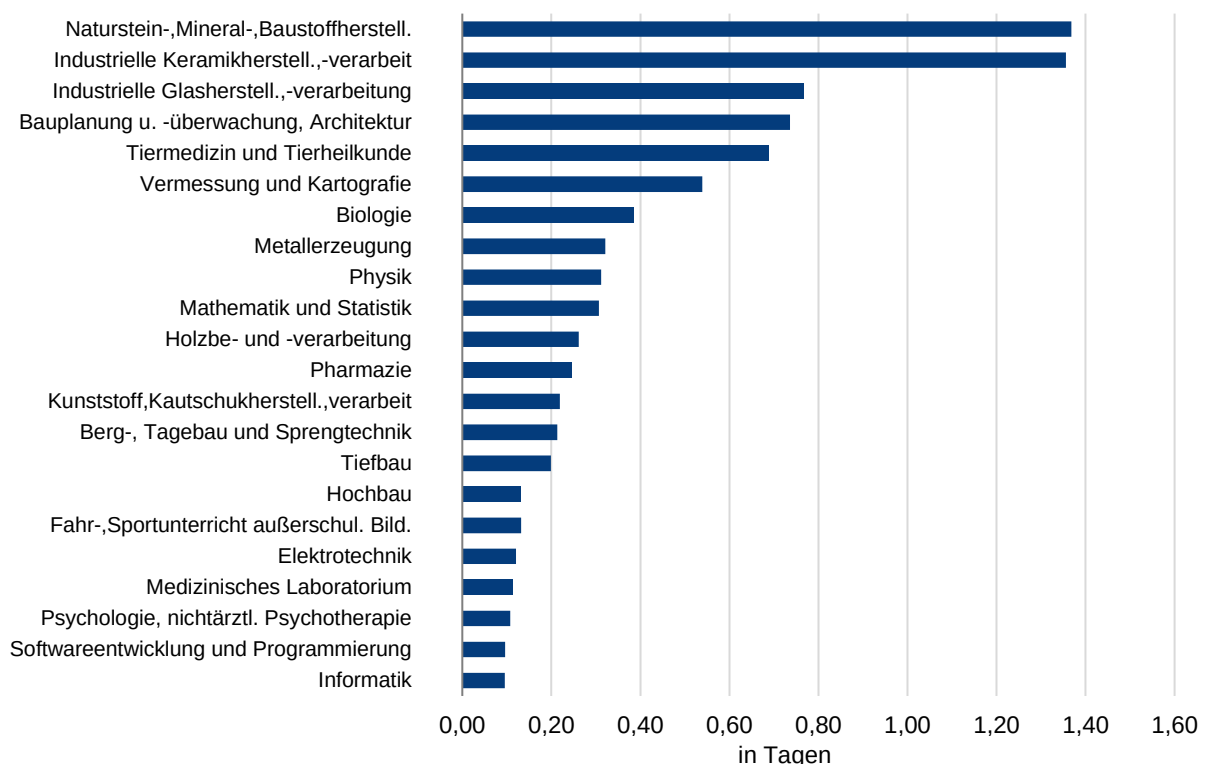


Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

Die Ergebnisse zeigen, dass es im Wasserstoff-Szenario zu verschiedenen Bewegungen auf dem Arbeitsmarkt kommt, die dazu führen, dass in Summe mehr Arbeitsplätze aufgebaut werden und mehr Personen erwerbstätig sind. Abbildung 16 und Abbildung 17 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 21 zeigt, wie sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf die adjustierten Suchdauern je Berufsgruppe im Jahr 2045 auswirkt. Berücksichtigt sind in der Abbildung jene Berufsgruppen, für die eine überdurchschnittlich lange Suchdauer von mehr als 79 Tagen im Jahr 2021 beobachtet wurde. Gemäß MAIER/STEEG/ZIKA (2023) verdreifacht sich das Risiko eines Suchabbruchs bei einer Erhöhung der Suchdauer um ein Prozent. Gesamtwirtschaftlich erhöht sich der Rekrutierungsdruck im Wasserstoff-Szenario nur leicht. Allerdings zeigt sich in einigen Berufsgruppen, dass deutlich länger als im gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt nach neuen Arbeitskräften gesucht werden muss. Dies gilt in der langen Frist insbesondere für die Berufsgruppen Herstellung von Natursteinen, Mineral- und Baustoffen und Industrielle Keramikherstellung und -verarbeitung. Für die Rekrutierung mehrerer Personen schlägt sich dies in einem merklich erhöhten Zeitaufwand für Betriebe nieder, zumal die Wahrscheinlichkeit, die Personalsuche erfolglos abubrechen, mit zunehmender Suchdauer steigt (MAIER/STEEG/ZIKA).

Abbildung 21: Wirkung auf die Suchdauer der Betriebe nach neuen Mitarbeitenden nach Berufsgruppe im Jahr 2045 (in Tagen), Auswahl mit überdurchschnittlicher Suchdauer in 2021



Quelle: QuBe-Projekt, 7. Welle

5 Fazit

Die Dekarbonisierung ist einer der drei großen Treiber für die Transformation der Wirtschaft und den Arbeitsmarkt. Die immer sichtbarer werdenden Folgen des Klimawandels, aber auch die Verwendung von Energierohstoffen als geopolitisches Instrument in Folge des

russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine, hat die Dringlichkeit verstärkt, sich von fossilen Brennstoffen zu lösen. Die Nutzung von grünem Wasserstoff als Energieträger, Speichermedium für erneuerbare Energien oder Antriebsmittel (Power-to-X) ist ein notwendiger Pfeiler auf dem Weg zu einer klimaneutralen Wirtschaft (RUNGE u. a. 2020; TIMMERBERG/KALTSCHMITT 2019; DENA 2018; AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019; IRENA 2020).

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft zieht umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Investitionen und Umstrukturierungen in der Industrie, dem Energiesystem und dem Transportwesen nach sich. Die vorliegenden Berechnungen zeigen unter den gesetzten Annahmen, dass die gesamtwirtschaftlichen Effekte auf das Wirtschaftswachstum und den Arbeitsmarkt dabei positiv ausfallen. Die meisten Beschäftigungseffekte sind auf den für die Produktion von grünem Wasserstoff notwendigen Ausbau erneuerbarer Energien sowie den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zurückzuführen. Diese traditionell beschäftigungsintensiven Bauinvestitionen treiben das Gros des Beschäftigungsaufbaus. Doch auch indirekte und induzierte Effekte werden sichtbar. Höhere Investitionstätigkeiten und die höhere inländische Wertschöpfung bringen mehr Menschen in Beschäftigung und verbessern die Verdienstmöglichkeiten. Dies wirkt sich positiv auf den privaten Konsum aus und fördert die Nachfrage in verschiedenen Wirtschaftsbereichen und Berufsgruppen.

Die im Zuge des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine stark gestiegenen Erdgaspreise kommen der Transformation in Richtung Wasserstoffwirtschaft dahingehend zugute, dass der Kostennachteil von grünem Wasserstoff gegenüber Erdgas in der Projektion deutlich gesunken ist. Die zuletzt beobachtbaren Preisentwicklungen führen dazu, dass Wasserstoff bis Mitte der 2030er Jahre einen Kostenvorteil gegenüber fossilem Erdgas erreichen könnte. Somit profitieren selbst energieintensive Industrien langfristig von der Umstellung auf den alternativen Energieträger Wasserstoff und müssen weniger Beschäftigung reduzieren als bei der Weiternutzung fossiler Energieträger. Insbesondere für die energieintensiven Industrien wie Chemie, Stahl oder Zement stellt grüner Wasserstoff eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung dar. Der Preis für die eingesetzten Energieträger sowie die Importmenge ist dabei ein ausschlaggebender Faktor für die Bestimmung der Wirkungen auf die Wirtschaftsleistung und Beschäftigung.

Zwei entscheidende Nadelöhre für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft sind der Ausbau erneuerbarer Energien zur inländischen Wasserstoffproduktion sowie ein ausreichendes Verteilnetz. Selbst wenn sich die energieintensiven Industrien bis 2030 nur zu einem Drittel dekarbonisieren, liegt der Bedarf an grünem Wasserstoff deutlich höher als das inländische Produktionspotential. Für eine vollständige Dekarbonisierung wäre der Bedarf entsprechend

höher (MÖNNIG u. a. 2022). Das Kapazitätsziel der Bundesregierung von gegenwärtig zehn GW bis 2030 wird aller Voraussicht nach deutlich unter den Bedarfserwartungen der Industrie liegen. Das heißt, Deutschland wird auch in einer Wasserstoffwirtschaft dauerhaft auf Energieimporte angewiesen sein, selbst dann, wenn die benötigten Energiemengen zu einer Reduktion der fossilen Energieimporte führen würden.

Da grüner Wasserstoff nicht nur in Deutschland, sondern auch in vielen anderen Ländern der Welt als Energieträger der Zukunft angesehen wird, verspricht die Transformation Exportpotentiale der dafür notwendigen Technologien für die deutsche Industrie und insbesondere für den deutschen Maschinenbau (ZENK u. a. 2023b).

Um langfristig höhere Wachstums- und Beschäftigungspotentiale realisieren zu können, stehen der Politik verschiedene Handlungsoptionen zur Verfügung. Der Transformationsprozess kann beispielsweise durch vereinfachte Genehmigungsverfahren, sichere Rechtsgrundlagen, und Investitionsanreize beschleunigt werden. Die anfänglichen negativen Effekte durch Wasserstoffimporte können durch gezielte staatliche Fördermaßnahmen vermieden und die Etablierung von Wasserstoff als Energieträger verstetigt werden. Dies könnte auch vorteilhaft für die Exportpotentiale sein, da sich Deutschland eine Expertise bei der Anwendung und dem Bau von Technologien in diesem Bereich aneignen könnte beziehungsweise das bereits bestehende Wissen weiter verstetigt. Jedoch besteht das Risiko, dass durch die hohen Investitionsbedarfe für die Herstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren sowie der Errichtung eines Verteilsystems zusätzliche Kosten entstehen und damit ein Anstieg des gesamtwirtschaftlichen Preisniveaus einhergeht – ein Phänomen, das auch „Greenflation“ (KOCH 2022; SALEH/GOLUCHOWICZ/BOVENSCHULTE 2022) genannt wird. Die höheren Betriebs- und Produktionskosten könnten für viele Industrien Anlass geben ihre energieintensive Produktion dahin zu verlagern, wo der Strom aus erneuerbaren Energien und damit auch die lokale Wasserstoffproduktion günstig ist. Internationale Standortverlagerungen aufgrund von „Renewables Pull“ (SAMADI u. a. 2021) könnten aber mit Maßnahmen wie des vom BMWK angedachten Förderkonzeptes zur Unterstützung der grünen Industriewende vermieden werden (HANDELSBLATT 2022). Grundsätzlich ist es denkbar, eine Unterstützung der betroffenen Industrien während des Übergangs in ein transformiertes Energiesystem bedingt auf Dekarbonisierungsanstrengungen fortzuführen und schrittweise zu reduzieren (WEBER 2023). Die Nutzung von Förderprogrammen kann die internationale Wettbewerbsfähigkeit durch eine günstigere Produktion verbessern. Notwendig wird dies solange negative Externalitäten fossiler Energieträger nicht vollständig bepreist werden und wegen des dadurch entstehenden Marktversagens einen Wettbewerbsvorteil beibehalten.

Zudem müssen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft geeignete Arbeitskräfte rekrutiert, aus- und weitergebildet werden. Die Analyse hat gezeigt, dass verhältnismäßig wenig Arbeitsplätze durch die Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verloren gehen und Umschulungsmaßnahmen somit nur in geringem Maße zur Deckung des höheren Arbeitskräftebedarfs beitragen können. Die Zuwanderung beziehungsweise das Verhindern der Abwanderung qualifizierter Arbeitskräfte ist deshalb eine mögliche Handlungsoption zur Sicherung des Arbeitskräfteangebots. Zusätzlich können Maßnahmen zur Reduktion von Abbruchquoten in den Bildungsstätten dazu beitragen, die Bedarfe des Arbeitsmarktes um die benötigten Qualifikationen zu erhöhen (KALINOWSKI/MAIER 2023). Ebenso können zusätzliche Anreize gesetzt werden, die es für Nichterwerbspersonen attraktiver machen, auf dem Arbeitsmarkt aktiv zu werden. Doch auch diejenigen, die bereits auf dem Arbeitsmarkt aktiv sind, sollten nicht aus dem Blick gelassen werden. In Berufen, die direkt am Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft mitwirken, können sich einzelne Anforderungen und Tätigkeiten ändern. Lebenslanges Lernen wird im Umfeld des Transformationsprozesses deshalb umso wichtiger, um den Anforderungen des Arbeitsmarktes gerecht zu werden.

6 Literaturverzeichnis

AG ENERGIEBILANZEN E. V. (Hrsg.): Bilanzen 1990 bis 2020 2022. URL: https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2020/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATRe4257049c177cf191052746afc46d0a2 (Stand: 09.01.2023)

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 (Stand: 19.11.2021)

AHLERT, G.; MÖNNIG, A.; DISTELKAMP, M.; MEYER, B.; LUTZ, C.; WOLTER, M. I.: Das IAB/INFORGE-Modell. Ein sektorales makroökonomisches Projektions- und Simulationsmodell zur Vorausschätzung des längerfristigen Arbeitskräftebedarfs. In: SCHNUR, P.; ZIKA, G. (Hrsg.): Das IAB/INFORGE-Modell. Nürnberg 2009, S. 15-175

AURORA ENERGY RESEARCH (Hrsg.): Shades of green (hydrogen) – part 2: in pursuit of 2 EUR/kg 2022. URL: <https://auroraer.com/insight/shades-of-green-hydrogen-part-2-in-pursuit-of-2-eur-kg/> (Stand: 09.01.2023)

BHAVNAGRI (Hrsg.); KOBAD (Hrsg.): Hydrogen Economy Outlook. Key Messages 2020. URL: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/414616/bnef-hydrogen-economy-outlook-2020.pdf> (Stand: 09.01.2023)

BMUV (Hrsg.): Beschlossene Anpassungen der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote). Infografik 2021. URL: <https://www.bmuv.de/MD1467> (Stand: 12.01.2023)

BMW I (Hrsg.): Die nationale Wasserstoffstrategie. Berlin 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (Stand: 19.11.2021)

BMW K (Hrsg.): Energiedaten. Internationaler Energiepreisvergleich für Industrie, Erdgas und Elektrizität 2023. URL: https://www.bmwk.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Energiedaten/energiedaten_Formular.html?resourceId=302010&input_=301930&pageLocale=de&templateQueryStringListen=&to=&from=&addSearchPathId=304726&addSearchPathId.GROUP=1&selectSort=&selectSort.GROUP=1#form-302010 (Stand: 10.01.2023)

BMW K (Hrsg.): Dritter Fortschrittsbericht Energiesicherheit. Berlin 2022a. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/20220720_dritter-fortschrittsbericht_energiesicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (Stand: 19.02.2022)

BMWK (Hrsg.): FAQ-Liste LNG-Terminal in Deutschland. Berlin 2022b. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/faq-liste-lng-terminal-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (Stand: 10.01.2023)

BMWK (Hrsg.): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Berlin 2022c. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2022/fortschrittsbericht-wasserstoffstrategie-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Stand: 06.12.2022)

BOYSEN-HOGREFE, Jens; FIEDLER, Salomon; GROLL, Dominik; KOOTHS, Stefan; STOLZENBURG, Ulrich: Konjunktur im Euroraum im Frühjahr 2018 - Wirtschaft im Euroraum überschreitet Normalauslastung. In: Kieler Konjunkturberichte (2018) 40

BREYER, Christian; FASIHI, Mahdi; MICHELI, Matteo; OYEWO, Ayobami Solomon; SCHMIDT, Patrick; WEINDORF, Werner: E-Kerosene for Commercial Aviation. From Green Hydrogen and CO₂ from Direct Air Capture – Volumes, Cost, Area Demand and Renewable Energy Competition in the United States and Europe from 2030 to 2050 2022. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/STUDY_E-Kerosene_for_Commercial_Aviation.pdf (Stand: 19.02.2023)

BÜLTEMEIER, H.; KEßLER, B.; HÜTTENRAUCH, J.; SPERLICH, J.; KÜHN, M.; SCHLICHTENMAYER, M.; WAGLER, T.; KRUCK, O.; SCHNEIDER, G.-S.; ABDEL HAQ, Claudia; BAYER, T.; FAATZ, K.; FABER, T.; FROMMHOLD, A.; MIERSCH, D.; SCHWABE, M.; STÄDTKE, L.; ZEMKE, J.: Wasserstoff speichern - soviel ist sicher. Transformationspfade für Gasspeicher 2022. URL: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201926-abschlussbericht-transformation-ugs.pdf> (Stand: 10.01.2023)

BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT (Hrsg.): Engpassanalyse 2022. URL: <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Fachkraeftebedarf/Engpassanalyse-Nav.html> (Stand: 02.03.2023)

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045 2021. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Stand: 26.07.2022)

COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) of 10.2.2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin 2023. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-02/C_2023_1087_1_EN_ACT_part1_v8.pdf

DENA (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 (Stand: 02.02.2022)

DNV (Hrsg.): Hydrogen Forecast to 2050. 2022. URL: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050.html> (Stand: 10.01.2023)

EIA (Hrsg.): PETROLEUM & OTHER LIQUIDS. Spot Prices 2023. URL: https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm (Stand: 19.02.2023)

FNB GAS (Hrsg.): Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032. Zwischenstand 2022. URL: https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2022/07/2022_07_06_NEP-Gas-2022-2032-Zwischenstand.pdf (Stand: 19.02.2023)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): H2 Nachfrage 2023. URL: <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de/open-view/27973/94ca1786486eb88bb6c5fc4a49b98fdd> (Stand: 09.01.2023)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): Cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and Alkaline water electrolysis systems 2021a. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf> (Stand: 19.02.2023)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): Szenario-Explorer 2021b. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/> (Stand: 10.01.2023)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): Verkehr Energiebedarf 2021c. URL: <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de/open-view/8237/e091497917a8aceaad8b2972faebf0e8> (Stand: 12.01.2023)

GARBARINO, S.; HOLLAND, J.: Quantitative and Qualitative Methods in Impact Evaluation and Measuring Results. In: Issue Paper (2009)

HANDELSBLATT (Hrsg.): Habeck bringt Klimaschutz-Verträge mit Industrie auf den Weg. Berlin 2022. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-habeck-bringt-klimaschutz-vertraege-mit-industrie-auf-den-weg/28841234.html> (Stand: 09.03.2023)

HOLST, Marius; ASCHBRENNER, Stefan; SMOLINKA, Tom; VOGLSTÄTTER, Christopher; GRIMM, Gunter: Cost Forecast for Low-Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems. Freiburg 2021. URL: <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/publications/aktuell/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis> (Stand: 09.01.2023)

HOLTEMÖLLER, Oliver; BRAUTZSCH, Hans-Ulrich; DRECHSEL, Katja; DRYGALLA, Andrej; GIESEN, Sebastian; HENNECKE, Peter; KIESEL, Konstantin; LOOSE, Brigitte; MEIER, Carsten-Patrick; ZEDDIES, Götz:

Ökonomische Wirksamkeit der Konjunktur stützenden finanzpolitischen Maßnahmen der Jahre 2008 und 2009. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums der Finanzen. In: IWH Online (2015) 5

IEA (Hrsg.): World Energy Outlook 2021 2021. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> (Stand: 10.01.2023)

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

IMF (Hrsg.): World Economic Outlook Recovery During A Pandemic 2021. URL: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2021/10/12/world-economic-outlook-october-2021> (Stand: 10.01.2023)

IRENA (Hrsg.): World Energy Transitions Outlook 2022. 2022. URL: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022> (Stand: 10.01.2023)

IRENA (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 (Stand: 19.11.2021)

KALINOWSKI, Michael; MAIER, Tobias: Verschenktes Fachkräftepotenzial. Die Abbruchquoten in den Ausbildungsstätten müssen verringert werden. In: BIBB Discussion Paper (2023)

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)

KALINOWSKI, Michael; ZIKA, Gerd; MÖNNIG, Anke: Auswirkungen der Digitalisierung der Wirtschaft und der Zuwanderung Geflüchteter auf die Entwicklung der Elektroberufe bis zum Jahr 2035. In: VOLLMER, Thomas; JASCHKE, Steffen; DREHER, Ralph (Hrsg.): Aktuelle Aufgaben für die gewerblich-technische Berufsbildung. Digitalisierung, Fachkräftesicherung, Lern- und Ausbildungskonzepte. Bielefeld 2018, S. 87-100

KOCH, Matthias 2022: Grüne Preisspirale. In: Frankfurter Rundschau, Ausgabe vom 09.01.2022. URL: <https://www.fr.de/hintergrund/gruene-preisspirale-91225253.html>. URL: <https://www.fr.de/hintergrund/gruene-preisspirale-91225253.html> (Stand: 12.01.2023)

KRAIL, Michael; SPETH, Daniel; GNANN, Till; WIETSCHEL, M.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr. Karlsruhe 2021. URL: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_Langbericht_Verkehr_final.pdf (Stand: 09.01.2023)

LEHR, Ulrike; BANNING, Maximilian; BLAZEJCZAK, Jürgen; EDLER, Dietmar; FLAUTE, Markus: Analyse der deutschen Exporte und Importe von Technologiegütern zur Nutzung erneuerbarer Energien und anderer Energietechnologiegüter. In: GWS Research Report (2020) 2020/02

LUX, B.; SENSFUß, F.; KIEFER, C.; BERNARTH, C.; DEAC, G.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Energieangebot. Karlsruhe 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3-Langbericht-Energieangebot-final.pdf> (Stand: 10.01.2023)

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 03/2022 (2022)

MAIER, Tobias; STEEG, Stefanie; ZIKA, Gerd: Die Modellierung adjustierter Suchdauern als Indikator für die Fachkräftesituation im Beruf. In: ZIKA, Gerd; HUMMEL, Markus; WOLTER, Marc Ingo; MAIER, Tobias (Hrsg.): Das QuBe-Projekt: Modelle, Module, Methoden. 1. Aufl. 2023, S. 176-209

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; GEORGE, Marius: Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW 2020. URL: <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf> (Stand: 27.10.2021)

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, Anke; RONSIEK, Linus; BECKER, Lisa; STEEG, Stefanie: Wasserstoffbasierte Transformation und die Auswirkungen auf den Importbedarf Deutschlands. In: BIBB Discussion Paper (2022)

MÖNNIG, Anke; SCHNEEMANN, Christian; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd; HELMRICH, Robert: Elektromobilität 2035: Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen. In: IAB Forschungsbericht 08/2018 (2018)

MÖNNIG, Anke; ZIKA, Gerd: Dynamische Erwerbsquoten. In: ZIKA, Gerd; HUMMEL, Markus; WOLTER, Marc Ingo; MAIER, Tobias (Hrsg.): Das QuBe-Projekt: Modelle, Module, Methoden. 1. Aufl. 2023, S. 88-93

PATONIA, Aliaksei; POUDINEH, Rahmatallah: Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolyzers? In: OIES Paper 47 (2022)

POSCH, Christoph: Energiewirtschaftliche Parameter konventioneller und innovativer Kraftwerkstechnologien. Diplomarbeit. Graz 2010. URL:
<https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a8cb3abf29&location=browse>

ROGERS, Everett M.: Diffusion of innovations. 3. Aufl. New York, NY 1983. URL:
<https://teddykw2.files.wordpress.com/2012/07/everett-m-rogers-diffusion-of-innovations.pdf>

RONSIK, Linus; MÖNNIG, Anke; SCHNEEMANN, Christian; ZENK, Johanna; SCHROER, Jan P.; SCHUR, Alexander C.: Potentielle Partnerländer für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. In: BIBB Discussion Paper (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 (Stand: 19.11.2021)

RWE (Hrsg.): RWE-Projekte am Standort Brunsbüttel 2023. URL: <https://www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/projektvorhaben/projektstandort-brunsbuettel> (Stand: 10.01.2023)

SALEH, Faten; GOLUCHOWICZ, Kerstin; BOVENSCHULTE, Marc: Die Auswirkungen von Digitalisierung und Dekarbonisierung auf Arbeitsinhalte und Arbeitsqualität. Berlin 2022. URL: https://www.denkfabrik-bmas.de/fileadmin/Downloads/Publikationen/Deep-Dive_Dekarbonisierung-und-Digitalisierung.pdf (Stand: 12.01.2023)

SAMADI, Sascha; LECHTENBÖHMER, Stefan; VIEBAHN, Peter; FISCHER, Andreas: Renewables Pull - Verlagerung industrieller Produktion aufgrund unterschiedlicher Kosten erneuerbarer Energien. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 71 (2021) 7-8, S. 10-13

SENS, Lucas; PIGUEL, Yannick; NEULING, Ulf; TIMMERBERG, Sebastian; WILBRAND, Karsten; KALTSCHMITT, Martin: Cost minimized hydrogen from solar and wind – Production and supply in the European catchment area. In: Energy Conversion and Management 265 (2022) 115742

SMOLINKA, Tom; WIEBE, Nikolai; STERCHELE, Philip; PALZER, Andreas; LEHNER, Franz; JANSEN, Malte; KIEMEL, Steffen; MIEHE, Robert; WAHREN, Sylvia; ZIMMERMANN, Fabian: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom

und Wärme. Berlin 2018. URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf (Stand: 28.04.2022)

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 (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 (Stand: 01.06.2022)

STUDTRUCKER, Maximilian; KALINOWSKI, Michael; SCHNEEMANN, Christian; SÖHNLEIN, Doris; ZIKA, Gerd: QuBe-Bevölkerungsprojektion für die Kreise und kreisfreien Städte Deutschlands. Nürnberg 2022. URL: <https://doku.iab.de/discussionpapers/2022/dp1922.pdf> (Stand: 21.02.2023)

SUNDMACHER, Torsten: Zukunft & Beschäftigung. Für einen modernen und effizienten Energieanlagenbau in Deutschland. Frankfurt 2015. URL: https://www.boeckler.de/pdf_fof/98809.pdf (Stand: 12.01.2023)

TES startet „Fast-Tracking“ seines Grünen Gas-Terminals, „Teil des Green Hydrogen Hub“ in Wilhelmshaven, um alternative und nachhaltige Energie nach Deutschland zu bringen 2022. URL: <https://tes-h2.com/de/tes-h2-invests-in-german-green-energy-hub/>

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

TUKKER, Arnold; DIETZENBACHER, Erik: Global Multiregional Input-Output Frameworks: An Introduction and Outlook. In: Economic Systems Research 25 (2013) 1, S. 1-19

UN (Hrsg.): The Paris Agreement | United Nations 2015. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement> (Stand: 26.07.2022)

VAN ROSSUM, Rik; JENS, Jaro; LA GUARDIA, Gemma; WANG, Anthony; KÜHNEN, Luis; OVERGAAG, Martijn: European Hydrogen Backbone. A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries 2022. URL: <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf> (Stand: 28.07.2022)

DE/Publikationen/Forschungsberichte/fb526-5-auswirkungen-klimaschutzmassnahmen-auf-arbeitsmarkt-und-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=1

ZIKA, Gerd; HUMMEL, Markus; WOLTER, Marc I.; MAIER, Tobias (Hrsg.): Das QuBe-Projekt: Modelle, Module, Methoden. 1. Aufl. 2023

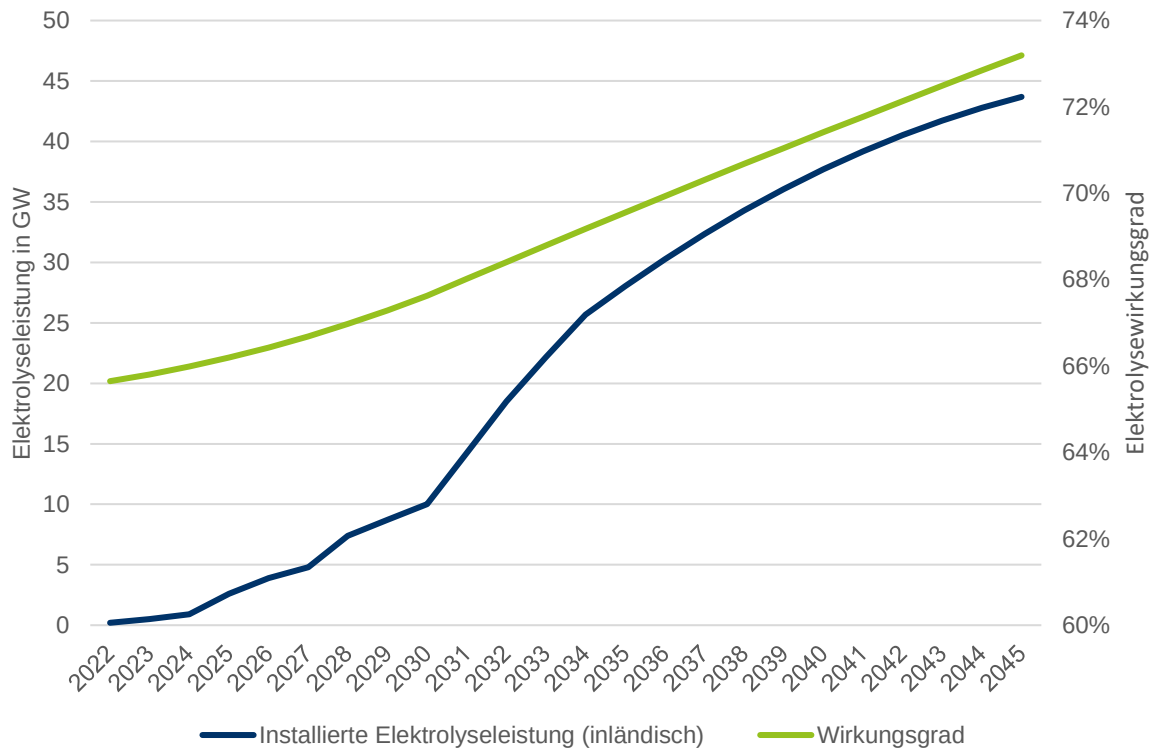
ZIKA, Gerd; SCHNEEMANN, Christian; WEBER, Enzo; ZENK, Johanna; KALINOWSKI, Michael; MAIER, Tobias; WOLTER, Marc I.: Die Folgen des Kriegs in der Ukraine und der Energiekrise für Wirtschaft und Arbeitsmarkt in Deutschland. In: IAB Forschungsbericht 11/2022 (2022b)

ZIKA, Gerd; WOLTER, Marc I.; MAIER, Tobias; KALINOWSKI, Michael; MÖNNIG, Anke; SCHNEEMANN, Christian; WINNIGE, Stefan: Folgen von beruflichen Passungsproblemen und Weiterbildungsbedarfe in einer digitalisierten Arbeitswelt. In: Forschungsbericht (2019)

7 Anhang

7.1 Wasserstoffbedarf

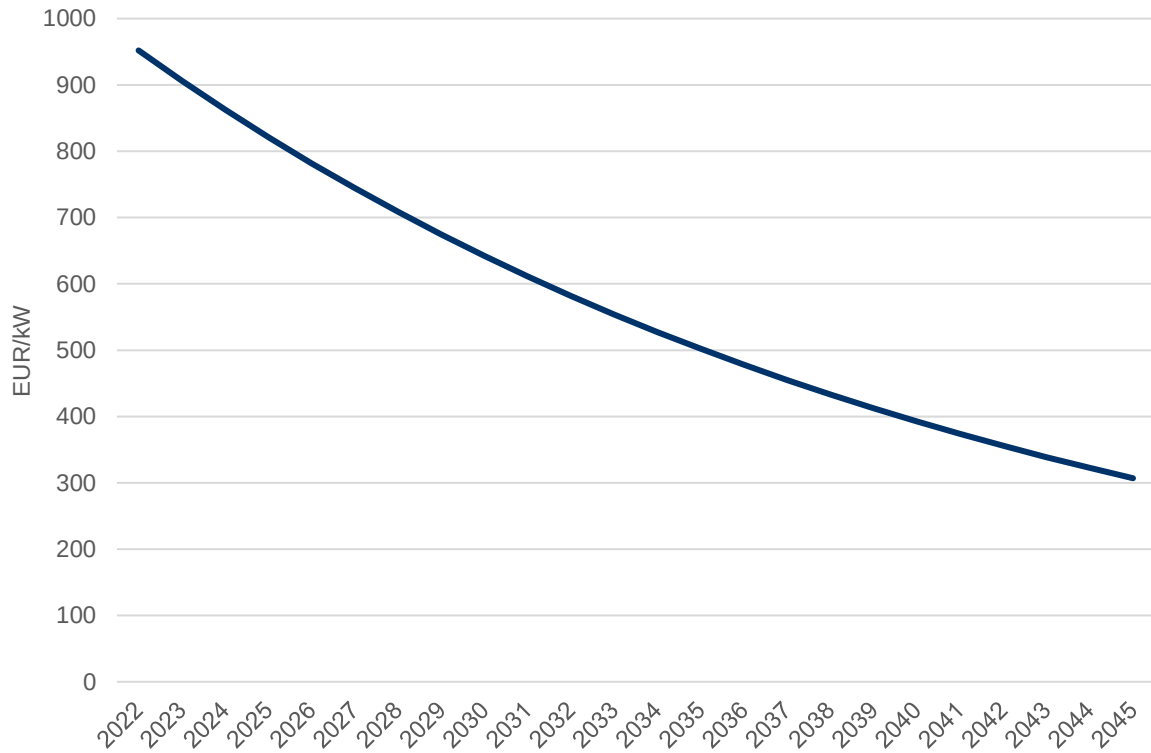
Abbildung 22: Elektrolysekapazität (in GW) und Wirkungsgrades (in Prozent)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von IEA (2019), SMOLINKA u. a. (2018) und BMWI (2020)

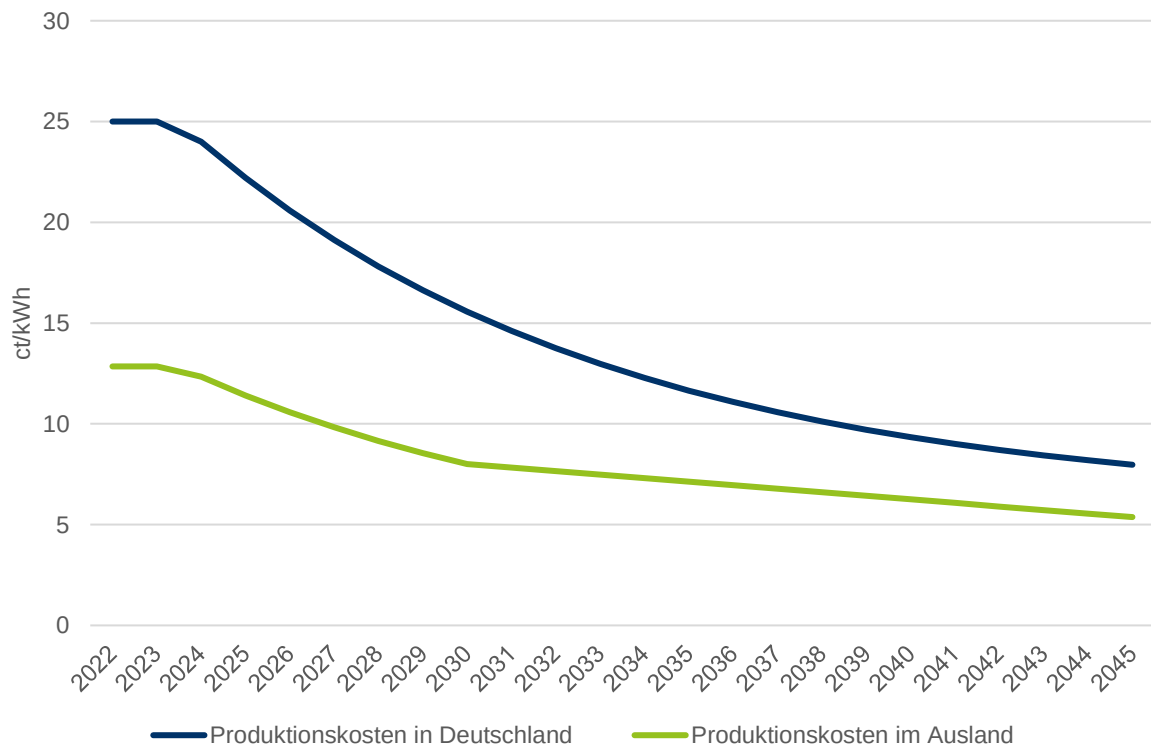
7.2 Wasserstoffkosten

Abbildung 23: Investitionskosten für Elektrolyseure (in EUR/kW)



Quelle: QuBe-Projekt

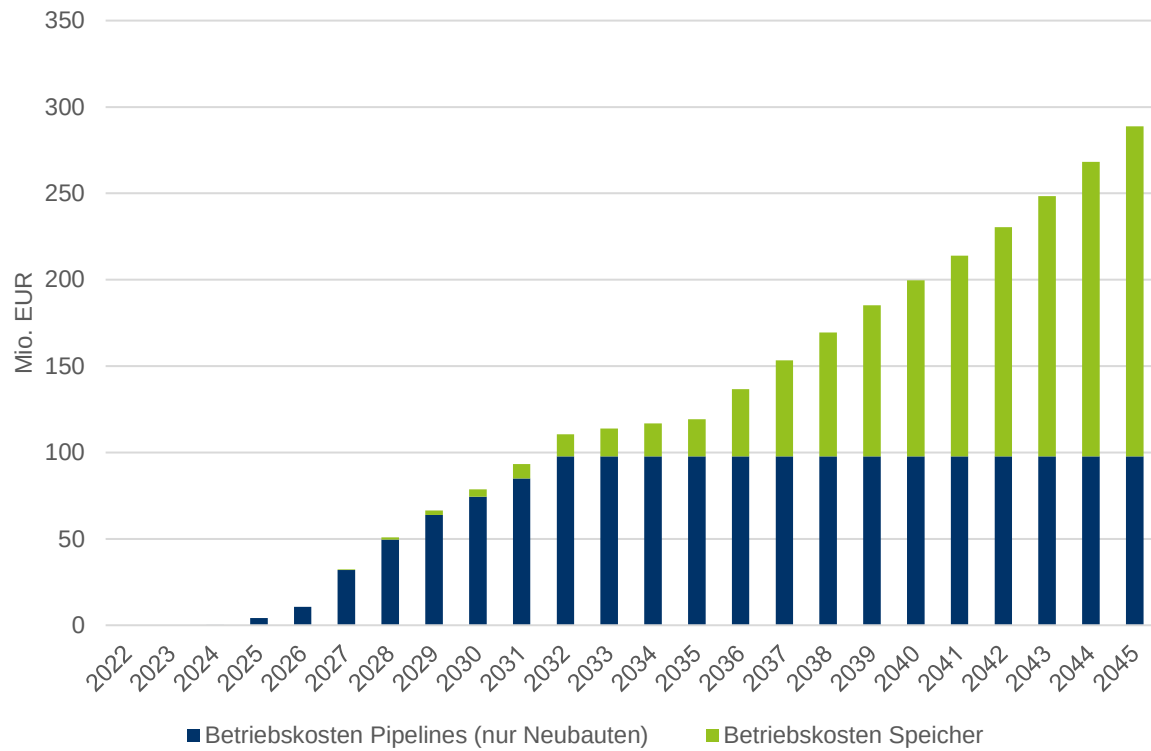
Abbildung 24: Wasserstoff-Produktionskosten (in ct/kWh)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von MERTEN u. a. (2020)

7.3 Wasserstoffinfrastruktur

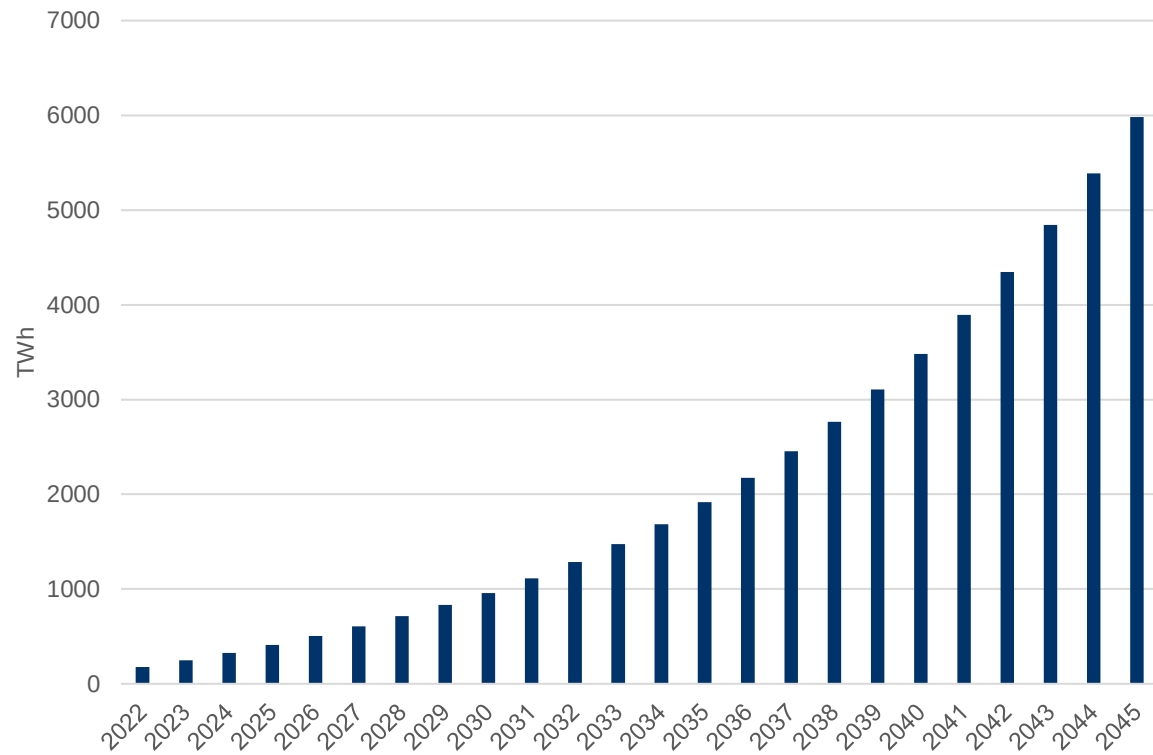
Abbildung 25: Betriebskosten Wasserstoffinfrastruktur (in Mio. EUR)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von VAN ROSSUM u. a. (2022) und SENS u. a. (2022)

7.4 Exportannahmen

Abbildung 26: Globaler Bedarf an grünem Wasserstoff (in TWh)



Quelle: QuBe-Projekt mit Daten von IRENA (2022), DNV (2022) und WORLD ENERGY COUNCIL (2021)