

Ronsiek, Linus et al.

Research Report

Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff. Szenario-v2.1

IAB-Forschungsbericht, No. 7/2024

Provided in Cooperation with:

Institute for Employment Research (IAB)

Suggested Citation: Ronsiek, Linus et al. (2024) : Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff. Szenario-v2.1, IAB-Forschungsbericht, No. 7/2024, Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB), Nürnberg, <https://doi.org/10.48720/IAB.FB.2407>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/298662>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>



INSTITUT FÜR ARBEITSMARKT- UND
BERUFSFORSCHUNG
Die Forschungseinrichtung der Bundesagentur für Arbeit

IAB-FORSCHUNGSBERICHT

Aktuelle Ergebnisse aus der Projektarbeit des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung

7|2024 Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff: Szenario-v2.1

Linus Ronsiek, Christian Schneemann, Anke Mönnig, David Samray, Jan Philipp Schroer, Alexander Christian Schur, Johanna Zenk

ISSN 2195-2655



Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff: Szenario-v2.1

Linus Ronsiek (GWS)
Christian Schneemann (IAB)
Anke Mönnig (GWS)
David Samray (BIBB)
Jan Philipp Schroer (BIBB)
Alexander Christian Schur (BIBB)
Johanna Zenk (IAB)



In der Reihe IAB-Forschungsberichte werden empirische Analysen und Projektberichte größeren Umfangs, vielfach mit stark daten- und methodenbezogenen Inhalten, publiziert.

The IAB Research Reports (IAB-Forschungsberichte) series publishes larger-scale empirical analyses and project reports, often with heavily data- and method-related content.

In aller Kürze

- In diesem Bericht wird anhand einer Szenarioanalyse beschrieben, wie sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf Wirtschaft und Arbeitsmarkt in Zukunft auswirken kann.
- Bis 2035 kommt es zu leicht positiven Wirkungen auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP). Aufgrund teurerer Importe und niedrigerer Exporte bleibt die Höhe des BIP ab 2036 im Wasserstoff-Szenario jedoch hinter dem Referenz-Szenario zurück. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2024 bis 2045 betrachtet, liegt das BIP im Durchschnitt dennoch um 4,1 Mrd. Euro höher (+0,1 Prozent jährlich).
- Die Zahl der Erwerbstätigen liegt im Wasserstoff-Szenario zwischen 2024 und 2045 um durchschnittlich rund 57.000 Personen höher als im Referenz-Szenario.
- In absoluten Zahlen hat insbesondere das Baugewerbe einen höheren Arbeitskräftebedarf, der mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur einhergeht. Mittelfristig kommt es zu einem niedrigeren Arbeitskräftebedarf bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, was sich langfristig jedoch wieder relativiert.
- Bei den Berufsgruppen zeigt sich unter anderem ein höherer Bedarf bei den administrativen Berufen sowie bei diversen Bauberufen. Dabei wird deutlich, dass es in vielen dieser Berufsgruppen bereits heute zu Engpässen kommt, was den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verzögern kann.
- Wie groß die Effekte des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft auf die gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung und auf den Arbeitsmarkt sind, hängt maßgeblich von den künftigen Kosten für Wasserstoff ab. Diese unterliegen einer gewissen Unsicherheit. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das BIP und die Erwerbstätigenzahlen umso höher ausfallen, je günstiger Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden kann. Im Szenario-Vergleich sind dabei die relativen Kosten von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zu fossilen Energieträgern und Grundstoffen ausschlaggebend.

Inhalt

In aller Kürze	2
Inhalt.....	3
Zusammenfassung	5
Summary.....	6
Danksagung.....	7
1 Einleitung	8
2 Modellierung und Annahmen.....	9
2.1 Das QuBe-Modellinstrumentarium	9
2.2 Szenariotechnik	10
2.3 Annahmen	12
2.3.1 Übersicht	12
2.3.2 Bedarf, Erzeugung und Import	13
2.3.3 Kosten.....	14
2.3.4 Infrastruktur	15
2.3.5 Technologieexporte	16
2.3.6 Synthetische Kraftstoffe	16
2.3.7 Weiterbildung.....	17
3 Ergebnisse.....	18
3.1 Gesamtwirtschaft.....	18
3.2 Arbeitsmarkt.....	19
3.2.1 Erwerbstätige und Erwerbspersonen.....	19
3.2.2 Arbeitsplatzaufbau und -abbau.....	20
3.2.3 Erwerbstätige nach Wirtschaftsbereichen	21
3.2.4 Erwerbstätige nach Berufsgruppen.....	24
3.2.5 Anforderungsniveaus	26
4 Sensitivitätsanalyse.....	27
5 Schlussfolgerungen	30
Literatur	33
Anhang.....	41
Abbildungsverzeichnis.....	50
Tabellenverzeichnis.....	50

Zusammenfassung

Wasserstoff kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten und gleichzeitig die Abhängigkeit von Lieferländern für fossile Energieträger und Grundstoffe reduzieren. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff“ beschreibt der vorliegende Forschungsbericht anhand einer Szenarioanalyse, wie sich der Aufbau einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff auf die Wirtschaftsleistung und den Arbeitsmarkt bis 2045 auswirken kann. Die Wertschöpfungskette umfasst dabei die Erzeugung von Wasserstoff, dessen Nutzung als Energieträger und Grundstoff, die Herstellung von und die Investitionen in Wasserstofftechnologien, den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, die Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu Wasserstoffderivaten wie Ammoniak oder Methanol und nicht zuletzt auch den Bildungsbereich zur Vermittlung einschlägiger beruflicher Kenntnisse.

Auf Basis von makroökonomischen Modellrechnungen werden ein Szenario ohne den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft (Referenz-Szenario) und ein Szenario, das Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft enthält (Alternativ-Szenario „Wasserstoff-Szenario-v2.1“) miteinander verglichen. Das Alternativ-Szenario basiert auf dem Wasserstoff-Szenario-v2.0, welches in einem BIBB-Discussion-Paper vorgestellt wurde. Die Annahmen aus diesem Szenario wurden aktualisiert und ergänzt, weshalb ein direkter Vergleich zwischen den beiden Alternativ-Szenarien nur bedingt möglich ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bis 2035 positiv auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt auswirkt. Dies ist vor allem auf zusätzliche Ausrüstungs- und Bauinvestitionen sowie höhere private Konsumausgaben zurückzuführen. Ab 2036 schwächen sich die positiven Impulse ab und es kommt insgesamt zu dämpfenden Wirkungen auf das BIP. Hauptverantwortlich dafür sind die dann höheren Importe. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2024 bis 2045 betrachtet, liegt das BIP im Durchschnitt dennoch um 4,1 Mrd. Euro höher als im Referenz-Szenario (+0,1 Prozent jährlich).

Auf dem Arbeitsmarkt zeigen sich durchwegs positive Effekte bei der Zahl der Erwerbstätigen. Sie liegt im Wasserstoff-Szenario bis 2045 um durchschnittlich rund 57.000 Personen höher als im Referenz-Szenario. In absoluten Zahlen hat vor allem das Baugewerbe einen höheren Arbeitskräftebedarf, der mit dem Ausbau erneuerbarer Energien für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur einhergeht. Positive Effekte gibt es auch in den Bereichen Architektur- und Ingenieurbüros, technische Untersuchung, Erziehung und Unterricht sowie im Maschinenbau. Mittelfristig kommt es zu einem niedrigeren Arbeitskräftebedarf bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, was sich langfristig jedoch wieder relativiert. Der Blick auf die Berufsgruppen zeigt unter anderem einen höheren Bedarf bei den administrativen Berufen sowie bei diversen Bauberufen. Dabei wird deutlich, dass es in vielen dieser Berufsgruppen bereits heute zu Engpässen kommt, was den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verzögern kann.

Zudem zeigt die Sensitivitätsanalyse, wie wichtig die Strompreise und die damit verbundenen Kosten von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten für die Entwicklung der Wirtschaft und der Erwerbstätigenzahlen sind. Kommt es zu 20 Prozent niedrigeren Strompreisen für die Elektrolyse im Ausland, liegen das inländische BIP bis 2045 durchschnittlich um 7,7 Mrd. Euro und die Erwerbstätigenzahlen um durchschnittlich rund 66.000 Personen höher als im Referenz-Szenario. Wären die Strompreise um 40 Prozent geringer, so lägen das inländische BIP um durchschnittlich 11,2 Mrd. Euro und die Erwerbstätigenzahlen um durchschnittlich rund 76.000 Personen höher. Das BIP und die Erwerbstätigenzahlen fallen also umso höher aus, je günstiger Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden kann. Im Szenario-Vergleich sind dabei die relativen Kosten von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zu fossilen Energieträgern und Grundstoffen ausschlaggebend. So kann es auch bei stärkeren Preissteigerungen von fossilen Energieträgern und Grundstoffen aus rein wirtschaftlichen Gründen vorteilhaft sein, auf alternative Energieträger und Grundstoffe wie Wasserstoff umzusteigen. Staatliche Maßnahmen können dabei unterstützen, eine marktwirtschaftliche Dynamik in der ökologischen Transformation anzustoßen.

Summary

Hydrogen has the potential to contribute to achieving the climate targets. At the same time, it can reduce dependencies on supplier countries for fossil fuels and fossil-based raw materials. As part of the project 'Labour demand and labour supply along the hydrogen value chain' funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), this research report uses a scenario analysis to describe the impacts of establishing a value chain for green hydrogen on economic output and the labour market in Germany by 2045. The hydrogen value chain includes the production of hydrogen, its use as an energy carrier and raw material, the production of and investment in hydrogen technologies, the development of a hydrogen infrastructure, the further processing of hydrogen into hydrogen derivatives such as ammonia or methanol and, last but not least, the education sector for the transfer of hydrogen skills.

Based on macroeconomic modelling, a scenario without the development of a hydrogen economy (baseline scenario) and a scenario containing assumptions on the development of a hydrogen economy (alternative scenario 'Hydrogen Scenario v2.1') are compared. The alternative scenario is based on the 'Hydrogen Scenario v2.0', which was previously published in a BIBB discussion paper. The assumptions of the precedent scenario were updated and extended.

The results show that the development of a hydrogen economy will have a positive impact on the price-adjusted gross domestic product by 2035. Additional gross fixed capital formation in construction, machinery and equipment as well as higher household final consumption expenditures boost GDP. From 2036 onwards, the positive stimulus weakens and an overall negative impact on GDP prevails. Higher imports are mainly responsible for this negative impact. Over the entire projection period from 2024 to 2045, GDP is nevertheless 4.1 billion euros higher on average (+0.1 percent per year).

The development of a hydrogen economy shows a positive impact on the labour market in terms of employment. Between 2024 and 2045 an average of around 57'000 additional persons are expected to be employed in comparison to the baseline scenario. In absolute terms, the construction sector in particular has a higher demand for labour which is related to the expansion of renewable energies for green hydrogen production and the development of an infrastructure for hydrogen. Positive impacts can also be observed on labour demand in architectural and engineering activities, technical testing and analysis, education as well as in manufacture of machinery and equipment. In the medium term, there will be a lower demand for labour in the manufacture of chemicals and chemical products although this will be relativised in the long term. Deviations by occupational groups show, inter alia, a higher demand in administrative professions as well as in various occupations related to the construction sector. There are already signs of shortages in many of these occupational groups today which can delay the development of a hydrogen economy.

The sensitivity analysis illustrates the importance of electricity prices and the entailed costs for hydrogen and hydrogen derivatives on the economic and labour market impact. With an assumption of 20 percent lower electricity prices for electrolysis abroad, German GDP will be on average 7.7 billion euros higher by 2045 and the number of employed persons will be on average around 66'000 higher than in the baseline scenario. With 40 percent lower electricity prices, German GDP will be on average 11.2 billion euros higher by 2045 and the number of employed persons by around 76'000. The lower the costs for hydrogen, the higher the outcome for GDP and employment figures. The crucial point in the scenario comparison is, however, the relative costs of hydrogen and hydrogen derivatives to fossil fuels and fossil-based raw materials. Hence, a shift towards alternative energy carriers and raw materials might be also economically beneficial in case of stronger price increases for fossil fuels and fossil-based raw materials. Government measures can contribute to initiate a market-based dynamic in the ecological transition.

Danksagung

Das Projektteam bedankt sich bei allen Experten und Expertinnen, die für ein mündliches oder schriftliches Interview zur Verfügung standen und dadurch zur Annahmensetzung beigetragen haben. Aus Datenschutzgründen wird von einer namentlichen und institutionellen Nennung abgesehen.

1 Einleitung

Um die Klimaziele zu erreichen und eine nachhaltige Energieversorgung sicherzustellen, muss das Energiesystem grundlegend umgestellt werden. Grüner Wasserstoff aus erneuerbaren Energien kann dabei einen wichtigen Beitrag leisten. Im Juni 2020 hat die Bundesregierung in der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS 2020) einen ersten Handlungsrahmen für die Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverarbeitung von Wasserstoff geschaffen (BMW, 2020). Im Koalitionsvertrag 2021-2025 wurden die Ziele für die Erzeugung von grünem Wasserstoff angehoben und die Absicht bekundet, Deutschland bis 2030 zu einem Leitmarkt für Wasserstofftechnologien zu entwickeln (SPD, Bündnis 90 / Die Grünen und FDP, 2021). Mit der Fortschreibung der Wasserstoffstrategie vom Juli 2023 (NWS 2023) wurden die höheren Ambitionen konkretisiert und neben der Klimaschutzwirkung auch die sicherheitspolitische Bedeutung von Wasserstoff zur Diversifizierung und Sicherung von Energieimporten hervorgehoben (BMW, 2023a).

Betrachtet durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) untersuchen das Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) und das Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) seit 2021 gemeinsam mit der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS), wie sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf den Arbeitsmarkt in Zukunft auswirken kann. Hierfür wurde zunächst eine Bestandsaufnahme des aktuellen Forschungsstands zu den Arbeitsmarktfolgen einer Wasserstoffwirtschaft erstellt (Steeg u. a., 2022). Im Anschluss wurde eine erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030 erstellt (Szenario-v1.0). Diese fielen im Vergleich zu einem Referenz-Szenario in Summe durchweg positiv aus (Zenk u. a., 2023a). An diese Analyse anknüpfend, wurde der Projektionszeitraum bis 2045 erweitert und zusätzliche Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft getroffen (Szenario-v2.0). Besonders geprägt wurde das Szenario durch die Energiepreissteigerungen im Zuge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine. Durch diese Preissteigerungen kam es in der Szenario-Rechnung bereits Mitte der 2030er Jahre zu einem Kostenvorteil von grünem Wasserstoff. Gemeinsam mit zusätzlichen Investitionstätigkeiten, führte der Preisvorteil zu positiven ökonomischen Impulsen und über den gesamten Projektionszeitraum zu einem höheren Beschäftigungsniveau als im Referenz-Szenario (Schur u. a., 2023). Der vorliegende Bericht stellt nun ein überarbeitetes Szenario dar (Szenario-v2.1). Die Annahmen aus dem vorherigen Szenario wurden aktualisiert und weitere wichtige Einflussfaktoren in die Szenario-Rechnung aufgenommen.

Die Lage auf den Energiemärkten hat sich seit Erstellung des vorhergehenden Szenarios-v2.0 deutlich entspannt. So ist der Großhandelspreis für Erdgas innerhalb eines Jahres von seinem Höchstwert mit 0,32 EUR/kWh Ende August 2022 auf 0,04 EUR/kWh Ende August 2023 gefallen (Bundesnetzagentur, 2024). Mit der Aktualisierung der Preisannahmen für fossile Energieträger sowie der Kostenannahmen für Wasserstoff und Wasserstoffderivate im vorliegenden Szenario-v2.1 büßt grüner Wasserstoff seine Kostenvorteile gegenüber fossilen Energieträgern und Rohstoffen ein, was sich merklich auf die Ergebnisse für Wertschöpfung und für den Arbeitsmarkt auswirkt. Auch die Differenzierung nach energetischer und stofflicher Nutzung sowie die Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten beim Import von Wasserstoff über

Wasserstoffderivate tragen zur höheren Kostendifferenz und zu langfristig negativen Wirkungen auf das Bruttoinlandsprodukt bei. Wasserstoffderivate, auch als Wasserstoff-Folgeprodukte bezeichnet, sind „auf grünem Wasserstoff basierende, gasförmige, oder flüssige Energieträger“ wie synthetisch hergestelltes Methan, Ammoniak, Methanol oder synthetische Kraftstoffe mit den gleichen Eigenschaften wie Benzin, Diesel oder Kerosin (BMBF, 2021). Eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse hinsichtlich der Wasserstoffimportkosten verdeutlicht, dass der künftige Preis von grünem Wasserstoff, relativ zum Preis der zu substituierenden fossilen Energieträger, eine zentrale Variable ist, wenn es um die wirtschaftlichen Implikationen von grünem Wasserstoff geht.

Soweit nicht anderweitig spezifiziert, bezieht sich der Wasserstoffbegriff im vorliegenden Bericht auf grünen Wasserstoff, der mittels Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird.

2 Modellierung und Annahmen

2.1 Das QuBe-Modellinstrumentarium

Die Analyse zu den Auswirkungen einer Wasserstoffwirtschaft auf den Arbeitsmarkt wird im Rahmen der **Qualifikations- und Berufsprojektionen** (QuBe-Projekt, www.qube-projekt.de) durchgeführt. Für die Projektionen werden verschiedene Modelle und eine Reihe von themenspezifischen Modulen eingesetzt. Im Kern des QuBe-Modellinstrumentariums steht das makroökonomische Simulationsmodell QINFORGE (**Q**ualification and **O**ccupation in the **I**Nterindustry **F**ORecasting **G**ermany). Die darin enthaltenen Module werden simultan gelöst und berücksichtigen sowohl Wirkungen als auch Rückwirkungen. Die übrigen eigenständigen Modelle werden hingegen in einer zeitlichen Reihenfolge gelöst.

Abbildung 1 gibt einen schematischen Überblick der sozioökonomischen Zusammenhänge im QuBe-Modellinstrumentarium der siebten Welle. Die Abbildung zeigt, dass die demografische Entwicklung (rot) ein maßgeblicher Treiber für die Arbeitsmarktentwicklung ist. Dabei stellt die QuBe-Bevölkerungsprojektion ein eigenständiges Kohorten-Komponenten-Modell dar. Ebenfalls als eigenständiges Modell baut die Bildungsgesamtrechnung (hellgrün) auf die Bevölkerungsprojektion auf. Sie quantifiziert das zukünftige Neuangebot aus dem Bildungssystem differenziert nach Qualifikationsniveau und Berufen. Das zukünftige Erwerbsverhalten wird statistisch einerseits sowohl durch das Geschlecht, Alter und Qualifikationsniveau beeinflusst, als auch dadurch, ob es sich um eine Person mit deutscher oder nichtdeutscher Staatsangehörigkeit handelt. Andererseits wird die Entscheidung über die Erwerbsbeteiligung oftmals von konjunkturellen und arbeitsmarktrelevanten Faktoren beeinflusst.

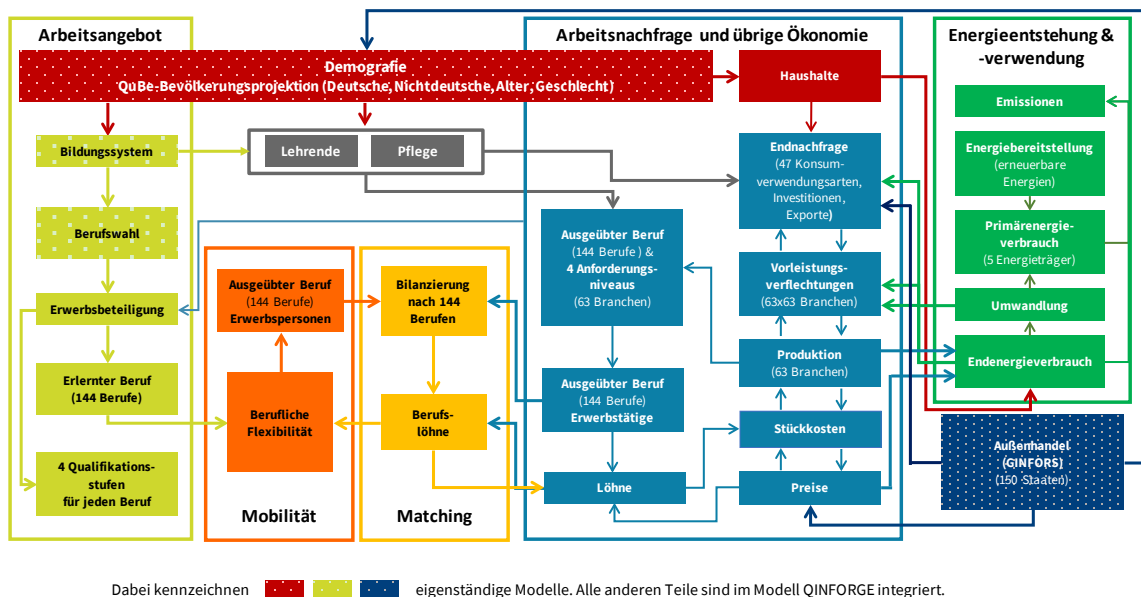
Entscheidet sich eine Person dafür, auf dem Arbeitsmarkt aktiv zu sein, so hat sie in der Regel eine formale Qualifikation und einen erlernten Beruf. Der ausgeübte Beruf kann sich jedoch vom erlernten Beruf unterscheiden. Die beruflichen Flexibilitätsmatrizen (orange) quantifizieren die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Person mit erlerntem Beruf einen anderen Beruf ausübt.

Die Zahl der benötigten Lehrenden und Pflegenden (grau) nehmen einen Sonderstatus ein, da erstere hauptsächlich von der Zahl der Kinder und Jugendlichen und letztere von der Zahl der zu Pflegenden abhängt.

Darüber hinaus wird die Arbeitskräftenachfrage beziehungsweise der Arbeitskräftebedarf weitgehend von der ökonomischen Entwicklung (blau) bestimmt. Die ökonomische Entwicklung wird in QINFORGE vom integrierten makroökonomischen Input-Output-Modell INFORGE ökonometrisch geschätzt. Es gliedert sich nach Wirtschaftsbereichen, Produktionsbereichen und Gütergruppen, modelliert diese separat bevor sie zu Aggregaten zusammengefasst werden („bottom-up“) und berücksichtigt dabei intersektorale Abhängigkeiten.

Da Arbeitsangebot und Arbeitsnachfrage nicht unabhängig voneinander projiziert werden können, wurde ein Matching-Modul (gelb) entwickelt. Es stellt die beiden Arbeitsmarktseiten gegenüber und bestimmt entsprechende Berufslöhne.

Abbildung 1: Struktur des QuBe-Modellinstrumentariums, 7. Welle



Quelle: Zika u.a. (2023).

In den letzten Jahren hat die Energiewende eine immer wichtiger werdende Rolle für Wirtschaft und Gesellschaft eingenommen. Für die siebte Welle der QuBe-Projektionen wurde deshalb ein eigenständiges Energie-Modul (dunkelgrün) in das Modellinstrumentarium mit aufgenommen.

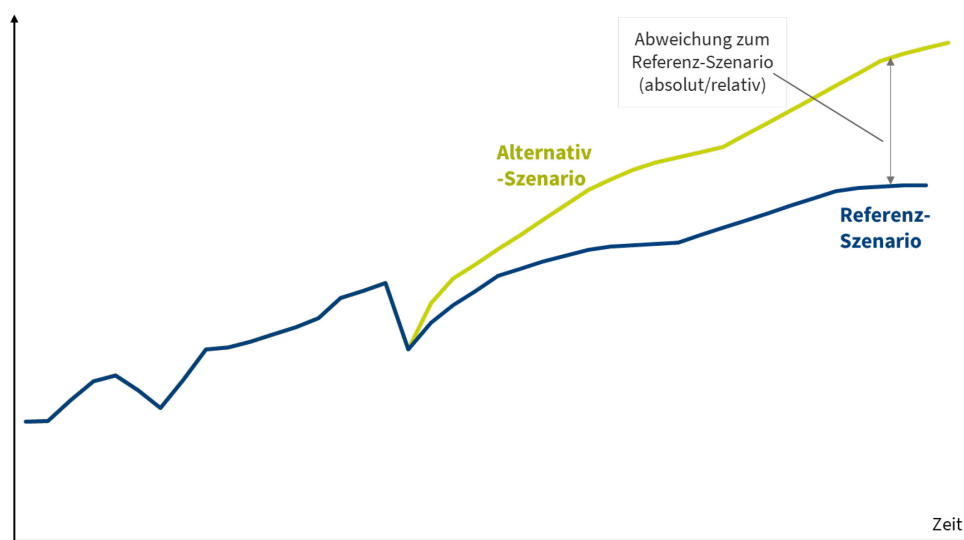
Um den, besonders für die deutsche Wirtschaft, wichtigen Außenhandel abzubilden, wurde mit GINFORS ein separates Welthandelsmodell (dunkelblau) durch die GWS entwickelt und dem QuBe-Modellsystem angeschlossen (Zika u. a., 2023).

2.2 Szenariotechnik

Um Auswirkungen unterschiedlicher Entwicklungspfade zu analysieren, wird die Szenariotechnik angewandt. Dabei wird ein Referenz-Szenario mit einem oder mehreren Alternativ-Szenarien

verglichen. Das Referenz-Szenario basiert auf Vergangenheitstrends, nachweisbaren Verhaltensweisen und absehbaren Entwicklungen, während im Alternativ-Szenario zusätzliche Annahmen für die Zukunft modelliert werden. Die Modellzusammenhänge bleiben in beiden Szenarien unverändert, sodass Abweichungen in den Ergebnissen ausschließlich auf die zusätzlich getroffenen Annahmen zurückzuführen sind (Zika u. a., 2023). Im vorliegenden Bericht dient die aktualisierte QuBe-Basisprojektion der siebten Welle (Maier u. a., 2022) als **Referenz-Szenario**. Neben der Fortschreibung vergangener Trends und Verhaltensweisen beinhaltet sie unter anderem Annahmen zu absehbaren Entwicklungen mit Hinblick auf den Ausbau erneuerbarer Energien, Folgen des Klimawandels (z.B. Ausfälle in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion, Vorsorge für Wind- und Wasserschäden) und Klimafolgenanpassungen (z.B. Hochwasserschutz und Bewässerungsanlagen). Das Wasserstoff-Szenario-v2.1 (siehe Abschnitt 2.3) fungiert als **Alternativ-Szenario**.

Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung



Quelle: Zika u.a. (2023).

Die Ergebnisse werden als Abweichung zu jeweils einem Zeitpunkt zwischen Referenz-Szenario und Alternativ-Szenario dargestellt (siehe Abbildung 2). Eine Analyse über den zeitlichen Verlauf der jeweiligen Szenarien wird im vorliegenden Bericht nicht vorgenommen. Es können somit Aussagen darüber getroffen werden, ob eine Entwicklung im Alternativ-Szenario stärker oder schwächer ausfällt als im Referenz-Szenario, jedoch nicht ob der grundsätzliche Entwicklungspfad steigend oder fallend ist. Eine Positiv- oder Negativabweichung zwischen zwei Szenarien zu einem Zeitpunkt heißt also nicht zwingend, dass beispielsweise Arbeitsplätze im Zeitverlauf auf- beziehungsweise abgebaut werden. Die Abweichung gibt jedoch Auskunft darüber, ob die Zahl der besetzten Arbeitsplätze im Alternativ-Szenario zum betrachteten Zeitpunkt höher oder tiefer liegt als im Referenz-Szenario. In der Evaluierung von alternativen Entwicklungspfaden steht die Wirkung einer oder mehrerer Maßnahmen im Vordergrund, weshalb der Fokus auf dem direkten Vergleich der beiden Szenarien liegt.

2.3 Annahmen

2.3.1 Übersicht

Für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 müssen verschiedene Annahmen über zukünftige Entwicklungen getroffen werden, da sich die Wasserstoffwirtschaft noch am Anfang ihrer Aufbauphase befindet und nicht in historischen Daten abgebildet ist. In ihrer Gesamtheit sollen die Annahmen den Aufbau einer vollständigen Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff bis zum Jahr 2045 beschreiben. Sie bilden die Grundlage für Eingriffe in das makroökonomische Prognosemodell zur Modellierung des entsprechenden Alternativ-Szenarios.

Die Annahmen wurden anhand von Strategiepapieren und aktueller Literatur sowie ergänzenden Expert:inneninterviews getroffen. Aus der Studienlandschaft lassen sich zum Thema Wasserstoff für viele Annahmen Eckwerte für die Jahre 2030 und 2045, beziehungsweise 2050, identifizieren. Für eine lückenlose Zeitreihe wurden fehlende Werte für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 interpoliert. Die Annahmen wurden bis Herbst 2023 zusammengetragen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die getroffenen Annahmen für die Jahre 2030 und 2045, die anschließend näher erläutert werden. Zusätzliche Informationen finden sich im Anhang.

Tabelle 1: Annahmen für das Wasserstoff-Szenario-v2.1

Annahmen		2030	2045
Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import	Wasserstoffgesamtbedarf in Deutschland	106 TWh	501 TWh
	Wasserstofferzeugung in Deutschland	27 TWh	119 TWh
	Für die Wasserstoffproduktion benötigte Strommenge aus erneuerbaren Energien	40 TWh	171 TWh
	Wasserstoffimportbedarf	79 TWh	382 TWh
Investitionskosten, Wasserstoff-gestehungskosten und -importkosten	Umrüstungsinvestitionen (kumuliert)	13 Mrd. EUR	42 Mrd. EUR
	Investitionskosten Elektrolyseure	585 EUR/kW	325 EUR/kW
	Wasserstoffgestehungskosten in Deutschland	0,14 EUR/kWh	0,11 EUR/kWh
	Importkosten von Wasserstoff über Pipelineimport	0,14 EUR/kWh	0,11 EUR/kWh
	Importkosten von Wasserstoff über Schiffsimport mit synthetischem Methan	0,32 EUR/kWh	0,26 EUR/kWh
	Importkosten von Wasserstoff über Schiffsimport mit grünem Ammoniak	0,21 EUR/kWh	0,17 EUR/kWh
Wasserstoffinfrastruktur	Investitionskosten (kumuliert)	23 Mrd. EUR	58 Mrd. EUR
Technologieexport	Exportwert von Elektrolyseuren	8 Mrd. EUR	6 Mrd. EUR
Synthetische Kraftstoffe	Bedarf an synthetischen Kraftstoffen in Deutschland (Luft- und Schifffahrt)	5 TWh	43 TWh
	Synthetische Kraftstoffproduktion in Deutschland	5 TWh	8 TWh
	Importbedarf synthetischer Kraftstoffe	1 TWh	36 TWh
	Investitionskosten zur Produktion synthetischer Kraftstoffe (kumuliert)	0,8 Mrd. EUR	1,2 Mrd. EUR
Weiterbildung	Zusätzliche Schulungskosten für Wasserstoffkompetenzen	0,1 Mrd. EUR	-
	Exporte von Bildungsdienstleistungen	+2 Prozent	+5 Prozent
	Private Konsumausgaben für Bildungsdienstleistungen	+0,3 Prozent	+1 Prozent

Quellen: Siehe Anhang.

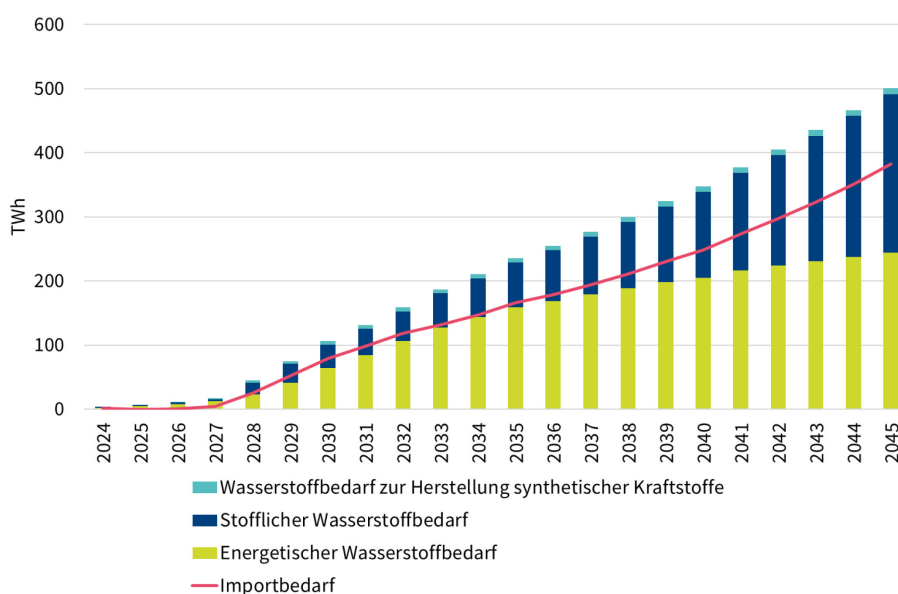
2.3.2 Bedarf, Erzeugung und Import

Der Wasserstoffbedarf in Deutschland kann zwischen energetischem und stofflichem Bedarf unterschieden werden. Im Wasserstoff-Szenario-v2.1 wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff als Energieträger vor allem in den energieintensiven Industrien zum Einsatz kommt, die aufgrund der hohen notwendigen Temperaturen nicht, oder nur schwer, elektrifizieren können (z.B. Stahlindustrie, Zementindustrie, Glas- und Keramikindustrie) (BMWK, 2022a; Neuwirth u. a., 2022; Schlichtmann u. a., 2022; Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2022). Hinzu kommt die Nutzung im Bereich der Energieversorgung zur Rückverstromung, um Schwankungen bei der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien auszugleichen. Hierfür orientiert sich der Bedarf am Rahmen für die Kraftwerksstrategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz vom 01.08.2023 (BMWK, 2023c; Deutscher Bundestag, 2023a; Löffler und Marquardt, 2023). Zudem wird angenommen, dass Wasserstoff im Schwerlastverkehr zum Einsatz kommt (Fraunhofer ISI, 2022). Die stoffliche Nutzung findet vor allem in der Chemieindustrie und in Raffinerien statt (acatech und DECHEMA, 2023; Neuwirth u. a., 2022). Im Wasserstoff-Szenario-v2.1 wird zusätzlich von einer inländischen Produktion synthetischer Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis ausgegangen (siehe Abschnitt 2.3.6 und Anhang A8), die den Wasserstoffbedarf ebenfalls erhöht. In Anhang A1 sind die Bedarfe nochmals differenziert aufgelistet.

Ein Teil des Wasserstoffbedarfs wird annahmegemäß durch inländische Wasserstofferzeugung gedeckt (siehe Anhang A2). Die Differenz zwischen dem inländisch erzeugten Wasserstoff und dem Wasserstoffbedarf bestimmt den Importbedarf. Die durchschnittliche Importquote beträgt 61 Prozent, wobei sie gegen Ende des Projektionszeitraums bei rund 76 Prozent liegt.

Abbildung 3 gibt eine Übersicht.

Abbildung 3: Wasserstoffbedarf nach Kategorie und Importbedarf



Quelle: Eigene Berechnungen.

Der Import von fossilem Erdgas und Erdöl wird durch die Wasserstoffbedarfe im Prognosemodell in gleicher Höhe substituiert. Erdöl wird vor allem in der stofflichen Nutzung der Chemieindustrie

ersetzt. Im Falle der synthetischen Kraftstoffe werden fossiler Schiffsdiesel und fossiles Kerosin ersetzt.

2.3.3 Kosten

Zur Nutzung des Wasserstoffs in den Produktionsprozessen fallen durch notwendige Anpassungen Umrüstungsinvestitionen an (Mönnig u. a., 2024 im Erscheinen). Im Fokus stehen hier vor allem die Stahlindustrie und die Energieversorger (TransnetBW, 2023; VDI, 2022). Hinzu kommen Umrüstungsinvestitionen in der Chemieindustrie (Allianz Research, 2023). Ein Überblick findet sich in Anhang A3.

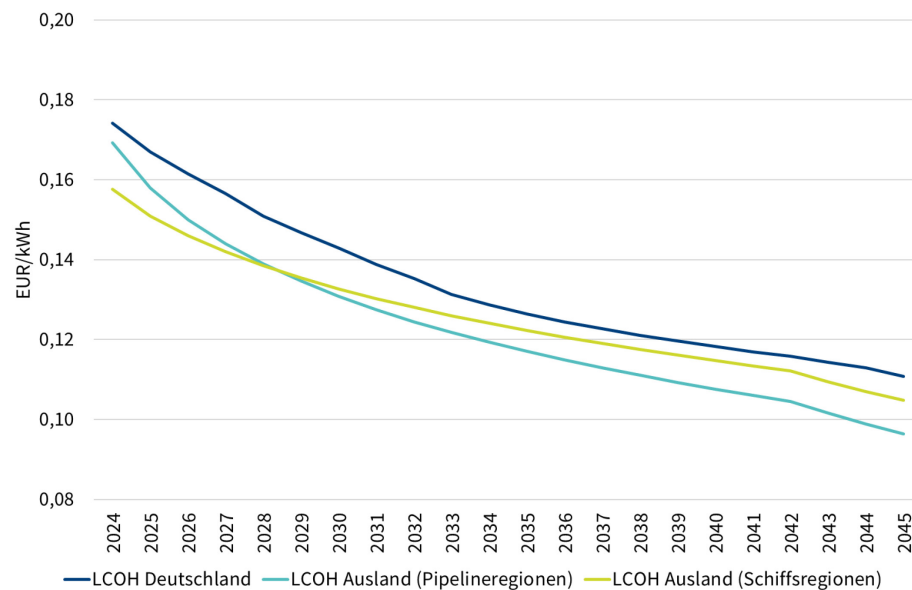
Zur Bestimmung der inländischen Gestehungskosten von Wasserstoff mittels Elektrolyse verfolgt dieser Bericht den Ansatz zur Berechnung der Wasserstoffgestehungskosten gemäß Agora Industry und Umlaut (2023). Die Kosten setzen sich zusammen aus den Investitionskosten für Elektrolyseure und deren Betriebskosten. Die Stromkosten sind dabei der größte Treiber für die Kostenberechnung. Hinzu kommen Kapitalzinsen sowie die Nutzungsdauer der Elektrolyseure (siehe Anhang A4). Bis zum Jahr 2045 werden die mengengewichteten inländischen Gestehungskosten gemäß den Berechnungen auf etwa 0,11 EUR/kWh sinken (siehe Abbildung 4).

Analog berechnen sich Wasserstoffgestehungskosten im Ausland. Dazu wurden für ausgewählte Länder die Kapitalzinssätze und Großhandelsstrompreise ermittelt, um ceteris paribus die mittleren Gestehungskosten für Regionen berechnen zu können, die einerseits für den Wasserstoffimport via Pipeline und andererseits für den Import von Wasserstoff in Form von Derivaten via Schiff von Relevanz sind.

Mit bis 2045 konstant gehaltenen Kapitalzinssätzen ergeben sich die Gestehungskosten für das Jahr 2030 sowohl für Pipeline-, als auch für Schiffsregionen zu circa 0,13 EUR/kWh. Bis 2045 fallen die Kosten der Schiffsländer auf etwa 0,11 EUR/kWh, während die Kosten der Pipelineländer auf etwa 0,10 EUR/kWh fallen (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Wasserstoffgestehungskosten (LCOH) im In- und Ausland

Ohne Transport und Umwandlungskosten



Quelle: Eigene Berechnungen.

Die Wasserstoffgestehungskosten im Ausland liegen somit annahmegemäß niedriger als in Deutschland, was insbesondere dem Umstand geschuldet ist, dass die Erzeugung von erneuerbaren Energien und damit grünem Strom zur Wasserstoffgewinnung in den ausgewählten Ländern aufgrund natürlicher Gegebenheiten kostengünstiger ist (Ronsiek u. a., 2022).

Die Importkosten für Wasserstoff setzen sich grundsätzlich aus den Gestehungskosten im Ausland und den Transportkosten zusammen. Beim Import unterschieden werden muss der Import von gasförmigem Wasserstoff per Pipeline und der Import von Wasserstoffderivaten per Schiff. Für letzteren Fall sind den Importkosten zusätzlich auch Energiekosten für die Rückumwandlung in Wasserstoff hinzuzurechnen (siehe Anhang A5).

Wie bereits von Merten und Scholz (2023) dargestellt, zeigt sich, dass der Import von Wasserstoff über Pipelines günstiger gegenüber Schiffsoptionen sein wird, während die Wasserstoffproduktion in Deutschland – insbesondere im Vergleich zu den Schiffsoptionen – wettbewerbsfähig bleibt.

2.3.4 Infrastruktur

Damit der benötigte Wasserstoff zu den Verbrauchsstandorten gelangt, muss eine entsprechende Infrastruktur aufgebaut werden. Berücksichtigt hierfür wurden die bislang bekannten Hafenprojekte, die planen grünes Ammoniak beziehungsweise synthetisches Methan zu importieren und in Wasserstoff umzuwandeln (siehe Anhang A6). Bei den Hafenkapazitäten wurde der Energieverlust zur Rückumwandlung mit einkalkuliert. Annahmegemäß wird der Importbedarf, der nicht über Hafenterminals gedeckt werden kann, mittels grenzüberschreitender Pipelines ergänzt.

Für den inländischen Wasserstofftransport wird voraussichtlich ein Teil des Erdgasnetzes umgerüstet und genutzt werden können. Darüber hinaus werden allerdings auch neue Pipelines

benötigt (siehe Anhang A6). Langfristig orientieren sich die Annahmen zum Pipelinenetz am benötigten Wasserstoffbedarf aus Annahme 2.3.2 und gehen von 70 Prozent Umrüstung und 30 Prozent Neubau aus.

Um einen der großen Vorteile von Wasserstoff – die Möglichkeit zur längerfristigen Speicherung – zu realisieren, benötigt es ausreichende Speicherkapazitäten. Da Wasserstoffspeicher unter anderem für die Versorgung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen von zentraler Bedeutung sind (FNB Gas, 2023), wird der Speicherbedarf im Wasserstoff-Szenario-v2.1 an den Wasserstoffbedarf der Wasserstoff-Kraftwerke gekoppelt. Die Annahmen zu den vorhandenen Speicherkapazitäten, Ausbaupotenzialen und Investitionskosten basieren auf einer Studie von Bültmeier u. a. (2022). Die Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) beinhaltet die Vorgabe bis 2030 Wasserstoff in allen städtischen Knoten und alle 200 km entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes an Tankstellen zugänglich zu machen (Rat der EU, 2023a). Um den Schwerlastverkehr im Wasserstoff-Szenario-v2.1 mit ausreichend Wasserstoff versorgen zu können, werden bis 2045 zusätzlich 70 Tankstellen benötigt, wozu auch XXL-Tankstellen zählen, die bis zu 600 Fahrzeuge pro Tag betanken können (Rose, Wietschel und Gnann, 2020).

2.3.5 Technologieexporte

In der NWS 2023 werden die Wertschöpfungspotenziale von Wasserstofftechnologien abermals betont (BMWK, 2023a). Vor allem im Bereich der Elektrolyseure halten deutsche Hersteller eine Technologieführerschaft inne (Zenk u. a., 2023b). Das Exportpotenzial, beziehungsweise der Exportwert der Elektrolyseure ist abhängig vom weltweiten Ausbau der Elektrolysekapazität, sowie vom Weltmarktanteil Deutschlands an den globalen Elektrolyseurverkäufen. Für den mittelfristigen Projektionshorizont bis 2030 wird die weltweit installierte Leistung anhand der Elektrolyseprojekte in der Projektdatenbank der IEA (2023) und für den langfristigen Projektionshorizont aus dem IEA Net Zero Szenario ermittelt (IEA, 2021). Gemäß (BMWK, 2022b) wird von einem Weltmarktanteil deutscher Hersteller in Höhe von zehn Prozent ausgegangen. Der Exportwert errechnet sich unter Bezugnahme auf die angenommenen Investitionskosten für Elektrolyseure (siehe Tabelle 1 und Anhang A7).

2.3.6 Synthetische Kraftstoffe

Für die Luft- und Schifffahrt wird angenommen, dass Wasserstoff in Form von synthetischen Kraftstoffen zum Einsatz kommt. Während im Wasserstoff-Szenario-v2.0 noch von einem vollständigen Import derartiger Kraftstoffe ausgegangen wurde, wird im Wasserstoff-Szenario-v2.1, aufgrund von Expert:innenaussagen, auch ein Anteil inländischer Produktion modelliert (siehe Anhang A8).

Unter Berücksichtigung des erwarteten Energiebedarfs der Luftfahrt, der nationalen Quote zur Beimischung von strombasiert hergestelltem, nachhaltigem Kerosin („E-Kerosin“) sowie der EU Verordnung über die „ReFuelEU Aviation“-Initiative wurden zunächst die entsprechenden Bedarfe ermittelt (BMDV, 2021; EU, 2023b; Fraunhofer ISI, 2022; Rat der EU, 2023c). Der Bedarf an synthetischem Kraftstoff für die Schifffahrt in Form von Methanol orientiert sich an der EU Verordnung über die „FuelEU Maritime“-Initiative (Fraunhofer ISI, 2021; Rat der EU, 2023b). Die Produktionskapazitäten für synthetische Kraftstoffe in Deutschland ergeben sich aus der Projektdatenbank der IEA (2023), ergänzt um Informationen aus Expert:innengesprächen. Für die

inländische Produktion müssen Anlagen für das Fischer-Tropsch Verfahren und die Methanolsynthese aufgebaut werden. Aus den Wasserstoffgestehungskosten in Annahme 2.3.3 und den zusätzlichen Kosten für die Weiterverarbeitung zu synthetischen Kraftstoffen (Moritz, Schönfisch und Schulte, 2021) ergeben sich die Kosten für E-Kerosin und Methanol (siehe Anhang A8).

2.3.7 Weiterbildung

Auf Basis der durchgeführten Expert*inneninterviews und Erkenntnissen aus weiteren Projekten (BIBB, 2023a; GWS, 2023) wird angenommen, dass es in den kommenden Jahren in mehreren Branchen zu einer Steigerung der Weiterbildungsinvestitionen kommt, da neue Technologien, Produktionsprozesse und Sicherheitsstandards eingeführt werden müssen und Beschäftigte zusätzliche Kenntnisse über Wasserstofftechnologien benötigen (siehe Anhang A9). Höhere Weiterbildungsausgaben werden insbesondere für den Bereich Metallerzeugung und -bearbeitung angenommen. Vornehmlich für die Chemieindustrie wird angenommen, dass Beschäftigte bereits gut auf den Umgang mit Wasserstoff vorbereitet sind, da die Nutzung von Wasserstoff in der Branche in diesem Bereich bereits eine lange Historie hat und sich infolgedessen die Arbeitsprozesse von Fachkräften nicht grundlegend ändern werden (BIBB, 2023b). Neben den gesteigerten Weiterbildungsinvestitionen deutscher Unternehmen können in der Weiterbildungsbranche weitere Umsätze durch Bildungsexporte in das Ausland generiert werden (Niediek, 2023). Ebenso wird angenommen, dass infolge der steigenden Arbeitsmarktrelevanz des Themas Wasserstoff und zunehmenden Angeboten beruflicher Weiterbildung in diesem Bereich die individuellen Ausgaben von Privathaushalten geringfügig ansteigen (siehe Tabelle 1).

3 Ergebnisse

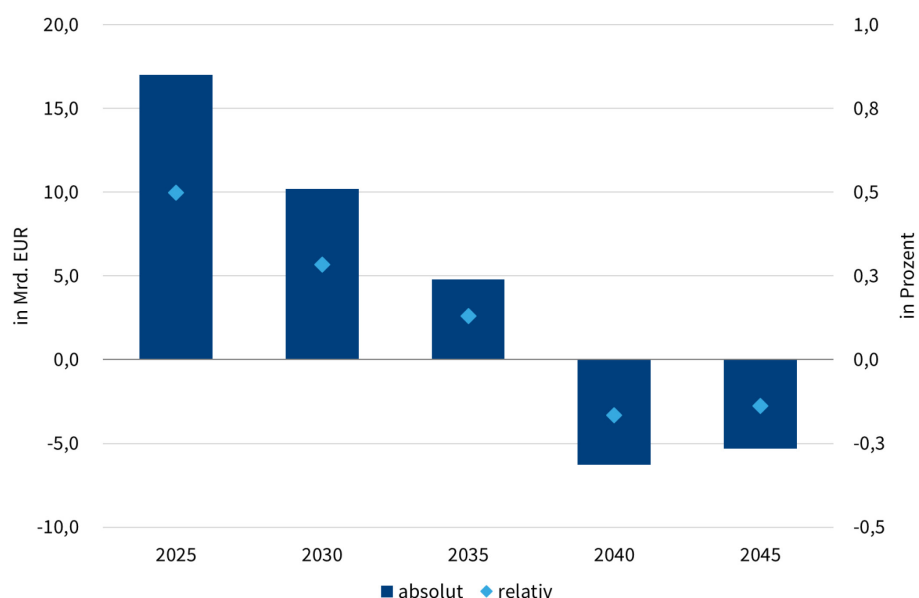
3.1 Gesamtwirtschaft

Die Ergebnisse der Szenario-Rechnung zeigen, dass sich die getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bis 2035 leicht positiv auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) auswirken. Es liegt zwischen 4,8 Mrd. EUR (0,1 Prozent) und 17 Mrd. EUR (0,5 Prozent) höher als im Referenz-Szenario (siehe Abbildung 5). Ab 2036 bleibt das BIP im Wasserstoff-Szenario-v2.1 unter dem des Referenz-Szenarios zurück. Im Jahr 2040 ist es 6,3 Mrd. EUR (0,2 Prozent) niedriger und im Jahr 2045 5,3 Mrd. EUR (0,1 Prozent). Hauptverantwortlich für diese negativen Wirkungen auf das BIP sind die höheren Importe. Die Kostendifferenz zwischen fossilen Energie- und Grundstoffimporten und dem teureren Import von grünem Wasserstoff sowie Wasserstoffderivaten lässt die Wirtschaftsleistung langfristig niedriger ausfallen. Zudem findet ein großer Teil der Investitionen, vor allem in die Infrastruktur, bis 2035 statt. Investitionen in die Wasserstoffherstellung werden zunächst staatlich gefördert, sodass sich primär im späteren Verlauf die induzierten Wirkungen auf Preise und Importe zeigen.

Dies bedeutet nicht, dass es durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Zeitverlauf zu einem negativen Wirtschaftswachstum kommen wird. Die negativen Wirkungen führen in der langen Frist jedoch zu einem niedrigeren BIP-Niveau als im Referenz-Szenario. Über den gesamten Projektionszeitraum hinweg liegt es – aufgrund der positiven Wirkung in den ersten Jahren – dennoch um durchschnittlich 4,1 Mrd. Euro höher (+0,1 Prozent jährlich).

Während die Wirkung auf das BIP im vorangegangenen Wasserstoff-Szenario-v2.0 wegen der hohen Erdgaspreise noch durchweg positiv ausfiel, kann der Kostenvorteil in diesem Szenario aufgrund des aktuellen Preistrends nicht mehr in gleichem Maße realisiert werden.

Abbildung 5: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt, in Mrd. EUR und in Prozent
Abweichung zum Referenz-Szenario



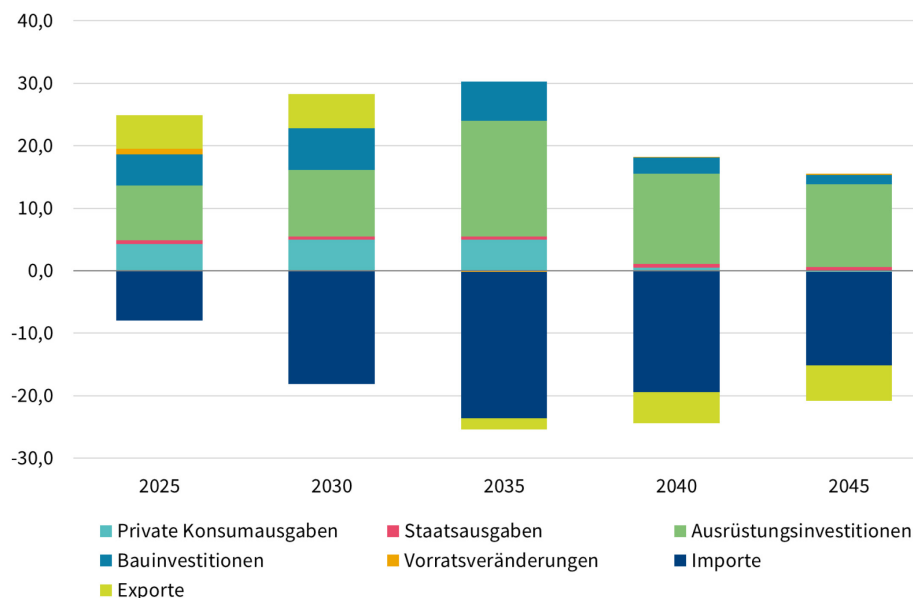
Quelle: Eigene Berechnungen.

In Abbildung 6 sind die Abweichungen nach den einzelnen Komponenten des BIP dargestellt. Es zeigt sich, dass Bau- und Ausrüstungsinvestitionen über den gesamten Projektionszeitraum eine positive Wirkung auf das BIP ausüben, ebenso wie die privaten Konsum- und Staatsausgaben.

Der Beitrag der Exporte fällt ab Mitte der 2030er Jahre niedriger aus als im Referenz-Szenario. Zwar wirkt sich der Export von Elektrolyseuren durchgehend positiv auf das BIP aus, andere Exportzweige verlieren durch höhere Energie- und Grundstoffpreise jedoch an internationaler Wettbewerbsfähigkeit.

Die Importkomponente hat über den gesamten Projektionszeitraum eine negative Wirkung auf das BIP. Insbesondere der Import teurer Wasserstoffderivate per Schiff und deren Rückumwandlung in Wasserstoff schlägt sich mittel- und langfristig in den hohen Importausgaben nieder. Sollte innerhalb des Projektionszeitraums eine Infrastruktur zum maritimen Transport von kryogenem – also tiefgeköhltem, flüssigem – Wasserstoff aufgebaut werden können, könnte dies die Kosten für den Schiffsimport deutlich reduzieren und die Negativeffekte entsprechend abschwächen. Die Investitionen in Bau und Ausrüstungen für die Infrastruktur induzieren darüber hinaus eine erhöhte Nachfrage nach importierten Investitions- und Konsumgütern.

Abbildung 6: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts, in Mrd. EUR
Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

3.2 Arbeitsmarkt

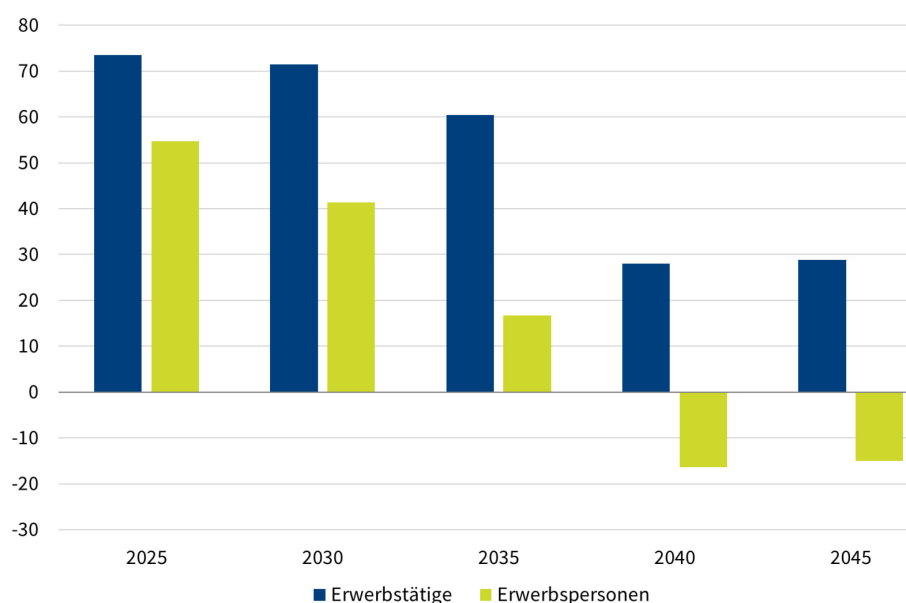
3.2.1 Erwerbstätige und Erwerbspersonen

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft wirkt sich insgesamt positiv auf den Arbeitskräftebedarf aus. Die Zahl der Erwerbstätigen liegt im Wasserstoff-Szenario-v2.1 zwischen 2024 und 2045 um durchschnittlich rund 57.000 Personen höher als im Referenz-Szenario. Wie Abbildung 7 zeigt, werden besonders in den ersten Jahren des Wasserstoffhochlaufs bis in die Mitte der 2030er

Jahre mehr Arbeitskräfte benötigt. Mit der sich abschwächenden Wirtschaftsleistung flacht auch der Bedarf nach zusätzlichen Arbeitskräften ab. Dennoch liegt die Zahl der Erwerbstätigen auch in den Jahren höher, in denen das BIP niedriger ausfällt. In der Regel verläuft die Entwicklung der Erwerbstätigen mit jener der Wirtschaftsleistung. Je mehr erwirtschaftet werden kann, desto mehr Erwerbstätige werden benötigt. Allerdings geschieht dies in Abhängigkeit der Beschäftigungsintensität und der Preiselastizität in den einzelnen Branchen, die sehr unterschiedlich sein können. Bauinvestitionen generieren beispielsweise mehr Erwerbstätige als Ausrüstungsinvestitionen, da letztere in weniger arbeitsintensiven und stärker automatisierten Branchen wirken und zudem ein Teil der Investitionswirkung dem Ausland zugutekommt beziehungsweise im Ausland Arbeitsplätze schafft.

Die Zahl der Erwerbspersonen entwickelt sich hingegen ähnlich dem BIP. Bis in die Mitte der 2030er Jahre liegt sie noch über der im Referenz-Szenario. Mit der schwächeren Wirtschaftsleistung in der langen Frist ziehen sich im Szenario bis zu rund 17.000 Erwerbspersonen vom Arbeitsmarkt zurück. Bei gleichzeitig steigenden Erwerbstätigenzahlen reduziert sich die Erwerbslosigkeit gegenüber dem Referenz-Szenario. Die niedrigere Erwerbslosigkeit kann über den gesamten Projektionszeitraum hinweg beobachtet werden, da die Zahl der zusätzlichen Erwerbstätigen stets über der Zahl der zusätzlichen Erwerbspersonen liegt. Die Rekrutierung geeigneter Arbeitskräfte gestaltet sich im Wasserstoff-Szenario aufgrund des höher ausgelasteten Arbeitsmarktes somit schwieriger als im Referenz-Szenario.

Abbildung 7: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und der Erwerbspersonen, in Tsd. Personen
Abweichung zum Referenz-Szenario



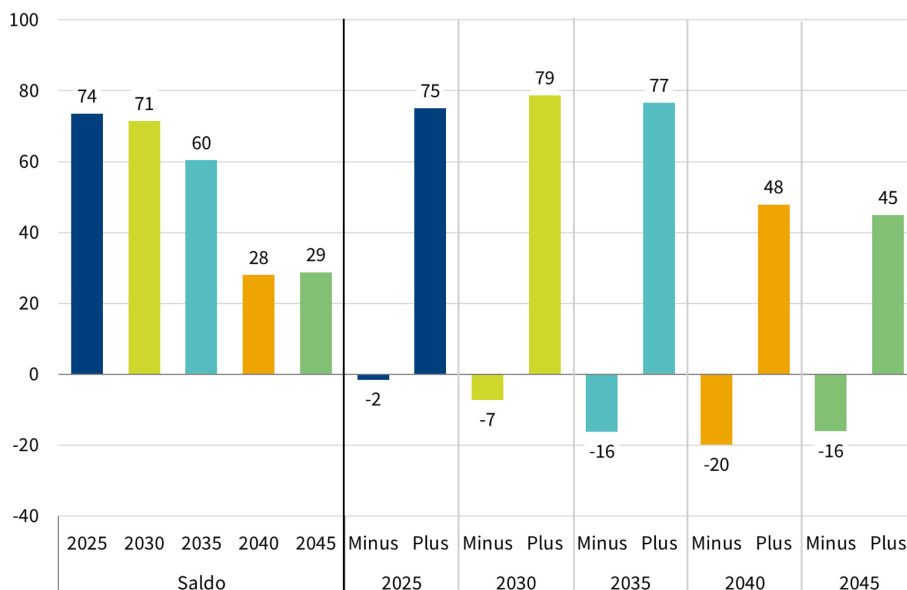
Quelle: Eigene Berechnungen.

3.2.2 Arbeitsplatzaufbau und -abbau

Durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft werden neue Arbeitsplätze geschaffen, andererseits kommt es auch zu Arbeitsplatzverlusten und -verschiebungen in einzelnen

Branchen und Berufen. Abbildung 8 zeigt die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze nach Wirtschaftsbereich-Berufs-Kombination (63 Wirtschaftsbereiche x 144 Berufe = 9.072 Kombinationen) im Vergleich zum Referenz-Szenario. Im Jahr 2030 (hellgrüne Säule im rechten Teil) werden im Wasserstoff-Szenario rund 79.000 Arbeitsplätze vorhanden sein, die es im Referenz-Szenario nicht gibt. Umgekehrt gibt es im Referenz-Szenario rund 7.000 Arbeitsplätze, die im vorliegenden Szenario nicht mehr vorhanden sind. Im Saldo kommt es somit zu einem Aufbau von rund 71.000 Arbeitsplätzen. Im Jahr 2045 (dunkelgrüne Säule im rechten Teil) werden im Wasserstoff-Szenario rund 45.000 Arbeitsplätze vorhanden sein, die es im Referenz-Szenario nicht gibt und rund 16.000 Arbeitsplätze abgebaut, die im Referenz-Szenario vorhanden waren. Bei dieser konsolidierten Betrachtung können zwar neue Arbeitsplätze in spezifischen Wirtschaftsbereich-Berufs-Kombinationen entstehen, wenn in der gleichen Wirtschaftsbereich-Berufs-Kombination jedoch Arbeitsplätze abgebaut werden, wird implizit angenommen, dass die vorher neu geschaffenen Arbeitsplätze wieder reduziert werden. Der Strukturwandel, der durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bedingt wird, reduziert sich zum Ende des Projektionszeitraums. Sind im Jahr 2030 insgesamt noch rund 86.000 Arbeitsplätze betroffen, die entweder auf- oder abgebaut werden, beläuft sich deren Zahl im Jahr 2045 auf nur noch rund 61.000 Arbeitsplätze.

Abbildung 8: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze, in Tsd. Personen, gerundet
Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

3.2.3 Erwerbstätige nach Wirtschaftsbereichen

Die größten absoluten und relativen Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen in den einzelnen Wirtschaftsbereichen sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt. Abbildung 9 zeigt dabei die größten absoluten Abweichungen zum Referenz-Szenario für die Jahre 2030 und 2045. Die Wirtschaftsbereiche sind dahingehend markiert, ob es sich bei den Abweichungen um

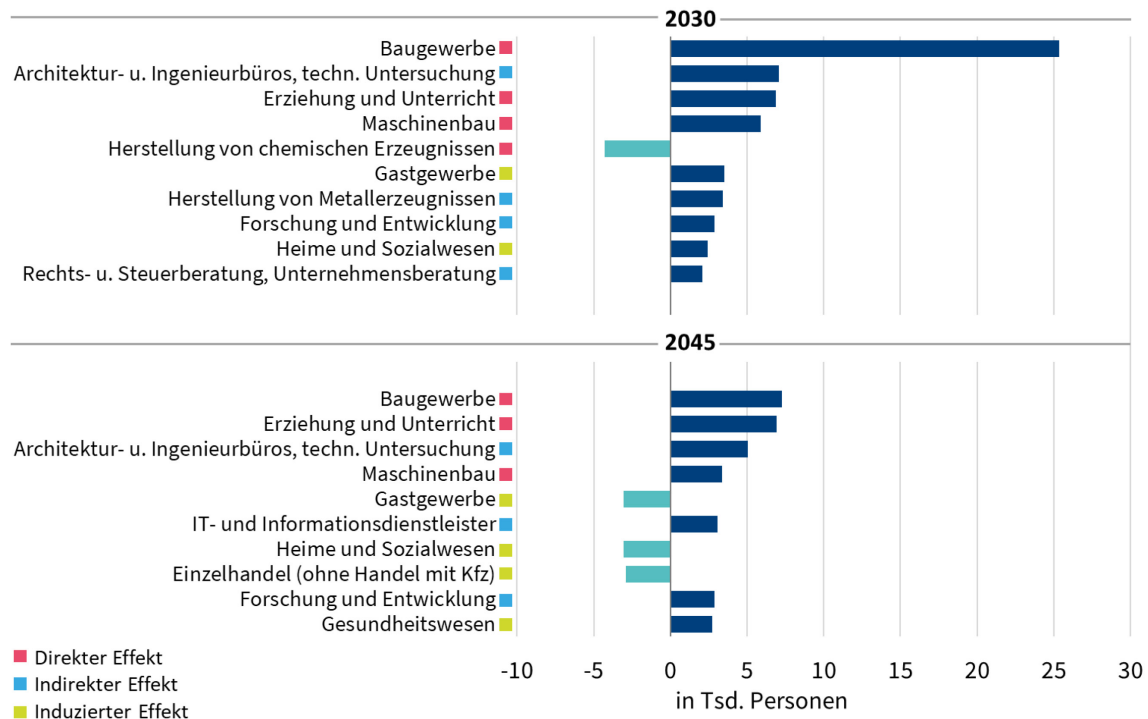
überwiegend direkte, indirekte oder induzierte Effekte handelt, die durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bedingt sind.

Wie bereits in Abbildung 8 ersichtlich wurde, überwiegt der Arbeitsplatzaufbau in der ersten Hälfte des Projektionszeitraums deutlich. Entsprechend befindet sich im Jahr 2030 lediglich ein Wirtschaftsbereich mit niedriger Erwerbstätigenzahl unter den zehn Wirtschaftsbereichen mit den größten absoluten Abweichungen. Die Herstellung von chemischen Erzeugnissen verteuert sich im Wasserstoff-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario, wodurch vergleichsweise weniger produziert wird und entsprechend weniger Arbeitskräfte benötigt werden. Dementgegen liegt der Arbeitskräftebedarf im Baugewerbe sowie im Architektur- und Ingenieurwesen aufgrund des zusätzlichen Ausbaus erneuerbarer Energien und des Infrastrukturaufbaus für die Wasserstoffwirtschaft höher. Erziehung und Unterricht profitieren vom zusätzlichen Weiterbildungsbedarf und der Maschinenbau von höheren Inlandsinvestitionen und Exporten. Die Hersteller von Metallerzeugnissen – nicht zu verwechseln mit dem vorgelagerten Wirtschaftszweig Metallerzeugung und -bearbeitung – ist eine zuliefernde Branche für die vielen Infrastrukturprojekte im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien und für die Herstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren. Die Forschung und Entwicklung sowie Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung sind indirekt betroffen, indem ihre Dienstleistungen verstärkt von den direkt betroffenen Wirtschaftsbereichen nachgefragt werden. Das 2030 noch höher liegende BIP führt zu einer stärkeren Nachfrage im Gastgewerbe sowie bei Heimen und im Sozialwesen, wodurch positive indirekte Effekte auf den Arbeitskräftebedarf in diesen Bereichen entstehen.

Im Jahr 2045 befinden sich hingegen bereits drei Wirtschaftsbereiche mit niedrigeren Erwerbstätigenzahlen unter den zehn Wirtschaftsbereichen mit den größten absoluten Abweichungen. Durch das niedrigere BIP gegen Ende des Projektionszeitraums liegt die Nachfrage im Gastgewerbe, bei Heimen und im Sozialwesen sowie im Einzelhandel unter der des Referenz-Szenarios und entsprechend auch der Arbeitskräftebedarf in diesen Bereichen. Andere Wirtschaftsbereiche haben weiterhin einen höheren Arbeitskräftebedarf im Vergleich zum Referenz-Szenario. Die Abweichung der Erwerbstätigenzahlen in den einzelnen Branchen, und dabei insbesondere im Baugewerbe, fallen jedoch nicht mehr so hoch aus wie noch 2030.

Abbildung 9: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045

Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 10 zeigt die zehn größten relativen Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen nach Wirtschaftsbereich für die Jahre 2030 und 2045. Die Abweichungen werden hierbei ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen eines Wirtschaftsbereichs im Referenz-Szenario gesetzt.

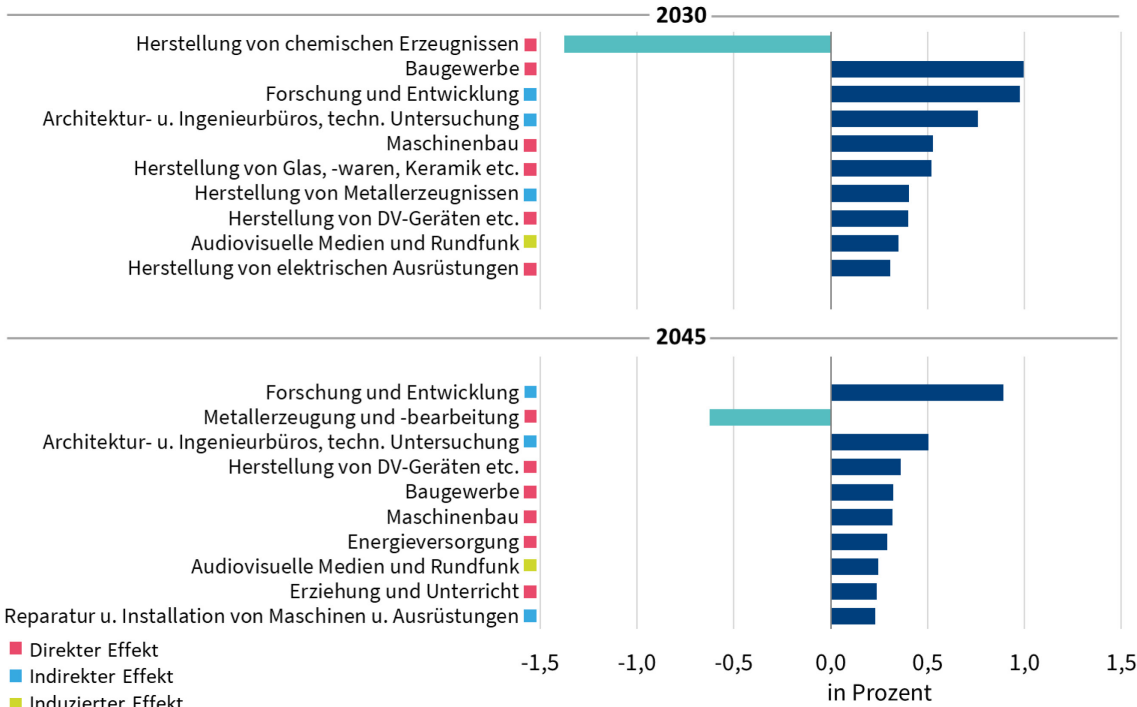
Aus relativer Sicht kommt es zu Verschiebungen in der Rangordnung und es rücken weitere Bereiche mit geringeren Erwerbstätigenzahlen in den Vordergrund. So akzentuiert sich im Jahr 2030 die niedrigere Erwerbstätigenzahl in der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, wodurch die Wirkung eines Umstiegs von fossilen Grundstoffen auf synthetische, wasserstoffbasierte Grundstoffe deutlich wird. In der langen Frist relativiert sich das Beschäftigungsniveau in der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, da die Kostendifferenz zwischen fossilen und synthetischen, wasserstoffbasierten Grundstoffen abnimmt.

Positive Effekte zeigen sich 2030 hingegen zusätzlich bei der Herstellung von Glas, Glaswaren und Keramik, bei der Herstellung von DV-Geräten, den audiovisuellen Medien und Rundfunk sowie bei der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen. Aufgrund der Bauinvestitionen in die Infrastruktur hat die Bauwirtschaft einen erhöhten Bedarf an Vorleistungen aus der Herstellung von Glas, Glaswaren und Keramik. Die Hersteller von DV-Geräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen profitieren dagegen hauptsächlich durch den Ausbau der erneuerbaren Energien aber auch durch die Herstellung und den Export von Elektrolyseuren. Elektronische Bauelemente und Leiterplatten werden in beiden Kategorien besonders nachgefragt. Während audiovisuelle Medien – ähnlich wie Dienstleistungen im Gastgewerbe – mit steigenden Löhnen und höherem verfügbaren Einkommen vermehrt nachgefragt werden, profitieren Hersteller von elektrischen Ausrüstungen von zusätzlichen Inlandsinvestitionen und Exporten.

Im Jahr 2045 zeigen sich negative Effekte bei der Metallerzeugung und -bearbeitung, was wiederum auf vergleichsweise höhere Energiekosten zurückzuführen ist. Die Umrüstungsinvestitionen in die veränderten Produktionsprozesse sind dann schon weitestgehend abgeschlossen und federn dadurch den Kostennachteil durch die Verwendung von teurerem Wasserstoff nicht mehr ab. Die Energieversorger haben auch langfristig durch ihre Funktion als Wasserstoffproduzenten und -verteiler sowie durch die Rückverstromung einen höheren Arbeitskräftebedarf als im Referenz-Szenario. Der Wirtschaftsbereich Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstung profitiert durch die Wartung und Instandhaltung der zusätzlich aufgebauten Produktionsanlagen und Wasserstoffinfrastruktur.

Abbildung 10: Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045

Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

3.2.4 Erwerbstätige nach Berufsgruppen

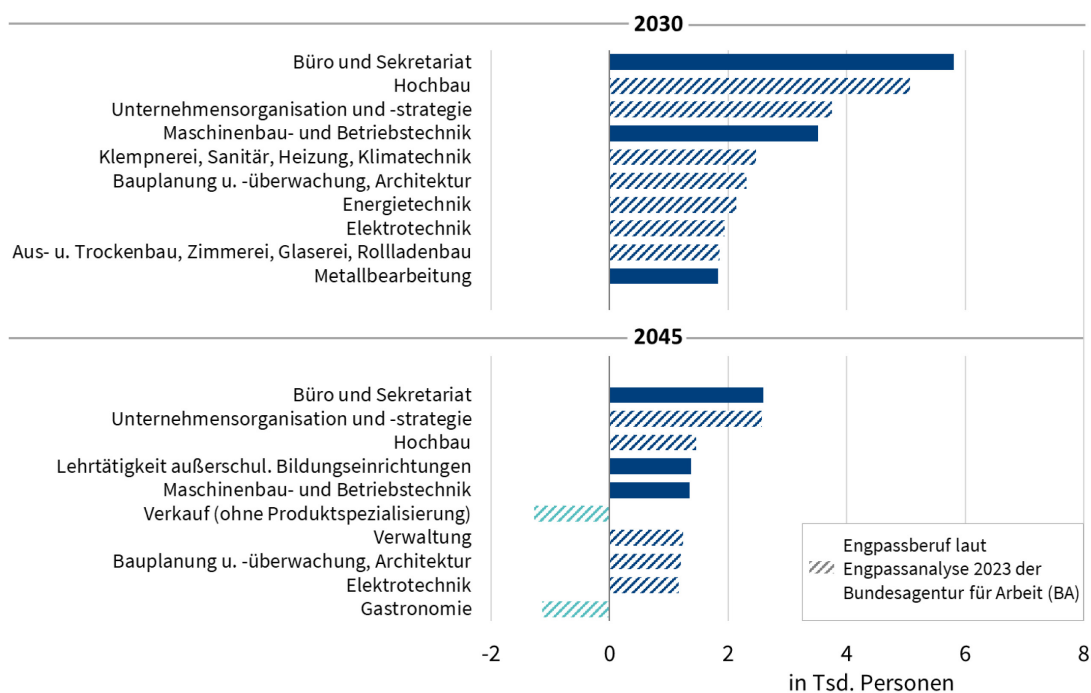
Eine differenzierte Betrachtung der Abweichungen nach Berufsgruppen findet sich in Abbildung 11 und Abbildung 12. Abgebildet werden hierfür die zehn Berufsgruppen (3-Steller der KldB 2010) mit den größten absoluten und relativen Abweichungen in den Erwerbstätigenzahlen im Vergleich zum Referenz-Szenario. Anders als bei den Wirtschaftsbereichen, ist es aufgrund der verschiedenen Branchen-Berufe-Kombinationen kaum möglich eine einfache Zuordnung der Berufsgruppen nach direkten, indirekten und induzierten Effekten vorzunehmen. Die Schraffierung der Balken veranschaulicht die heutigen Schwierigkeiten für Unternehmen, geeignete Fachkräfte, Spezialist*innen oder Expert*innen für die Besetzung offener Stellen in den jeweiligen Berufsgruppen zu finden. Es handelt sich dabei um Berufsgruppen, in denen

mindestens eine Berufsuntergruppe (4-Steller der KldB 2010) als Engpassberuf 2022 durch die Bundesagentur für Arbeit eingestuft wurde (Bundesagentur für Arbeit, 2023).

Die zehn größten absoluten Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen nach Berufen umfassen 2030 ausschließlich positive Abweichungen (siehe Abbildung 11). Zu den drei Berufsgruppen mit den größten absoluten Abweichungen zählen mittelfristig Büro- und Sekretariatskräfte sowie Arbeitskräfte im Bereich Unternehmensorganisation und Strategie. Dabei handelt es sich um einen Mengeneffekt, da diese beiden Berufsgruppen in einer Vielzahl an Wirtschaftsbereichen beschäftigt sind und allgemein von den Wirtschaftsaktivitäten im Zuge des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft profitieren. Hochbauberufe und weitere mit der Bauwirtschaft verbundene Berufe werden für den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien und den Infrastrukturausbau vermehrt nachgefragt. Weitere Berufe werden unter anderem zum Betrieb der Wasserstoffproduktion und -infrastruktur benötigt. Dabei zeigt sich deutlich, dass es in den benötigten Berufsgruppen bereits heute mehrheitlich zu Engpässen kommt, was den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verzögern kann.

Langfristig spiegeln sich vor allem die Abweichungen der Wirtschaftsbereiche in den Berufsgruppen wider. So liegt die Erwerbstätigenzahl 2045 in den Verkaufs- und Gastronomieberufen unter der des Referenz-Szenarios. Die positiven Effekte aus dem Jahr 2030 bei den administrativen Berufen schwächen sich in der langen Frist gemeinsam mit denen der Bauberufe sowie des Maschinenbaus- und der Betriebstechnik ab. Der höhere Arbeitskräftebedarf im Bereich Erziehung und Unterricht findet sich bei den Lehrtätigkeiten in Außerschulischen Bildungseinrichtungen wieder.

Abbildung 11: Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045
Abweichung zum Referenz-Szenario



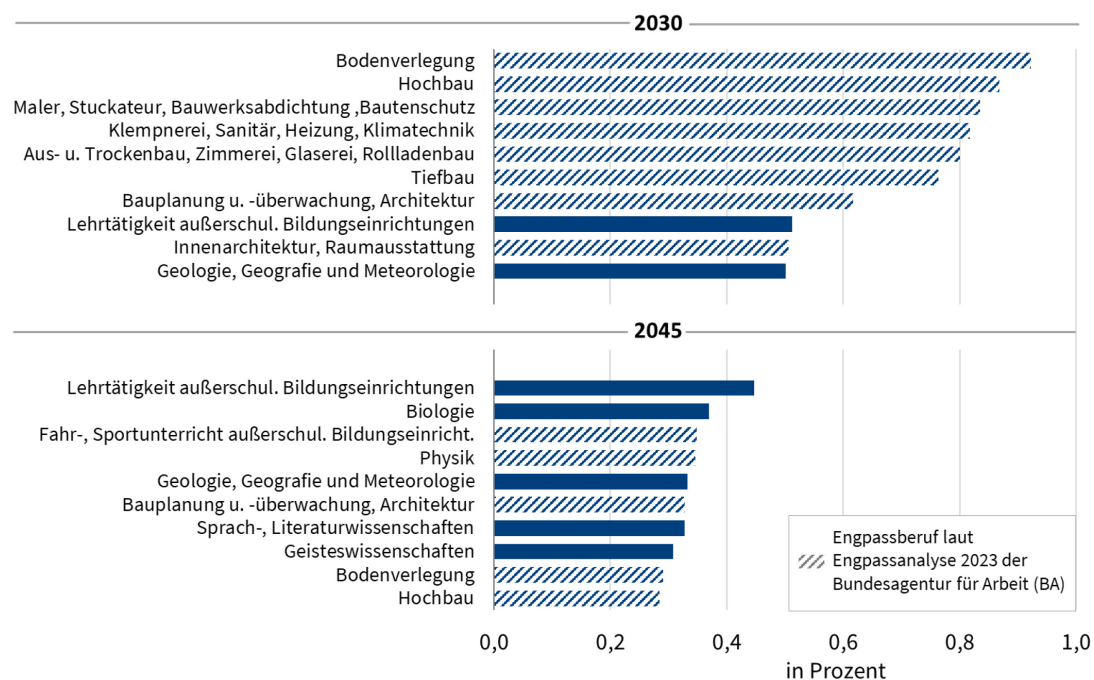
Quelle: Eigene Berechnungen.

Bei den relativen Abweichungen in den Berufsgruppen stechen 2030 die Berufe der Bauwirtschaft hervor. Wie Abbildung 12 zeigt, können acht der zehn Berufsgruppen mit den größten Abweichungen direkt dem Baugewerbe oder dem Bereich Architektur- und Ingenieurwesen zugerechnet werden und auch die Berufsgruppe Geologie, Geografie und Meteorologie ist oftmals im Bereich Architektur- und Ingenieurwesen, technische Untersuchung tätig. Der höhere Bedarf an Lehrpersonen an außerschulischen Bildungseinrichtungen spiegelt – wie bereits in den absoluten Abweichungen – die zusätzlichen Weiterbildungsmaßnahmen wider. Es zeigt sich erneut, dass es vor allem in denjenigen Berufsgruppen zu höheren Arbeitskräftebedarfen kommt, in denen bereits heute Engpässe bestehen.

In der langen Frist sind es 2045 neben den Bau- und Lehrberufen zunehmend wissenschaftliche Tätigkeiten, die die größten relativen Abweichungen aufweisen.

Abbildung 12: Zehn Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045

Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

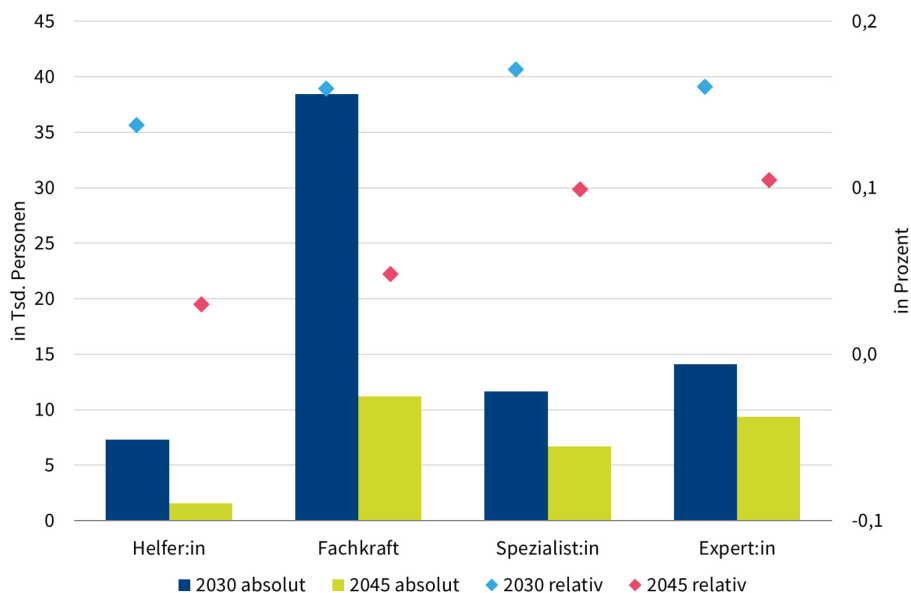
3.2.5 Anforderungsniveaus

Der zusätzliche Arbeitskräftebedarf im Wasserstoff-Szenario-v2.1 unterscheidet sich in den Anforderungsniveaus. Abbildung 13 zeigt die Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen zum Referenz-Szenario für die Jahre 2030 und 2045 getrennt nach Anforderungsniveau, sowohl absolut als auch relativ. Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft führt in allen vier Anforderungsniveaus zu höheren Erwerbstätigenzahlen. Im Jahr 2030 sind es absolut gesehen vor allem Fachkräfte, die zusätzlich benötigt werden. Relativ betrachtet ist der zusätzliche Bedarf bei den Spezialist*innen am höchsten, wobei die relativen Abweichungen im Jahr 2030 bei allen vier Anforderungsniveau eng beieinander liegen. Im Jahr 2045 ist die Abweichung bei den

Fachkräften weniger stark ausgeprägt und bei den Hilfskräften nur minimal höher als im Referenz-Szenario. Insbesondere die relative Betrachtung zeigt, dass im Wasserstoff-Szenario-v2.1 langfristig vor allem mehr Spezialist*innen und Expert*innen gefragt sind.

Abbildung 13: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 und 2045, in Tsd. Personen und in Prozent

Abweichung zum Referenz-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

4 Sensitivitätsanalyse

Das vorliegende Wasserstoff-Szenario-v2.1 ist das Ergebnis der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Annahmen, die zum aktuellen Zeitpunkt noch großen Unsicherheiten unterliegen. Der Vergleich mit dem vorangegangenen Wasserstoff-Szenario-v2.0 zeigt, dass vor allem die relativen Kosten von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zu fossilen Energieträgern und Grundstoffen eine starke Wirkung auf die Wirtschaftsleistung und den Arbeitsmarkt ausüben. Da Prognosen über die zukünftigen Wasserstoffkosten großen Spannweiten unterliegen (Merten und Scholz, 2023), wurde eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für die vorliegende Sensitivitätsanalyse wurde der Strompreis für die Elektrolyse im Ausland verändert, um zu evaluieren wie sich die dadurch veränderten Importkosten für Wasserstoff und Wasserstoffderivate auf das BIP und die Erwerbstätigenzahlen auswirken. Für die Sensitivität 1 wurden die Stromkosten im Ausland um 20 Prozent und für die Sensitivität 2 um 40 Prozent reduziert. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die veränderten Annahmen für das Jahr 2045. Die Importkosten von Wasserstoff per Pipeline enthalten dabei die Transportkosten per Pipeline, die Importkosten von E-Kerosin und Methanol enthalten die Transportkosten per Schiff und die Importkosten von Wasserstoff mit synthetischem Methan beziehungsweise Ammoniak enthalten

neben den Transportkosten per Schiff zusätzlich die Kosten für die Rückumwandlung in Wasserstoff.

Tabelle 2: Überblick über die Sensitivitätsrechnung

Annahmen für das Jahr 2045	Hauptszenario: Wasserstoff-Szenario-v2.1	Sensitivität 1: Stromkosten im Ausland um 20 Prozent reduziert	Sensitivität 2: Stromkosten im Ausland um 40 Prozent reduziert
Importkosten von Wasserstoff über Pipelineimport	0,11 EUR/kWh	0,10 EUR/kWh	0,08 EUR/kWh
Importkosten von Wasserstoff über Schiffsimport mit synthetischem Methan	0,26 EUR/kWh	0,23 EUR/kWh	0,19 EUR/kWh
Importkosten von Wasserstoff über Schiffsimport mit grünem Ammoniak	0,17 EUR/kWh	0,14 EUR/kWh	0,12 EUR/kWh
Importkosten von E-Kerosin	0,20 EUR/kWh	0,17 EUR/kWh	0,14 EUR/kWh
Importkosten von Methanol	0,19 EUR/kWh	0,16 EUR/kWh	0,13 EUR/kWh

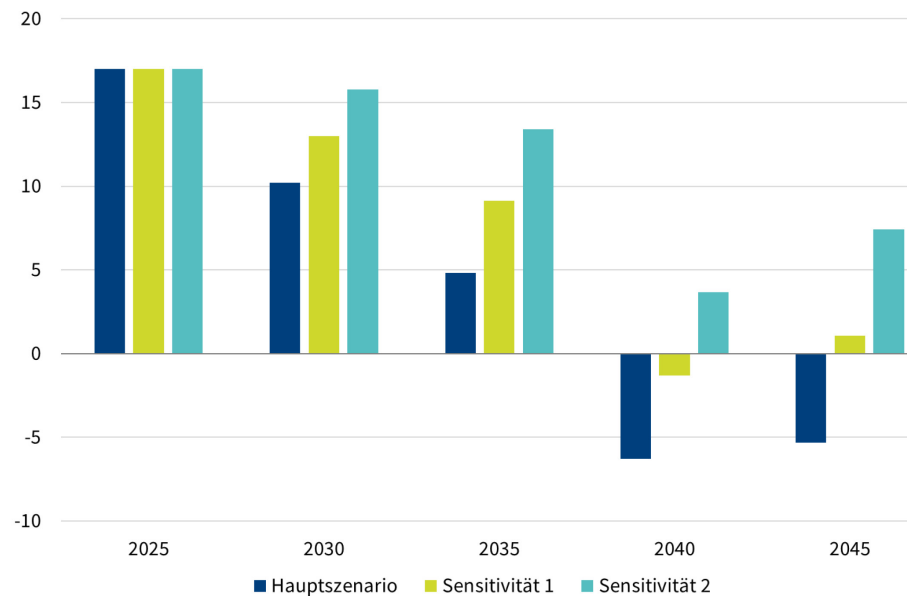
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 14 vergleicht die Wirkungen auf das BIP zwischen dem Wasserstoff-Szenario-v2.1 und den Sensitivitäten. Da der inländische Wasserstoffbedarf 2025 noch durch die heimische Produktion gedeckt werden kann, kommt es zu Beginn des Projektionszeitraums zu keinen Importen von Wasserstoff oder Wasserstoffderivaten. Entsprechend bleibt die Wirkung auch in den beiden Sensitivitäten unverändert. Im weiteren Zeitverlauf und mit zunehmenden Importen zeigt sich jedoch, dass die niedrigeren Importkosten in den Sensitivitäten die negativen Wirkungen der Importe auf das BIP abmildern.

Während das BIP im Hauptszenario über den Projektionszeitraum hinweg um durchschnittlich 4,1 Mrd. Euro höher liegt als im Referenz-Szenario, liegt es in der Sensitivität 1 um durchschnittlich 7,7 Mrd. Euro und in der Sensitivität 2 um durchschnittlich 11,2 Mrd. Euro höher. Die Wirkung in Sensitivität 2 ist damit ähnlich hoch wie im Wasserstoff-Szenario-v2.0, wenngleich die Entwicklung der Wirkungen im zeitlichen Verlauf abweichen. In der Sensitivität 1 kommt es zwischenzeitlich weiterhin zu negativen Wirkungen auf das BIP, die sich gegen Ende des Projektionszeitraums jedoch wieder ins Positive wenden. In der Sensitivität 2 liegt das BIP über alle Jahre hinweg höher als im Referenz-Szenario. Die geringere Kostendifferenz zwischen Wasserstoffimporten und fossilen Importen dämpft die negative Importwirkung ab, wodurch die Positivwirkung der zusätzlichen Ausrüstungs- und Anlageninvestitionen in Summe überwiegt. In Sensitivität 1 liegen die Importkosten für Wasserstoff ab 2044 unter denen für fossiles Erdgas. In Sensitivität 2 bereits ab 2041. Kostenparität zwischen Wasserstoff und Erdöl wird weder in Sensitivität 1 noch in Sensitivität 2 erreicht. Im Modell berücksichtigt wird dabei jeweils ein CO₂-Preis in Höhe von 65 Euro pro Tonne (Maier u. a., 2022).

Abbildung 14: Wirkungen auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Vergleich

Abweichung zum Referenz-Szenario in Mrd. EUR

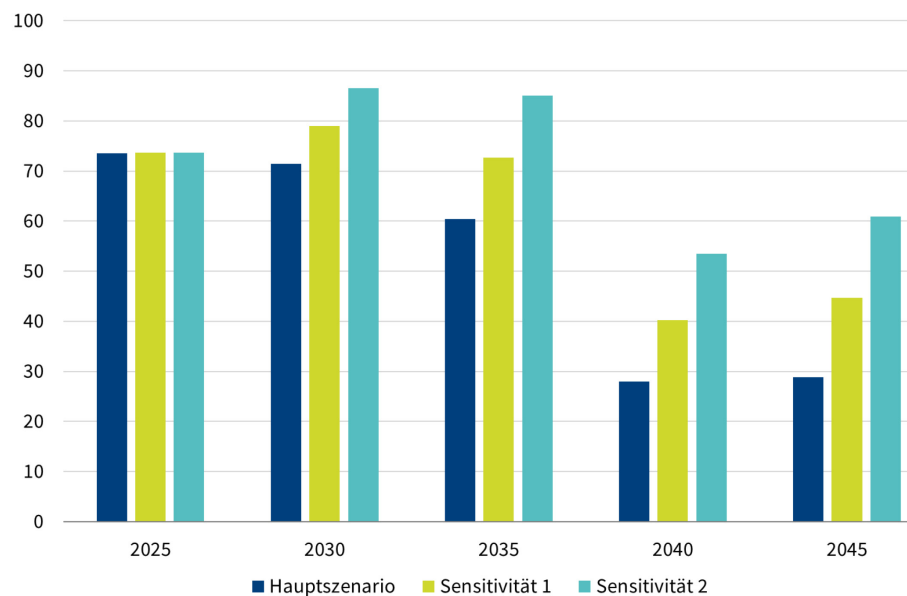


Quelle: Eigene Berechnungen.

Die Wirkung auf die Erwerbstätigen wird in Abbildung 15 verglichen. Durch die höhere inländische Wertschöpfung in den Sensitivitäten kommt es auch hier zu stärkeren positiven Wirkungen auf die Erwerbstätigen. Während die Erwerbstätigenzahl im Hauptszenario über den Projektionszeitraum hinweg um durchschnittlich rund 57.000 Personen höher liegt als im Referenz-Szenario, liegt sie in der Sensitivität 1 um durchschnittlich rund 66.000 Personen höher und in der Sensitivität 2 um durchschnittlich rund 76.000 Personen höher. Durch die geringeren Importkosten schwächen sich die negativen Wirkungen auf die Erwerbstätigenzahlen einerseits in den energieintensiven Branchen ab, wirken sich aber auch auf das gesamte allgemeine Preisniveau aus wodurch die realen verfügbaren Einkommen weniger stark belastet werden. Dies führt wiederum zu positiven indirekten Effekten bei Zuliefer- und Dienstleistungsunternehmen und erhöht die induzierte Nachfrage nach zusätzlichen Gütern und Dienstleistungen.

Abbildung 15: Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Vergleich

Abweichung zum Referenz-Szenario in Tsd. Personen



Quelle: Eigene Berechnungen.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das BIP und die Erwerbstätigenzahlen umso höher ausfallen, je günstiger Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden kann. Im Szenario-Vergleich sind dabei die relativen Kosten von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zu fossilen Energieträgern und Grundstoffen ausschlaggebend. Dabei werden die Kosten von Wasserstoff durch den Strompreis an den jeweiligen Herstellungsorten, Investitions- und Betriebskosten für die Elektrolyse, die Auslastung und Betriebsdauer der Anlagen, Kapitalkosten und Transportmöglichkeiten bestimmt. Im Falle der Wasserstoffderivate müssen zusätzliche Anlagen für deren Synthese aufgebaut und betrieben werden. Für die meisten Wasserstoffderivate – mit Ausnahme von Ammoniak – kommen die Kosten für die CO₂-Abscheidung aus der Luft oder aus Industrieanlagen hinzu. Werden die Derivate in Wasserstoff rückumgewandelt, muss zusätzliche Energie aufgebracht werden. Die Kosten für fossile Energieträger und Grundstoffe werden zukünftig auch von der Entwicklung der CO₂-Preise abhängen. Je stärker die Preise für fossile Energieträger und Grundstoffe steigen, desto wahrscheinlicher wird ein Preisvorteil für grünen Wasserstoff.

5 Schlussfolgerungen

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft geht mit Veränderungen für Wirtschaft und Arbeitsmarkt einher. So muss neben Produktionsanlagen für Wasserstoff und Wasserstoffderivate auch die entsprechende Infrastruktur für den Transport zu den Verbrauchsstandorten geschaffen werden. Auf der Verbrauchsseite müssen Investitionen in neue Technologien und gegebenenfalls Umstellungen in den Produktionsprozessen vorgenommen werden. Die vorliegende Analyse zeigt, unter den getroffenen Annahmen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft gegenüber dem Referenz-Szenario mit einem zusätzlichen Arbeitskräftebedarf einhergeht. Auf Basis von

Expert*inneninterviews wird davon ausgegangen, dass sich die Veränderungen auf dem Arbeitsmarkt innerhalb der bestehenden Berufsgruppen vollziehen. Für den Wasserstoffhochlauf wird mittelfristig vor allem eine höhere Zahl an Personen mit Bauberufen, Energietechniker*innen und Elektrotechniker*innen benötigt. In diesen Berufsgruppen kommt es bereits heute zu Engpässen auf dem Arbeitsmarkt und in vielen von ihnen wird sich das Arbeitskräfteangebot durch den demografischen Wandel voraussichtlich weiter verknappen (QuBe-Projekt, 2022).

Die Analyse hat weiter gezeigt, dass es im Wasserstoff-Szenario-v2.1 mittelfristig zu niedrigeren Erwerbstätigenzahlen in der Herstellung von chemischen Erzeugnissen kommt als im Referenz-Szenario. Die Chemieindustrie zählt zu den energieintensiven Industriezweigen und steht überdies vor der Herausforderung Erdöl in ihren Grundstoffen zu substituieren (Bundesregierung, 2023; Chemistry4Climate, 2023).

Die Nutzung von synthetischen, wasserstoffbasierten Grundstoffen in der Chemieindustrie erhöht den Wettbewerbsdruck auf internationalen Märkten für deutsche Unternehmen, wenn anderenorts weiterhin fossile Grundstoffe zu niedrigeren Kosten eingesetzt werden. Mit Blick auf das Wasserstoff-Szenario-v2.1 muss jedoch bedacht werden, dass keine explizite Wasserstoffnutzung in anderen Ländern außer Deutschland modelliert wurde und der negative Kosteneffekt für die deutsche Exportwirtschaft dadurch potenziell überschätzt werden könnte.

Wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, sind die Annahmen zu den Wasserstoffkosten ein wichtiger Einflussfaktor für die Richtung und Höhe der Wirkungen auf das BIP und den Arbeitsmarkt. Im Szenario-Vergleich spielt insbesondere die Kostendifferenz zu fossilen Energieträgern und Grundstoffen eine maßgebliche Rolle. Steigt der Preis fossiler Energieträger und Grundstoffe an, sei es durch geo- und handelspolitische Konflikte oder stark steigende CO₂-Preise, kann es selbst aus rein wirtschaftlichen Gründen vorteilhaft sein auf alternative Energieträger und Grundstoffe wie Wasserstoff umzusteigen. Auch dies kann am Beispiel der Chemieindustrie verdeutlicht werden: Durch die sinkende Kostendifferenz zwischen Wasserstoff und Erdöl im Zeitverlauf dreht sich der Effekt bei den Erwerbstätigen in dieser Branche gegen Ende des Projektionszeitraums um und sie kann einen leicht höheren Bedarf an Arbeitskräften als im Referenz-Szenario aufweisen.

Die zukünftige Entwicklung der Wasserstoffkosten unterliegt großen Unsicherheiten. Beim Import spielen auch die Transportmöglichkeiten eine wichtige Rolle. Bislang gibt es mit der „Suiso Frontier“ erst ein Schiff, das tiefgeköhlten, flüssigen Wasserstoff in kleineren Mengen transportieren kann (Hydrogen Council, 2022). Ein Transport im kommerziellen Maßstab konnte bislang noch nicht umgesetzt werden (Wurbs u. a., 2024). Sollte innerhalb des Projektionszeitraums eine Infrastruktur zum maritimen Transport von verflüssigtem Wasserstoff aufgebaut werden können, könnte dies die Kosten für den Schiffsimport von Wasserstoff aus weit entfernten, günstigen Produktionsstandorten reduzieren. Im aktuellen Wasserstoff-Szenario-v2.1 schlagen sich unter anderem die Kosten für die Rückumwandlung der per Schiff importierten Wasserstoffderivate in den hohen Importausgaben nieder.

Eine weitere Möglichkeit für einen – zumindest kurz- bis mittelfristig – günstigeren Wasserstoffeinsatz ist die Nutzung von blauem Wasserstoff. Blauer Wasserstoff wird zwar aus Erdgas hergestellt, die dabei entstehenden CO₂-Emissionen werden jedoch abgetrennt und (unterirdisch) gespeichert (carbon capture and storage, CCS) (BMBF, 2023). Im Februar 2024

wurden Eckpunkte einer Carbon Management Strategie durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz vorgelegt, wodurch der Transport und die Speicherung von CO₂ auch in Deutschland ermöglicht werden soll. Dies ist jedoch nur eine Ergänzung zum Ausstieg aus fossilen Energieträgern (BMWK, 2024a). In der Fortschreibung der NWS wird blauer Wasserstoff ebenfalls nur als Option für den Übergang hin zu einer vollständig grünen Wasserstoffwirtschaft genannt (BMWK, 2023a). Eine vorübergehende Nutzung von blauem Wasserstoff hätte für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 zwar einen mindernden Effekt auf die Wasserstoffkosten, aufgrund der Unsicherheiten zu verfügbaren Mengen kann dieser kostensenkende Effekt jedoch nur schwer quantifiziert werden und wird deshalb nicht in den Annahmen des vorliegenden Szenarios berücksichtigt.

Seitens der Politik wurden bereits mehrere Maßnahmen ergriffen, um die ökologische Transformation und den Wasserstoffhochlauf zu unterstützen. So können höhere Kosten für klimafreundliche Produktionsverfahren in der energieintensiven Industrie durch Klimaschutzverträge ausgeglichen werden. Dadurch entstehen beispielsweise Investitionsanreize für Wasserstoffproduktionsanlagen oder -pipelines (BMWK, 2024b). Um das Angebot und die Nachfrage nach grünem Wasserstoff voranzubringen, wurde die H2Global-Stiftung gegründet. Mit ihrem Doppelauktionsmodell überbrückt sie die Differenz zwischen Angebots- und Nachfragepreis. Die Preisdifferenz wird durch staatlich bereitgestellte Mittel ausgeglichen (BMWK, 2022d). H2Global wurde zwischenzeitlich mit der Europäischen Wasserstoffbank verzahnt, sodass alle EU-Regierungen an den Doppelauktionen teilnehmen können (BMWK, 2023d). Derartige Unterstützungsmaßnahmen können eine marktwirtschaftliche Dynamik in der Transformation anstoßen und sollten anschließend schrittweise reduziert werden (Weber, 2023).

Neben der Finanzierung bleibt die Rekrutierung, Aus- und Weiterbildung geeigneter Arbeitskräfte für die Energiewende ein wichtiges Thema. Um Engpässe zu reduzieren, sollte neben der entsprechenden Qualifizierung auch versucht werden, die Arbeitsmarktbeteiligung von Frauen, Älteren und Personen ohne deutsche Staatsbürgerschaft zu erhöhen. Weitere Stellschrauben sind die qualifizierte Einwanderung beziehungsweise das Verhindern der Abwanderung, aber auch die Steigerung der Produktivität und der Bürokratieabbau (Zika u. a., 2024).

Literatur

acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (2023): Wasserstoff Kompass. Das wichtigste in Kürze. Abruf am 09.10.2023. <https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#/das-wichtigste-in-kuerze>.

AEMO (2023): Australian Energy Market Operator. Abruf am 19.02.2024. <https://www.aemo.com.au/>.

Agora Industry und Umlaut (2023): Levelised cost of hydrogen. Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10_Trans4Real/A-EW_301_LCOH_WEB.pdf.

Allianz Research (2023): The green industrial revolution. Investment pathways to decarbonize the industrial sector in Europe. https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz_com/economic-research/publications/specials/en/2023/april/2023-04-05-Industry.pdf.

Bertoli, Simone; Goujon, Michaël und Santoni, Olivier (2017): The CERDI-seadistance database V1.1. Abruf am 11.12.2023. <https://zenodo.org/records/240493>.

BIBB, Bundesinstitut für Berufsbildung (2023a): H2PRO - Sind unsere Berufe H2-ready? Abruf am 22.01.2024. <https://www.bibb.de/de/153309.php>.

BIBB, Bundesinstitut für Berufsbildung (2023b): Transformation in der Chemie- und Raffinerieindustrie: Die Berufe sind fit! https://www.bibb.de/dokumente/pdf/h2pro-factsheet_06-23_chemie-und-raffinerieindustrie_web.pdf.

BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023): Wissenswertes zu Wasserstoff. Abruf am 14.12.2023. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>.

BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021): Bekanntmachung. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2021/10/2021-10-04-Bekanntmachung-Wasserstoff.html#:~:text=Derivate%20im%20Sinne%20dieser%20Richtlinie,%2C%20Ottokraftstoff%2C%20Diesel%20und%20Kerosin>.

BMDV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. Berlin. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile.

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

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024a): Bundesminister Habeck will den Einsatz von CCS ermöglichen: „Ohne CCS können wir unmöglich die Klimaziele erreichen.“.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240226-habeck-will-den-einsatz-von-ccs-ermoeglichen.html>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024b): Bundesminister Habeck: „Wegweisender Beschluss für energieintensive Industrie“.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240216-habeck-wegweisender-beschluss-fuer-energieintensive-industrie.html?view=renderNewsletterHtml>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023a): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023. Berlin.

https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023b): Internationale Wasserstoffzusammenarbeit. Abruf am 14.12.2023.

<https://www.bmwk.de/Navigation/DE/Wasserstoff/Internationale-Wasserstoffzusammenarbeit/internationale-wasserstoffzusammenarbeit.html>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023c): Rahmen für die Kraftwerksstrategie steht – wichtige Fortschritte in Gesprächen mit EU-Kommission zu Wasserstoffkraftwerken erzielt.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/08/20230801-rahmen-fuer-die-kraftwerksstrategie-steht.html>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023d): Wichtige Etappe für globalen Markthochlauf für grünen Wasserstoff: Bundesregierung und EU -Kommission machen H2Global zum europäischen Wasserstoff-Projekt.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/06/20230601-bundesregierung-und-eu-kommission-machen-h2global-zum-europaeischen-wasserstoff-projekt.html>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022a): Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier und NE-Metallindustrie. Berlin.

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/20220913-effiziente-nutzung-von-wasserstoff-in-der-glas-keramik-papier-und-ne-metallindustrie.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022b): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Berlin.

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/fortschrittsbericht-der-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022c): Habeck: „Erstes Importterminal für grünen Ammoniak kommt nach Hamburg - Standortentscheidung ist Wegmarke für Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft“.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/11/20221117-habeck-erstes-importterminal-fur-grunen-ammoniak-kommt-nach-hamburg-wegmarke-fur-hochlauf-der-wasserstoffwirtschaft.html>.

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022d): Was ist eigentlich H2 Global? Energiewende direkt (01/2022). <https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2022/01/Meldung/direkt-erklaert.html>.

Bültemeier, Hagen; Keßler, Benjamin; Hüttenrauch, Jens; Sperlich, Jonas; Kühn, Michael; Schlichtenmayer, Maurice; Wagler, Torsten; Kruck, Olaf; Schneider, Gregor-Sönke; Abdel Haq, Claudia; Bayer, Thomas; Faatz, Kerstin; Faber, Thomas; Frommhold, Andreas; Miersch, Detlef; Schwabe, Matthias; Städtke, Lothar und Zemke, Jochen (2022): Wasserstoff speichern – soviel ist sicher. Transformationspfade für Gasspeicher.

<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201926-abschlussbericht-transformation-ugs.pdf>.

Bundesagentur für Arbeit (2023): Engpassanalyse. Berichtsjahr 2022.

<https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Fachkraeftebedarf/Engpassanalyse-Nav.html>.

Bundesnetzagentur (2024): Aktuelle Lage Gasversorgung: Gaspreis Großhandel in EUR/MWh. Abruf am 12.02.2024.

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle_gasversorgung/svg/Gaspreise/Gaspreise.html.

Bundesnetzagentur (2023): SMARD | Marktdaten visualisieren. Abruf am 19.02.2024.

<https://www.smard.de>.

Bundesregierung (2024): Kraftwerksstrategie für wasserstofffähige Kraftwerke. Für eine klimafreundliche und sichere Energieversorgung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/kraftwerksstrategie-2257868>.

Bundesregierung (2023): Chemie-Spitzengespräch am 27. September 2023.

<https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/pressemitteilungen/chemie-spitzengespraech-am-27-september-2023-2226128>.

Chemistry4Climate (2023): Wie die Transformation der Chemie gelingen kann.

<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschue-langfassung-es.pdf>.

Deutscher Bundestag (2023a): Steuerbare Kraftwerke.

<https://dserver.bundestag.de/btd/20/087/2008718.pdf>.

Deutscher Bundestag (2023b): Tankinfrastruktur für Wasserstoff-Schwerlastverkehr und Wasserstoffbusse. <https://dserver.bundestag.de/btd/20/086/2008683.pdf>.

DNV, Det Norske Veritas (2019): Energy Transition Outlook 2019: A global and regional forecast to 2050. Technical Report.

E-Bridge Consulting GmbH (2023): Hydex & HydexPLUS – Kostenindizes für Wasserstoff. Abruf am 19.02.2024. <https://e-bridge.de/kompetenzen/wasserstoff/h2index/>.

Ember (2023): Data into action. Abruf am 19.02.2024. www.ember-climate.org.

ENTSO-E, European Network of Transmission System Operators for Electricity (2023): Transparency Platform. Abruf am 19.02.2024. <https://transparency.entsoe.eu/>.

EPIAŞ, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (2023): Şeffaflık Platformuna. Abruf am 19.02.2024. <https://seffaflik.epias.com.tr/>.

EU, Europäische Union (2023a): Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Nutzung erneuerbarer und kohlenstoffarmer Kraftstoffe im Seeverkehr und zur Änderung der Richtlinie 2009/16/EG. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/de/pdf>.

EU, Europäische Union (2023b): Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr (Initiative „ReFuelEU Aviation“). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-29-2023-INIT/de/pdf>.

Europäische Kommission, Vertretung in Deutschland (2023): EU-Kommission legt Definition von erneuerbarem Wasserstoff vor. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-legt-definition-von-erneuerbarem-wasserstoff-vor-2023-02-13_de.

FNB Gas (2023): Entwurf des gemeinsamen Antrags für das Wasserstoff-Kernnetz. https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2023/11/2023_11_15_Entwurf_Antrag_Wasserstoff-Kernnetz_final.pdf.

FNB Gas, Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (2022): Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032. Zwischenstand. https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2022/07/2022_07_06_NEP-Gas-2022-2032-Zwischenstand.pdf.

Fraunhofer ISI (2022): Langfristszenarien: T45-Szenarien. Abruf am 28.11.2023. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.

Fraunhofer ISI, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Verkehr. <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/32b53493-fadc-4bb0-bc02-0a8db0704160/content>.

GWS, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (2023): Wertschöpfung und Beschäftigung in der saarländischen Wasserstoffwirtschaft. Abruf am 22.01.2024. <https://www.gws-os.com/de/die-gws/news/detail/wertschoepfung-und-beschaeftigung-in-der-saarlaendischen-wasserstoffwirtschaft>.

Hydrogen Council (2022): Auf zu einer neuen Ära der Wasserstoffenergie: Suiso Frontier, gebaut von der japanischen Kawasaki Heavy Industries. <https://hydrogencouncil.com/de/toward-a-new-era-of-hydrogen-energy-suiso-frontier-built-by-japans-kawasaki-heavy-industries/>.

IEA, International Energy Agency (2023): Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database. Abruf am 01.12.2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>.

IEA, International Energy Agency (2021): Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.

IEA, International Energy Agency (2019): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.

IEX, Indian Energy Exchange (2023): Prices at IEX. Abruf am 19.02.2024. <https://www.iexindia.com/marketdata/areaprice.aspx>.

Löffler, Markus und Marquardt, Ralf-M. (2023): Wie viele Wasserstoff-Kraftwerke erfordert die Energiewende und wie erhalten wir sie? Wirtschaftsdienst 103 (10):689-697. doi: <https://doi.org/10.2478/wd-2023-0191>.

Maier, Tobias; Kalinowski, Michael; Zika, Gerd; Schneemann, Christian; Mönnig, Anke und Wolter, Marc Ingo (2022): Es wird knapp. Ergebnisse der siebten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040. Bonn. <https://www.bibb.de/dienst/publikationen/de/download/18168>.

Merten, Frank und Scholz, Alexander (2023): Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarfen für die CO2-neutrale Transformation. Wuppertal. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8344/file/8344_Wasserstoffkosten.pdf.

Mönnig, Anke; Ronsiek, Linus; Samray, David; Schneemann, Christian; Schur, Alexander und Zenk, Johanna (2024 im Erscheinen): Grüner Wasserstoff und energieintensive Industrien. Bundesinstitut für Berufsbildung.

Moritz, Michael; Schönfisch, Max und Schulte, Simon (2021): Globales PtX-Produktions- und Importkostentool: EWI Global PtX Cost Tool V1.3. <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/tools/globales-ptx-produktions-und-importkostentool/>.

Neuwirth, Marius; Fleiter, Tobias; Manz, Pia und Hofmann, René (2022): The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. Energy Conversion and Management 252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115052>.

Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk (2022): Wilhelmshaven Green Energy Hub. Abruf am 01.12.2023. <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/wilhelmshaven-green-energy-hub/>.

Niediek, Silvia (2023): Grünen Wasserstoff international erschließen. BWP 4/2023, S. 47–48. <https://www.bibb.de/dokumente/pdf/BWP-2023-H4-47f.pdf>.

Nord Pool AS (2023): Market Data. Abruf am 19.02.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/>.

PWC, PricewaterhouseCoopers GmbH (2023): Kapitalmarktdaten Versorgungsbetriebe. <https://evaluationdata.pwc.de/kapitalmarktdaten-versorgungsbetriebe/>.

QuBe-Projekt (2022): QuBe-Datenportal Ergebnisse. Abruf am 28.02.2024. www.qube-datenportal.de.

Ragwitz, Mario; Weidlich, Anke; Biermann, Dirk; Brandes, Julian; Brown, Tom; Burghardt, Céilia; Dütschke, Elisabeth; Erlach, Berit; Fishedick, Manfred; Fuss, Sabine; Geden, Oliver; Gierds, Jörn; Herrmann, Ulrike; Jochem, Patrick; Kost, Christoph; Luderer, Gunnar; Neuhoff, Karsten; Schäfer, Mirko; Wagemann, Kurt; Wiese, Frauke; Winkler, Jenny; Zachmann, Bastian und Zheng, Lin (2023): Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologie-umbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement. München. doi: https://doi.org/10.48669/esys_2023-3.

Rat der EU, Rat der Europäischen Union (2023a): Infrastruktur für alternative Kraftstoffe: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt für mehr Ladestationen und Tankstellen in ganz Europa. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/alternative-fuels-infrastructure-council-adopts-new-law-for-more-recharging-and-refuelling-stations-across-europe/>.

Rat der EU, Rat der Europäischen Union (2023b): Initiative „FuelEU Maritime“: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Seeverkehrs.

<https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>.

Rat der EU, Rat der Europäischen Union (2023c): Initiative „ReFuelEU Aviation“: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors.

<https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>.

Ronsiek, Linus; Mönnig, Anke; Schneemann, Christian; Zenk, Johanna; Schroer, Jan Philipp und Schur, Alexander Christian (2022): Potentielle Partnerländer für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. Bonn. https://res.bibb.de/vet-repository_780607.

Rose, Philipp; Wietschel, Martin und Gnann, Till (2020): Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen? <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/2472549c-0b7e-4ec8-97e7-5e26a7f4cbd2/content>.

RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG) (2023): RWE-Projekte am Standort Brunsbüttel. Aktuelle Bauvorhaben für Flüssigerdgas und Wasserstoffderivate. Abruf am 01.12.2023. <https://www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/projektvorhaben/projektstandort-brunsbuettel/>.

Schlichtmann, Erik; Buwidowitsch, Eugen; Thomas, Andre; Leydolph, Richard; Straßburg, Steffen; Romano, Marie-Sophie und Lenz, Konstantin (2022): Wasserstoffnachfragepotentiale bis zum Jahr 2050 in Deutschland und der Europäischen Union. https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/GTI/Dokumente_GE/forschung/lenz/fp-2022-wasserstoffnachfragepotentiale.pdf.

Schur, Alexander Christian; Mönnig, Anke; Ronsiek, Linus; Schneemann, Christian; Schroer, Jan Philipp und Zenk, Johanna (2023): Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette "Wasserstoff". Abschlussbericht der ersten Projektphase. Bonn. https://res.bibb.de/vet-repository_781481.

Seyda, Susanne und Placke, Beate (2020): IW-Weiterbildungserhebung 2020: Weiterbildung auf Wachstumskurs. IW-Trends 4/2022 47. Jg. (4), S. 3–21. <https://www.iwkoeln.de/studien/susanne-seyda-beate-placke-weiterbildung-auf-wachstumskurs-493427.html>.

Smolinka, Tom; Wiebe, Nikolai; Sterchele, Philip; Palzer, Andreas; Lehner, Franz; Jansen, Malte; Kiemel, Steffen; Miehe, Robert; Wahren, Sylvia und Zimmermann, Fabian (2018): Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf.

SPD; Bündnis 90 / Die Grünen und FDP (2021): 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). Berlin. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.

Staiß, Frithjof; Adolf, Jörg; Ausfelder, Florian; Erdmann, Christoph; Fishedick, Manfred; Hebling, Christopher; Jordan, Thomas; Klepper, Gernot; Müller, Thorsten; Palkovits, Regina; Poganietz, Witold-Roger; Schill, Wolf-Peter; Schmidt, Maike; Stephanos, Cyril; Stöcker, Philipp; Wagner, Ulrich; Westphal, Kirsten und Wurbs, Sven (2022): Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse. München. https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/Analyse_Wasserstoff_neu.pdf.

Statista (2023): Average market price of electricity in Chile. Abruf am 19.02.2024. <https://www.statista.com/statistics/1029737/chile-electricity-average-market-price/#:~:text=Chile%E2%80%99s%20electricity%20market%20price%20has%20been%20on%20an,on%20a%20four-month%20average%20ending%20in%20this%20month%29>.

Stegg, Stefanie; Helmrich, Robert; Maier, Tobias; Schroer, Jan Philipp; Mönnig, Anke; Wolter, Marc Ingo; Schneemann, Christian und Zika, Gerd (2022): Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem; eine erste Bestandsaufnahme. BIBB Discussion Paper:30. https://res.bibb.de/vet-repository_779809.

TransnetBW (2023): Anreizwirkung Neubau-Vorschuss. <https://www.transnetbw.de/Resources/Persistent/b/d/7/9/bd793c1560aac21d8ee3f2ae3a0be49fe4c0e54c/Enervis-Studie%20Anreizwirkung%20Neubau-Vorschuss%2024.03.2023.pdf>.

UBA, Umwelt Bundesamt (2022): Kurzeinschätzung von Ammoniak als Energieträger und Transportmedium für Wasserstoff. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/uba_kurzeinschätzung_von_ammoniak_als_energietraeger_und_transportmedium_fuer_wasserstoff.pdf.

UBA, Umwelt Bundesamt (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf.

Uniper (2022): Green-Wilhelmshaven: Auf zu neuen Horizonten. Abruf am 01.12.2023. <https://www.uniper.energy/de/loesungen/energy-transformation-hubs/energy-transformation-hub-nordwest/green-wilhelmshaven>.

van Rossum, Rik; Jens, Jaro; La Guardia, Gemma; Wang, Anthony; Kühnen, Luis und Overgaag, Martijn (2022): European Hydrogen Backbone. A European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries. <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.

vbw und Prognos, Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. und Prognos AG (2023a): Internationaler Energiepreisvergleich für die Industrie. https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2023/Downloads/vbw-Studie_Internationaler-Energiepreisvergleich_Oktober-2023.pdf.

vbw und Prognos (2023b): Strompreisprognose. https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2023/Downloads/vbw_Strompreisprognose_Juli-2023-3.pdf.

VDI, Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2022): Stahl: Diese Anlagentechnik wird bei Thyssenkrupp und Co. den Hochofen ablösen. VDI nachrichten. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-anlagentechnik-wird-bei-thyssenkrupp-und-co-den-hochofen-abloesen/>.

Weber, Enzo (2023): Grüne Energie ist die Zukunft der deutschen Industrie. IAB-Forum. <https://www.iab-forum.de/gruene-energie-ist-die-zukunft-der-deutschen-industrie/>.

Welt (2022): Hamburg bekommt erstes Terminal für grünen Ammoniak. Abruf am 01.12.2023. <https://www.welt.de/regionales/hamburg/article242186455/Erneuerbare-Energien-Hamburg-bekommt-erstes-Terminal-fuer-gruenen-Ammoniak.html>.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022): Nationale Wasserstoffstrategie 2.0: Handlungsbedarf aus Sicht der Stahlindustrie. Berlin. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/221125_NWS-2.0-Handlungsbedarf-aus-Sicht-der-Stahlindustrie.pdf.

Wurbs, Sven; Stöcker, Philipp; Gierds, Jörn; Stemmler, Christoph; Fishedick, Manfred; Henning, Hans-Martin; Matthies, Ellen; Pittel, Karen; Renn, Jürgen; Sauer, Dirk Uwe und Spiecker genannt Döhmann, Indra (2024): Wasserstoff – Welche Bedeutung hat er im Energiesystem der Zukunft? (Kurz erklärt!). doi: https://doi.org/10.48669/esys_2024-1.

Zenk, Johanna; Mönnig, Anke; Ronsiek, Linus; Schneemann, Christian; Schur, Alexander Christian und Steeg, Stefanie (2023a): Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030. BIBB Discussion Paper: 55. https://res.bibb.de/vet-repository_780958.

Zenk, Johanna; Ronsiek, Linus; Schur, Alexander Christian; Hupp, Jonas; Schneemann, Christian; Mönnig, Anke und Schroer, Jan Philipp (2023b): Exportpotenziale von Wasserstofftechnologien. Bonn. https://res.bibb.de/vet-repository_780966.

Zika, Gerd; Hummel, Markus; Maier, Tobias und Wolter, Marc Ingo (Hrsg.) (2023): Das QuBe-Projekt: Modelle, Module, Methoden. Bielefeld. Wbv. Doi: <https://doi.org/10.3278/9783763973712>.

Zika, Gerd; Kalinowski, Michael; Krinitz, Jonas; Maier, Tobias; Mönnig, Anke; Schneemann, Christian; Schur, Alexander; Wolter, Marc Ingo und Zenk, Johanna (2024): Szenarien über die Erhöhung des Arbeitskräftepotenzials. https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Forschungsberichte/fb631-szenarien-ueber-die-erhoehung-des-arbeitskraeftepotenzials.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Anhang

A1 Wasserstoffbedarf

Für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 wurden folgende Bedarfe berücksichtigt:

Tabelle A1: Überblick über die Wasserstoffbedarfe im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Bereich	2030	2045	Quelle
Stahlindustrie	24,0 TWh	73,4 TWh	Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022)
Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie	3,5 TWh	11,2 TWh	BMWK (2022a)
Zementindustrie	0,7 TWh	5,5 TWh	in Anlehnung an Schlichtmann u. a. (2022)
Chemieindustrie	36,1 TWh	247,0 TWh	Chemistry4Climate (2023)
Energieversorgung	35,9 TWh	103,5 TWh	Eigene Berechnung, siehe unten
Straßenverkehr	0,2 TWh	51,0 TWh	Eigene Berechnung, siehe unten
Synthetische Kraftstoffproduktion	5,8 TWh	9,5 TWh	Eigene Berechnung, siehe Anhang A8

Energieversorgung

Für den Wasserstoffbedarf im Bereich der Energieversorgung wurde sich auf die Ausschreibevolumen für Wasserstoff-Sprinter-Kraftwerke, Wasserstoff-Hybrid-Kraftwerke sowie H2-Ready-Kraftwerke gemäß dem Rahmen für die Kraftwerksstrategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz vom 01.08.2023 bezogen (BMWK, 2023c). Demnach sollten bis spätestens 2035 Kapazitäten in Höhe von 23,8 GW geschaffen werden. Um den sich daraus ergebenden Wasserstoffbedarf zu berechnen, wurde gemäß (Löffler und Marquardt, 2023) angenommen, dass die Wasserstoff-Kraftwerke mit einem Wirkungsgrad von 40 Prozent und 1.600 Volllaststunden betrieben werden. Für die Modellierung des Ausbaupfad wurde die Antwort auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU zu Steuerbaren Kraftwerken herangezogen (Deutscher Bundestag, 2023a).

Zwischen der Berechnung des Szenarios und der Veröffentlichung dieses Berichts wurde die Einigung zur Kraftwerksstrategie veröffentlicht, gemäß derer nur noch Kapazitäten in Höhe von bis zu 10,0 GW als H2-Ready-Kraftwerke kurzfristig ausgeschrieben werden sollen (Bundesregierung, 2024). Entsprechend liegt der Wasserstoffbedarf für die Energieversorgung im Wasserstoff-Szenario-v2.1, vor allem in der mittleren Frist, tendenziell höher als nach aktuellerem Planungsstand zu erwarten ist.

Straßenverkehr

Für den Straßenverkehr wird von einer Wasserstoffnutzung im Bereich des Schwerlastverkehrs ausgegangen. Zur Abschätzung des entsprechenden Wasserstoffbedarfs wurde das Szenario T45-H2 des Fraunhofer ISI (2022) herangezogen und zunächst berechnet, welchen Anteil Brennstoffzellen-LKW im Schwerlastverkehr am gesamten LKW-Bestand des Szenarios haben.

Dieser Anteil wurde anschließend für die LKW-Flotte im QuBe-Basissszenarios der siebten Welle (Maier u. a., 2022) übernommen. Einem Arbeitspapier des Fraunhofer Instituts zum Tankstellenaufbau zufolge, verbraucht ein schwerer Brennstoffzellen-LKW jährlich rund 6 Tonnen (0,0002 TWh) Wasserstoff (Rose, Wietschel und Gnann, 2020). Der Wasserstoffbedarf für den Straßenverkehr im Wasserstoff-Szenario-v2.1 ergibt sich aus der Multiplikation der berechneten Brennstoff-LKW-Flotte mit dem jährlichen Wasserstoffverbrauch pro Brennstoffzellen-LKW.

A2 Inländische Wasserstoffherzeugung

Das nationale Ausbauziel der Elektrolyseleistung bis 2030 wird im Koalitionsvertrag 2021-2025 (SPD, Bündnis 90 / Die Grünen und FDP, 2021) und der NWS 2023 (BMWK, 2023a) von fünf auf zehn GW erhöht. Diese Zielvorgabe dient auch als Eckwert für das Wasserstoff-Szenario-v.2.1. Der Ausbaupfad der Elektrolyseleistung bis 2045 orientiert sich an der Marktabfrage im Rahmen des Netzentwicklungsplans Gas (FNB Gas, 2022) und erreicht 2045 eine Leistung von rund 43 GW. Unter Berücksichtigung von Wirkungs- und Nutzungsgrad der Elektrolyseure kann die Wasserstoffherzeugung in TWh ermittelt werden. Für den Wirkungsgrad werden Prognosen der IEA (2019) und Marktanteile verschiedener Technologien gemäß NOW GmbH (Smolinka u. a., 2018) herangezogen. Der Wirkungsgrad erhöht sich demnach kontinuierlich von 65 Prozent im Jahr 2019 auf 68 Prozent im Jahr 2030 und schließlich auf 73 Prozent im Jahr 2045. Für den Nutzungsgrad werden 4.000 Volllaststunden angenommen (BMW, 2020). Die gesamte jährliche Wasserstoffherzeugung in TWh errechnet sich daraus wie folgt:

$$(1) \text{ Wasserstoffherzeugung}_t^{TWh} = \frac{\text{Elektrolysekapazität}_t^{GW}}{1000} * \text{Wirkungsgrad}_t * 4000^h$$

Zur Erzeugung von grünem Wasserstoff wird Strom aus erneuerbaren Energien (EE) benötigt. Die zusätzlich benötigte Strommenge ergibt sich aus der Multiplikation der installierten Elektrolysekapazität mit den veranschlagten Volllaststundenzahl:

$$(2) \text{ Benötigte Strommenge aus EE}_t^{TWh} = \frac{\text{Elektrolysekapazität}_t^{GW}}{1000} * 4000^h$$

Damit keine Verdrängung der erneuerbaren Energien für die Anwendung in anderen Bereichen wie beispielsweise für den Verkehr oder für Wärme stattfindet, wird für das Wasserstoff-Szenario unterstellt, dass die benötigte Strommenge zusätzlich erzeugt wird. Dies wird mit dem Delegated Act der Europäischen Union begründet, der in der aktuellen Fassung zusätzliches Energieaufkommen für die Wasserstoffproduktion verlangt (Europäische Kommission, 2023).

A3 Umrüstungsinvestitionen

Neben den notwendigen Investitionen für die Herstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren, fallen durch die notwendige Anpassung der Produktionsprozesse auch Umrüstungsinvestitionen an. Bis 2045 kumulieren sich die Umrüstungsinvestitionen für verschiedene Bereiche im Wasserstoff-Szenario-v2.1 annahmegemäß auf folgende Werte:

Tabelle A2: Überblick über die Umrüstungsinvestitionen im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Bereich	Prozess	2045	Quelle
Stahlindustrie	Ersatz von Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen	16,7 Mrd. EUR	VDI (2022)
Energieversorgung	Wasserstoff-Kraftwerke gemäß Annahme in Anhang A1	15,6 Mrd. EUR	BMW (2023c) und TransnetBW (2023)
Chemieindustrie	Defossilisierung bestehender Prozesse	9,3 Mrd. EUR	Allianz Research (2023)

Für alle anderen Branchen werden keine zusätzlichen Umrüstungsinvestitionen angenommen. Zumeist sind die Wasserstoffeinsätze sehr gering. Zudem wird angenommen, dass die notwendigen Investitionen durch die nicht anfallenden Investitionen in die Erneuerung, Instandhaltung oder Modernisierung von bestehenden Produktionsprozessen ausgeglichen werden.

A4 Wasserstoffgestehungskosten

Die Gestehungskosten von Wasserstoff (engl. „levelized cost of hydrogen“, LCOH) mittels Elektrolyse werden anhand folgender Formel in der Einheit EUR/kWh ermittelt:

$$(3) \text{ LCOH}_t^{T_{CAP}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\eta_{T_{CAP}}} \left(\left(\frac{r_{T_{CAP}}}{100} * \left(1 + \frac{r_{T_{CAP}}}{100} \right)^n + \frac{OPEX_{T_{CAP}}}{100} \right) \frac{CAPEX_{T_{CAP}}}{VLH_{T_{CAP}}} + S_t \right), \text{ wenn } t - T_{CAP} < n \\ \frac{1}{\eta_{T_{CAP}}} \left(\frac{OPEX_{T_{CAP}}}{100} \frac{CAPEX_{T_{CAP}}}{VLH_{T_{CAP}}} + S_t \right), \text{ wenn } t - T_{CAP} \geq n \end{array} \right\}$$

für $T_{CAP} \leq t$

LOHC	Wasserstoffgestehungskosten [EUR/kWh]	CAPEX	Investitionskosten [EUR/kW]
η	Wirkungsgrad [%]	VLH	Volllaststunden [h]
r	Kapitalzins (WACC) [%]	S	Großhandelsstrompreis [EUR/kWh]
n	Nutzungsdauer/Abschreibungszeitraum [a]	t	Jahr
OPEX	Betriebskosten [% CAPEX/a]	T_{CAP}	Anschaffungsjahr des Elektrolyseurs

Für die Variablen in Gleichung (3) wurden folgende Annahmen für die Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland getroffen:

Tabelle A3: Überblick über die Annahmen zur Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland

Variable	2030	2045	Quelle
Wirkungsgrad (η)	68 Prozent	73 Prozent	IEA (2019) und Smolinka u. a. (2018)
Kapitalzins (r)	4,9 Prozent	4,9 Prozent	PWC (2023) und Moritz, Schönfish und Schulte (2021)
Nutzungsdauer der Elektrolyseure (n)	20 Jahre	20 Jahre	E-Bridge Consulting GmbH (2023) und Ragwitz u. a. (2023)
Betriebskosten der Elektrolyseure (OPEX)	3,25 Prozent	3,25 Prozent	Agora Industry und Umlaut (2023)
Investitionskosten für Elektrolyseure (CAPEX)	585 EUR/kW	325 EUR/kW	in Anlehnung an Merten und Scholz (2023)
Volllaststunden (VLH)	4.000 Stunden	4.000 Stunden	BMWi (2020)
Großhandelsstrompreis (S)	0,08 EUR/kWh	0,06 EUR/kWh	Eigene Berechnungen anhand von Bundesnetzagentur (2023) und vbw und Prognos (2023b)

Analog berechnen sich die Wasserstoffgestehungskosten im Ausland. Hierzu wurden die Kapitalzinsen und Großhandelsstrompreise für Länder ermittelt, die einerseits für den Wasserstoffimport per Pipeline und andererseits für den Import von Wasserstoff in Form von Derivaten per Schiff von Relevanz sind und, ceteris paribus, die mittleren Wasserstoffgestehungskosten berechnet. Für den Pipelineimport wurden die Länder berücksichtigt, die laut Moritz, Schönfish und Schulte (2021) für eine Pipelineanbindung in Frage kommen. Für den Schiffsimport wurden die außereuropäischen Länder ausgewählt, mit denen Deutschland eine Energiepartnerschaft abgeschlossen hat (BMWK, 2023b) und davon die zehn günstigsten Produktionsstandorte gemäß Moritz, Schönfish und Schulte (2021) berücksichtigt. Für die Variablen in Gleichung (3) wurden folgende abweichende Annahmen für die Erzeugung von Wasserstoff im Ausland getroffen:

Tabelle A4: Überblick über die abweichenden Annahmen zur Erzeugung von Wasserstoff im Ausland

Variable	2030	2045	Quelle
Kapitalzins (r) für Länder mit Pipelineimport	6,9 Prozent	6,9 Prozent	Moritz, Schönfish und Schulte (2021)
Kapitalzins (r) für Länder mit Schiffsimport	7,0 Prozent	7,0 Prozent	Moritz, Schönfish und Schulte (2021)
Großhandelsstrompreis (S) für Länder mit Pipelineimport	0,06 EUR/kWh	0,05 EUR/kWh	Bundesnetzagentur (2023); Ember (2023); ENTSO-E (2023); Nord Pool AS (2023); EPIAŞ (2023); AEMO (2023); vbw und Prognos (2023a); Statista (2023); IEX (2023); Moritz, Schönfish und Schulte (2021); DNV (2019)
Großhandelsstrompreis (S) für Länder mit Schiffsimport	0,07 EUR/kWh	0,06 EUR/kWh	

A5 Wasserstoffimportkosten

Die Kosten für den Wasserstoffimport setzen sich aus den Wasserstoffgestehungskosten im Ausland und den Transportkosten zusammen. Beim Import von Wasserstoffderivaten per Schiff werden im Wasserstoff-Szenario-v2.1 zusätzlich die Produktionskosten der Wasserstoffderivate im Ausland und die Kosten für die Rückumwandlung in Wasserstoff nach dem Import berücksichtigt. Die Produktionskosten der Wasserstoffderivate werden wiederum bedingt durch den Strompreis aus Anhang A4 und, im Falle von grünem Methan, den CO₂-Kosten aus Luftabscheidung. Folgende Annahmen werden berücksichtigt:

Tabelle A5: Überblick über die Annahmen zum Wasserstoffimport im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Variable	2030	2045	Quelle
Transportdistanz Pipeline	1.500 km	1.500 km	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
Transportdistanz Schiff	10.000 km	10.000 km	Eigene Berechnung anhand von Bertoli, Goujon und Santoni (2017)
Transportkosten Pipeline	0,01 EUR/MWh/km	0,01 EUR/MWh/km	Staiß u. a. (2022) und van Rossum u. a. (2022)
Transportkosten Schiff (Ammoniak)	0,001 EUR/MWh/km	0,001 EUR/MWh/km	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
Transportkosten Schiff (Methan)	0,002 EUR/MWh/km	0,002 EUR/MWh/km	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
Energiebedarf Ammoniakproduktion	0,29 kWh _{el} /kWh _{NH₃}	0,29 kWh _{el} /kWh _{NH₃}	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
Energiebedarf Methanproduktion	0,01 kWh _{el} /kWh _{NH₃}	0,01 kWh _{el} /kWh _{NH₃}	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
CO ₂ -Bedarf Methanproduktion	0,2 kg _{CO₂} /kWh _{SNG}	0,2 kg _{CO₂} /kWh _{SNG}	Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
CO ₂ -Kosten (DAC)	0,2 EUR/kg	0,2 EUR/kg	Eigene Berechnung anhand von Moritz, Schönfisch und Schulte (2021) und der Strompreise in Anhang A4
Energieverlust Rückumwandlung Ammoniak	19 Prozent	19 Prozent	UBA (2022)
Energieverlust Rückumwandlung Methan	33 Prozent	33 Prozent	Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk (2022)

Die Importkosten für Wasserstoffderivate berechnen sich anhand folgender Formel:

$$(4) \text{ Importkosten}_t^{\frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}} = \left(\text{Produktionskosten}_t^{\frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}} + \left(\text{Transportkosten}_t^{\frac{\text{EUR}}{\text{kWh} \cdot \text{km}}} * \right. \right. \\ \left. \left. \text{Transportdistanz}_t^{\text{km}} \right) \right) * (1 + \text{Umwandlungsverlust}_t)$$

A6 Wasserstoffinfrastruktur

Importterminals

In der Fortschreibung der NWS 2023 rückt der Import von Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten per Schiff stärker in den Fokus (BMWK, 2023a). Für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 wurden deshalb die Informationen zu angekündigten Hafenprojekten aktualisiert und die Art des Imports genauer im Modell abgebildet. Berücksichtigt wurden hierbei folgende Projekte:

Tabelle A6: Überblick über die berücksichtigten Hafenprojekte im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Projektname und -standort	Art des Imports	Geplanter Betriebsbeginn	Quelle
RWE Ammoniak-Importterminal in Brunsbüttel	Grünes Ammoniak	2026	RWE (2023)
Air Products und Mabanafit Ammoniak-Importterminal in Hamburg	Grünes Ammoniak	2026	BMWK (2022c) und Welt (2022)
Uniper Green Wilhelmshaven	Grünes Ammoniak	Ende der 2020er Jahre	Uniper (2022)
TES Green Energy Hub in Wilhelmshaven	Grünes Methan	2026	Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk (2022)

Wasserstoffpipelines

Die Annahmen zum Pipelinenetz basieren bis zum Jahr 2032 auf dem Planungsstand des Wasserstoff-Kernnetzes vom 15. November 2023. Die dort beschriebene Modellierung zeigt ein Pipelinenetz von 9.721 km bis 2032. Die Ausspeisekapazität dieses Pipelinenetzes beläuft sich auf 279 TWh (FNB Gas, 2023). Um den langfristigen Ausspeisebedarf von rund 500 TWh Wasserstoff in 2045 per Pipeline decken zu können, müssen somit insgesamt rund 18.000 km Pipeline für die Wasserstoffverteilung zur Verfügung stehen. Die umgerüsteten und neugebauten Pipeline-Kilometer sowie die dazugehörigen Investitionskosten teilen sich wie folgt auf:

Tabelle A7: Überblick über die Annahmen zum Pipelinenetz im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Annahme	2030	2045	Quelle
Neugebaute Pipelines (kumuliert)	2.678 km	12.602 km	Eigene Berechnungen in Anlehnung an (FNB Gas, 2023)
Umgearüstete Pipelines (kumuliert)	3.685 km	5.400 km	Eigene Berechnungen in Anlehnung an (FNB Gas, 2023)
Investitionskosten (kumuliert)	13, 0 Mrd. EUR	27,5 Mrd. EUR	Eigene Berechnungen in Anlehnung an (FNB Gas, 2023)

Wasserstoffspeicher

Für die Speicherung von Wasserstoff berücksichtigt werden Salzkavernen, die vor allem zur saisonalen Speicherung geeignet sind. Der Speicherbedarf wird im Wasserstoff-Szenario-v2.1 an den Wasserstoffbedarf der Energieversorger gekoppelt. Gemäß Bültemeier u. a. (2022) können ab 2027 Salzkavernen, die bislang für die Speicherung von Erdgas genutzt wurden, für die Wasserstoffspeicherung umgerüstet und dadurch 31 TWh Speicherkapazität zur Verfügung

gestellt werden. Umrüstungs- und Neubauinvestitionen belaufen sich bis 2030 auf kumulierte 2,5 Mrd. Euro und bis 2045 auf 20,7 Mrd. Euro. Porenspeicher, die in Bültmeier u. a. (2022) ebenfalls für eine Umrüstung in Frage kommen, sind im Wasserstoff-Szenario-v2.1 nicht mehr berücksichtigt, da deren geologische Eignung für die Wasserstoffspeicherung gemäß Expert*inneninterviews nicht abschließend geklärt ist.

Wasserstofftankstellen

Im September 2023 waren 18 öffentliche Wasserstofftankstellen mit einer Druckstufe von 350 bar für die Betankung von schweren Nutzfahrzeugen und Wasserstoffbussen in Betrieb. Bis 2026 rechnet die Bundesregierung mit einer Inbetriebnahme von über 100 Tankstellen gemäß EU-Vorgaben zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) (Deutscher Bundestag, 2023b). Um den Schwerlastverkehr im Wasserstoff-Szenario-v2.1 mit ausreichend Wasserstoff versorgen zu können, werden bis 2045 weitere 70 Tankstellen benötigt, wozu auch XXL-Tankstellen zählen, die bis zu 600 Fahrzeuge pro Tag betanken können. Die Investitionskosten werden anhand der ausgebauten Kapazitäten berechnet und belaufen sich im Wasserstoff-Szenario-v2.1 bis 2030 auf kumulierte 5,1 Mrd. Euro und bis 2045 auf 7,1 Mrd. Euro (eigene Berechnungen anhand von Rose, Wietschel und Gnann (2020)).

A7 Technologieexport

Unter Berücksichtigung der Elektrolyseprojekte in der Projektdatenbank der IEA (2023), der langfristig benötigten Elektrolysekapazität aus dem IEA Net Zero Szenario (IEA, 2021) sowie einem Weltmarktanteil deutscher Hersteller von zehn Prozent an den globalen Elektrolyseurverkäufen (BMW, 2022b), berechnen sich die zusätzlichen Technologieexporte wie folgt:

$$(1) \text{ Wasserstofftechnologieexporte}_t^{\text{Mrd. EUR}} = ((\text{Globale Elektrolysekapazität}_t^{\text{GW}} - \text{Elektrolysekapazität in DE}_t^{\text{GW}}) - (\text{Globale Elektrolysekapazität}_{t-1}^{\text{GW}} - \text{Elektrolysekapazität in DE}_{t-1}^{\text{GW}})) * 0,1 * \left(\frac{\text{Investitionskosten Elektrolyseur}_t^{\text{EUR/kW}}}{1000} \right)$$

Aus der IEA-Projektdatenbank berücksichtigt wurden dabei die Technologien ALK, PEM, SOEC und „andere Elektrolyse“.

A8 Synthetische Kraftstoffe

Anders als für den Schwerlastverkehr wird für die Luft- und Schifffahrt angenommen, dass Wasserstoff nicht direkt als Antriebsmittel genutzt wird, sondern in Form von synthetischen Kraftstoffen zum Einsatz kommt. Unter Berücksichtigung der ausgewiesenen Energiebedarfe in den Fraunhofer Langfristszenarien, der Vorgaben zur Beimischung von strombasiertem Kerosin in der Luftfahrt und der Vorgaben zur Emissionsreduktion in der Schifffahrt, wurden folgende Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen berücksichtigt:

Tabelle A8: Überblick über den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Bereich	2030	2045	Quelle
E-Kerosin für die Luftfahrt	2,7 TWh	17,7 TWh	Eigene Berechnungen anhand von Fraunhofer ISI (2022), BMDV (2021), Rat der EU (2023c) und EU (2023b)
Methanol für die Schifffahrt	2,5 TWh	25,7 TWh	Eigene Berechnungen anhand von Fraunhofer ISI (2021), Rat der EU (2023b) und EU (2023a)

Aus der Projektdatenbank der IEA (2023), ergänzt um Informationen aus Expert*innengesprächen, ergeben sich Produktionskapazitäten für synthetische Kraftstoffe in Deutschland in Höhe von rund 5 TWh in 2030 und rund 8 TWh 2045. Für die inländische Produktion müssen Anlagen für das Fischer-Tropsch Verfahren und die Methanol-Synthese aufgebaut werden. Unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades von durchschnittlich 72 Prozent für das Fischer-Tropsch Verfahren und 84 Prozent für die Methanol-Synthese (Moritz, Schönfish und Schulte, 2021) sowie der technisch maximal möglichen Zahl an Betriebsstunden in Höhe von 8.000 Volllaststunden (UBA, 2020), ergeben sich folgende Produktionskapazitäten und Investitionskosten:

Tabelle A9: Überblick über die Annahmen zur Produktion synthetischer Kraftstoffe in Deutschland

Annahme	2030	2045	Quelle
Produktionskapazität E-Kerosin	2,5 TWh	5,5 TWh	Eigene Berechnungen anhand von IEA (2023) und Expert*inneninterviews
Produktionskapazität Methanol	2,2 TWh	2,2 TWh	
Investitionskosten für Produktionsanlagen von E-Kerosin (kumuliert)	0,5 Mrd. EUR	0,9 Mrd. EUR	Eigene Berechnungen mit Investitionskosten von Moritz, Schönfish und Schulte (2021)
Investitionskosten für Produktionsanlagen von Methanol (kumuliert)	0,3 Mrd. EUR	0,3 Mrd. EUR	

Für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen werden zusätzlicher Wasserstoff sowie CO₂ als Produktionsfaktoren benötigt. Für die Herstellung einer kWh E-Kerosin werden beispielsweise 1,4 kWh Wasserstoff und rund 0,3 kg CO₂ benötigt. Für die Herstellung einer kWh Methanol werden 1,2 kWh Wasserstoff und ebenfalls rund 0,3 kg CO₂ benötigt (Moritz, Schönfish und Schulte, 2021). Aus den Strom- und Wasserstoffgestehungskosten gemäß Anhang A4 sowie den Produktionsfaktoren, Investitions- und Betriebskosten aus dem EWI Global PtX Tool (Moritz, Schönfish und Schulte, 2021) ergeben sich nachfolgende Produktionskosten für synthetische Kraftstoffe im Inland und Importkosten für synthetische Kraftstoffe aus dem Ausland. Die Importkosten aus dem Ausland beinhalten die Transportkosten per Schiff.

Tabelle A10: Überblick über die Kosten synthetischer Kraftstoffe im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Annahme	2030	2045	Quelle
Produktionskosten E-Kerosin in Deutschland	0,27 EUR/kWh	0,21 EUR/kWh	Eigene Berechnungen anhand von Anhang A4 und Moritz, Schönfisch und Schulte (2021)
Importkosten für E-Kerosin	0,25 EUR/kWh	0,20 EUR/kWh	
Produktionskosten Methanol in Deutschland	0,24 EUR/kWh	0,19 EUR/kWh	
Importkosten für Methanol	0,23 EUR/kWh	0,19 EUR/kWh	

A9 Weiterbildung

Auf Basis der durchgeführten Expert*inneninterviews und Erkenntnissen aus weiteren Projekten (BIBB, 2023a; GWS, 2023) wird für folgende Wirtschaftsbereiche angenommen, dass es zu einer Steigerung der Weiterbildungsinvestitionen kommt, die bis Ende der 2020er-Jahre zunehmen und anschließend bis Mitte der 2030er-Jahre wieder auf das Niveau absinken, das sich ohne Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ergeben hätte:

Tabelle A11: Überblick über die zusätzlichen Weiterbildungskosten im Wasserstoff-Szenario-v2.1

Wirtschaftsbereich	2030	2045	Quelle
Verarbeitendes Gewerbe	87,4 Mio. EUR	-	Eigene Berechnungen anhand von GWS (2023), Seyda und Placke (2020) und Expert*inneninterviews
Energieversorgung	7,7 Mio. EUR	-	
Baugewerbe	8,1 Mio. EUR	-	
Transportwesen	3,0 Mio. EUR	-	

Für das Wasserstoff-Szenario-v2.1 ergeben sich die zunehmenden Weiterbildungsausgaben einer Branche aus der Anzahl der ihr zugehörigen Beschäftigten, dem angenommen Anteil an Beschäftigten, die betrieblich weitergebildet werden, und den angenommenen Weiterbildungsausgaben pro Kopf. Für die durchschnittlichen Weiterbildungskosten pro Kopf werden 1.236 Euro angesetzt (Seyda und Placke, 2020). Konkrete Schätzungen der unternehmensseitigen Ausgaben sind bisweilen jedoch schwer, da bei den Unternehmen zum jetzigen Zeitpunkt oftmals noch Unklarheiten darüber bestehen, wie viele Beschäftigte und in welcher Form weitergebildet werden müssen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur des QuBe-Modellinstrumentariums, 7. Welle	10
Abbildung 2:	Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung	11
Abbildung 3:	Wasserstoffbedarf nach Kategorie und Importbedarf	13
Abbildung 4:	Wasserstoffgestehungskosten (LCOH) im In- und Ausland.....	15
Abbildung 5:	Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt, in Mrd. EUR und in Prozent.....	18
Abbildung 6:	Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts, in Mrd. EUR	19
Abbildung 7:	Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und der Erwerbspersonen, in Tsd. Personen	20
Abbildung 8:	Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze, in Tsd. Personen, gerundet	21
Abbildung 9:	Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	23
Abbildung 10:	Zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	24
Abbildung 11:	Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	25
Abbildung 12:	Zehn Berufsgruppen mit den größten relativen Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2030 und 2045	26
Abbildung 13:	Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus im Jahr 2030 und 2045, in Tsd. Personen und in Prozent	27
Abbildung 14:	Wirkungen auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Vergleich	29
Abbildung 15:	Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Vergleich	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Annahmen für das Wasserstoff-Szenario-v2.1.....	12
Tabelle 2:	Überblick über die Sensitivitätsrechnung	28
Tabelle A1:	Überblick über die Wasserstoffbedarfe im Wasserstoff-Szenario-v2.1	41
Tabelle A2:	Überblick über die Umrüstungsinvestitionen im Wasserstoff-Szenario-v2.1	43
Tabelle A3:	Überblick über die Annahmen zur Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland	44
Tabelle A4:	Überblick über die abweichenden Annahmen zur Erzeugung von Wasserstoff im Ausland	44
Tabelle A5:	Überblick über die Annahmen zum Wasserstoffimport im Wasserstoff-Szenario-v2.1	45
Tabelle A6:	Überblick über die berücksichtigten Hafenprojekte im Wasserstoff-Szenario-v2.1 ...	46
Tabelle A7:	Überblick über die Annahmen zum Pipelinesetz im Wasserstoff-Szenario-v2.1	46
Tabelle A8:	Überblick über den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen im Wasserstoff-Szenario-v2.1	48

Tabelle A9:	Überblick über die Annahmen zur Produktion synthetischer Kraftstoffe in Deutschland.....	48
Tabelle A10:	Überblick über die Kosten synthetischer Kraftstoffe im Wasserstoff-Szenario-v2.1 ..	49
Tabelle A11:	Überblick über die zusätzlichen Weiterbildungskosten im Wasserstoff-Szenario-v2.1 ..	49

Impressum

IAB-Forschungsbericht 7|2024

Veröffentlichungsdatum

8. Mai 2024

Herausgeber

Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
der Bundesagentur für Arbeit
Regensburger Straße 104
90478 Nürnberg

Nutzungsrechte

Diese Publikation ist unter folgender Creative-Commons-Lizenz veröffentlicht:
Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Bezugsmöglichkeit dieses Dokuments

<https://doku.iab.de/forschungsbericht/2024/fb0724.pdf>

Bezugsmöglichkeit aller Veröffentlichungen der Reihe „IAB-Forschungsbericht“

<https://iab.de/publikationen/iab-publikationsreihen/iab-forschungsbericht/>

Website

<https://iab.de>

ISSN

2195-2655

DOI

[10.48720/IAB.FB.2407](https://doi.org/10.48720/IAB.FB.2407)

Rückfragen zum Inhalt

Christian Schneemann
Telefon: 0911 179-5331
E-Mail: christian.schneemann2@iab.de

Johanna Zenk
Telefon: 0911 179-5393
E-Mail: johanna.zenk@iab.de