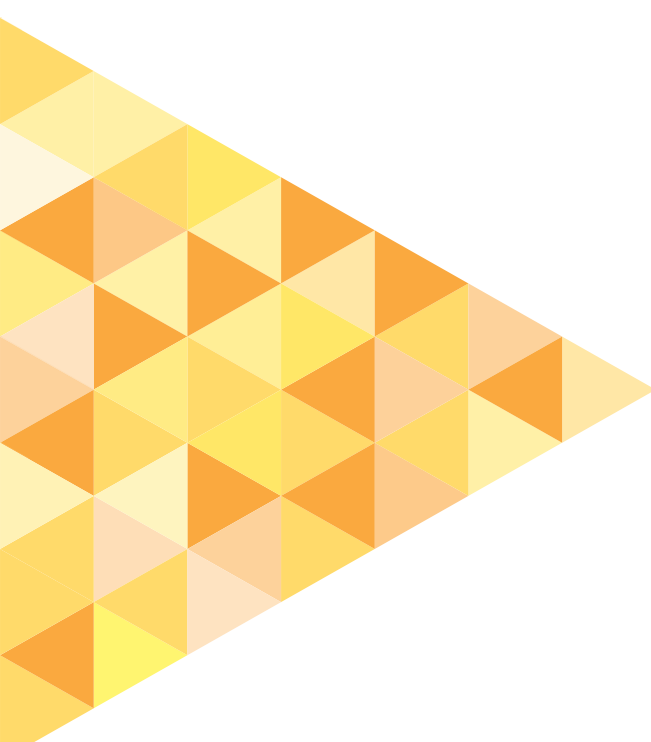


Alexander Christian Schur | Anke Mönnig | Linus Ronsiek |
Christian Schneemann | Johanna Zenk | Jan Philipp Schroer

Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ - Szenario-v3.0

Abschlussbericht der zweiten Projektphase



BIBB Discussion Paper

VET | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
REPOSITORY
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

Ein Gemeinschaftsprojekt von



Zitiervorschlag:

Schur, Alexander Christian; Mönnig, Anke; Ronsiek, Linus;
Schneemann, Christian; Zenk, Johanna; Schroer, Jan Philipp:
Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der
Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ - Szenario-v3.0 :
Abschlussbericht der zweiten Projektphase. Version 1.0 Bonn,
2026.

Online: https://res.bibb.de/vet-repository_784356.

© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2026

Version 1.0
Januar 2026

Herausgeber
Bundesinstitut für Berufsbildung
Friedrich-Ebert-Allee 114-116
53113 Bonn
Internet: www.vet-repository.info
E-Mail: repository@bibb.de

Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernimmt das BIBB
keine Haftung für die Inhalte externer Links. Für den Inhalt der
verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber
verantwortlich.



CC Lizenz

Der Inhalt dieses Werkes steht unter Creative-Commons-Lizenz
(Lizenztyp: Namensnennung - Weitergabe unter gleichen
Bedingungen 4.0 International).

Weitere Informationen finden sie im Internet auf unserer
Creative-Commons-Infoseite
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Diese Netzpublikation wurde bei der Deutschen
Nationalbibliothek angemeldet und archiviert:
urn:nbn:de:0035-vetrepository-784356

Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ - Szenario-v3.0: Abschlussbericht der zweiten Projektphase

Alexander Christian Schur¹, Anke Mönnig², Linus Ronsiek², Christian Schneemann³, Johanna Zenk³, Jan Philipp Schroer¹

Abstract:

Grüner Wasserstoff kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten und die Energieabhängigkeit reduzieren. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff“ beschreibt der vorliegende Bericht anhand einer Szenarioanalyse, wie sich der Aufbau einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff auf die Wirtschaftsleistung und den Arbeitsmarkt bis 2040 auswirken kann. Das hier modellierte Wasserstoff-Szenario baut auf den drei vorhergegangenen Wasserstoff-Szenarien auf und stellt die vierte Analyse aufgrund fundierter und aktualisierter Annahmen mit Stand März 2025 dar. Zusätzlich wurde für das Wasserstoff-Szenario eine Erweiterung im Prognose- und Simulationsmodell vorgenommen, um die Annahmen präziser einstellen und vertiefende Analysen nach Gütergruppen und Produktionsbereichen vornehmen zu können.

Die Ergebnisse des Wasserstoff-Szenarios zeigen bis 2035 ein höheres preisbereinigtes Bruttoinlandsprodukt, jedoch ein niedrigeres Wertschöpfungsniveau ab der zweiten Hälfte der 2030er Jahre im Vergleich zum Referenz-Szenario, welches den Hochlauf einer grünen Wasserstoff-Wertschöpfungskette nicht berücksichtigt. Von 2025 bis 2040 liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Durchschnitt dennoch jährlich um 4,0 Mrd. Euro höher und die Wertschöpfungsgewinne kumulieren sich über den Projektionszeitraum auf rund 63 Mrd. Euro. Wie bereits in den vorherigen Wasserstoff-Szenarien festgestellt, bestätigt sich, dass sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft insgesamt positiv auf den Arbeitsmarkt auswirkt. Die Zahl der Erwerbstätigen liegt zwischen 2025 und 2040 um durchschnittlich jährlich 54.000 Personen höher als im Referenz-Szenario. Höhere Erwerbstätigenzahlen als im Referenz-Szenario werden beispielsweise in den Berufsgruppen Unternehmensorganisation und -strategie, Technische Produktionsplanung und -steuerung, Büro und Sekretariat sowie Hochbau erwartet. Hingegen sind die Berufsgruppen Chemie und Metallerzeugung, aufgrund steigender Preise, von negativen Beschäftigungseffekten betroffen. Insgesamt übersteigt der Arbeitsplatzaufbau aber den Arbeitsplatzabbau, der in einzelnen Wirtschaftsbereichen und Berufen stattfindet. Mit Blick auf die Anforderungsniveaus zeigt sich langfristig ein deutlich höherer Bedarf an Spezialisten und Spezialistinnen.

Auch wenn die positiven Arbeitsmarkteffekte vergleichsweise gering erscheinen, hat eine zusätzliche Analyse gezeigt, dass für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt höhere Risiken bestehen, wenn die Transformation hin zu einem klimafreundlichen Wirtschaften verpasst wird.

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

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

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

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
In aller Kürze	6
1 Einleitung	7
2 Methodik	9
2.1 Das QuBe-Modellinstrumentarium	9
2.2 Szenarienrechnung	10
2.3 Modellerweiterung	12
3 Annahmen	14
3.1 Tabellarische Übersicht zu den getroffenen Annahmen	14
3.2 Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import	15
3.3 Kosten der Herstellung und des Betriebes von Elektrolyseuren; Kosten der Produktion und des Importes von grünem Wasserstoff; Substitution fossiler Energieträger; Umrüstungsinvestitionen	19
3.4 Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines und Speicher	22
3.5 Exportannahmen	24
3.6 Synthetische Kraftstoffe	24
3.7 Weiterbildung	26
4 Ergebnisse	27
4.1 Ergebnisse im Überblick	27
4.2 Folgen für Wertschöpfung und Wachstum	27
4.3 Nominale Produktion: Deep-Dive in die Gütergruppen	32
4.4 Folgen für den Arbeitsmarkt	37
4.5 Erwerbstätige: Deep-Dive in die Produktionsbereiche	43
5 Exkurs: Alternativ-Szenario zur Deindustrialisierung	47
6 Fazit	51
7 Literaturverzeichnis	55

Abkürzungsverzeichnis

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

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des QuBe-Modellinstrumentariums	9
Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung.....	11
Abbildung 3: Erweiterung der Input-Output-Struktur	13
Abbildung 4: Wasserstofferzeugung und Importbedarf (in TWh)	17
Abbildung 5: Wasserstoffgestehungskosten in Deutschland nach Szenario	20
Abbildung 6: Wasserstoffgestehungskosten nach Region	21
Abbildung 7: Wasserstoff-Pipelinennetz: Länge und Investitionskosten.....	23
Abbildung 8: Ergebnisse des Vergleichs zwischen Wasserstoff-Szenario und QuBe-Basisprojektion (8. Welle)	27
Abbildung 9: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt.....	28
Abbildung 10: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (in Mrd. EUR).....	30
Abbildung 11: Zehn Wirtschaftsbereiche (63er Gliederung, WZ-2008) mit den größten absoluten Wirkungen im Jahr 2040 auf die nominale Produktion im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040.....	32
Abbildung 12: Nominale Produktion der Gütergruppe Chemische Erzeugnisse	33
Abbildung 13: Nominale Produktion der Gütergruppe Keramik, bearbeitete Steine und Erden	34
Abbildung 14: Nominale Produktion der Gütergruppe Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl	35
Abbildung 15: Nominale Produktion der Gütergruppe Elektrische Ausrüstungen.....	35
Abbildung 16: Nominale Produktion der Gütergruppe Maschinen	36
Abbildung 17: Nominale Produktion der Gütergruppe elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung, Wärme- und Kälteversorgung.....	37
Abbildung 18: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen (in Tsd. Personen)	38
Abbildung 19: Zehn Wirtschaftsbereiche (63er Gliederung, WZ-2008) mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040 ...	40
Abbildung 20: Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040 (3-Steller KldB 2010)	41
Abbildung 21: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus 2025-2040 (in Prozent).....	42
Abbildung 22: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 (in Tsd. Personen)	43
Abbildung 23: Erwerbstätige im Produktionsbereich Chemische Erzeugnisse	44

Abbildung 24: Erwerbstätige im Produktionsbereich Keramik, bearbeitete Steine und Erden.....	44
Abbildung 25: Erwerbstätige im Produktionsbereich Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl	45
Abbildung 26: Erwerbstätige im Produktionsbereich: elektrische Ausrüstung	46
Abbildung 27: Erwerbstätige im Produktionsbereich: Maschinen.....	46
Abbildung 28: Erwerbstätige im Produktionsbereich elektrischer Strom.....	47
Abbildung 29: Ergebnisse des Vergleichs zwischen Wasserstoff- und Deindustrialisierungs-Szenario	49
Abbildung 30: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Vergleich zum Deindustrialisierungs-Szenario.....	50
Abbildung 31: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen im Vergleich zum Deindustrialisierungs- Szenario (in tausend Personen)	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen im Wasserstoff-Szenario-v3.0	14
--	----

In aller Kürze

- In diesem Bericht wird anhand einer Szenarioanalyse beschrieben, wie sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf Wirtschaft und Arbeitsmarkt im Vergleich zur 8. Welle der QuBe-Basisprojektionen bis zum Jahr 2040 auswirken kann.
- Bis 2035 kommt es zu positiven Wirkungen auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP). Aufgrund auslaufender Investitionstätigkeiten, teurerer Importe und niedrigerer Exporte bleibt die Höhe des BIP ab 2036 im Wasserstoff-Szenario jedoch hinter dem Referenz-Szenario, welches den Hochlauf einer grünen Wasserstoff-Wertschöpfungskette nicht berücksichtigt, zurück. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2025 bis 2040, liegt das BIP im Durchschnitt dennoch jährlich um 4,0 Mrd. Euro höher (+0,1 Prozent jährlich).
- Die Zahl der Erwerbstätigen liegt im Wasserstoff-Szenario zwischen 2025 und 2040 um durchschnittlich jährlich rund 54.000 Personen höher als im Referenz-Szenario.
- In absoluten Zahlen hat insbesondere das Baugewerbe einen durchgehend höheren Arbeitskräftebedarf, der mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur einhergeht. Mittel- und langfristig kommt es zu einem niedrigeren Arbeitskräftebedarf bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen.
- Bei den Berufsgruppen zeigt sich unter anderem ein höherer Bedarf an Berufen in der Unternehmensorganisation und -strategie, der Technischen Produktionsplanung und -steuerung, dem Büro und Sekretariat sowie dem Hochbau. In einzelnen dieser Berufsgruppen kommt es bereits heute zu Engpässen auf dem Arbeitsmarkt.
- Wird die Transformation hin zu einem klimafreundlichen Wirtschaften verpasst, ist mit verschärften Maßnahmen zur Emissionsreduktion bzw. mit Sanktionen zu rechnen, die die inländische Produktion negativ beeinflussen können. Das Wasserstoff-Szenario-v3.0 wurde deshalb zusätzlich einem Deindustrialisierungs-Szenario gegenübergestellt. Dies hat gezeigt, dass durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ein deutlich höheres Wertschöpfungs- und Beschäftigungsniveau gehalten werden kann. Von 2025 bis 2040 liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Wasserstoff-Szenario-v3.0 in diesem Vergleich um durchschnittlich jährlich 53 Mrd. Euro höher (+1,5 Prozent jährlich) und es sind durchschnittlich jährlich 215.000 Personen mehr erwerbstätig als im Deindustrialisierungs-Szenario.

1 Einleitung

Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wird auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung eine zentrale Rolle zugesprochen. Er kann dazu beitragen die Klimaziele gemäß des Pariser Klimaabkommens (UN 2015) respektive des Klimaschutzgesetzes (BUNDESREGIERUNG 2021) zu erreichen. Die Bundesregierung hat im Jahr 2020 die zentrale Bedeutung von grünem Wasserstoff im Rahmen der Energiewende durch den Beschluss der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) anerkannt (BMWi 2020). Grüner Wasserstoff sowie dessen Folgeprodukte (Power-to-X) haben das Potential, als Speicher von erneuerbaren Energien, eine flexible Nutzung erneuerbarer Energien zu ermöglichen und einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Energie-, Wirtschafts- und Verkehrssystems in Deutschland zu leisten. Mit der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie im Jahr 2023 wurde der Handlungsrahmen für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft erweitert und das Ziel festgehalten, Deutschland bis 2030 zu einem „Leitmarkt für Wasserstofftechnologien“ zu entwickeln (BMWK 2023).

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

Damit die Umsetzung der NWS nicht durch Fachkräfteengpässe ausgebremst wird, ist es erforderlich, bereits frühzeitig aufzuzeigen, welche Berufe und Qualifikationen zukünftig dafür benötigt werden. Ebenso ist zu evaluieren, ob der aktuell eingeschlagene Entwicklungspfad im Bildungssystem diese zukünftigen Bedarfe decken kann. Mit diesen Fragestellungen hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Projektteam der Qualifikations- und Berufsprojektionen (QuBe, www.qube-projekt.de) betraut. Die Projektionen werden unter der gemeinsamen Leitung des Bundesinstituts für Berufsbildung (BIBB) und des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS) durchgeführt. Anhand von Modellrechnungen zeigen sie konsistente Entwicklungspfade auf, wie sich die Wirtschaft und der Arbeitsmarkt in Deutschland langfristig entwickeln könnten. Arbeitskräfteangebot und -bedarf lassen sich dabei getrennt nach 72 Wirtschaftszweigen, 144 Berufsgruppen (3-Steller der Klassifikation der Berufe (KldB) 2010) sowie vier Qualifikations- bzw. Anforderungsniveaus ausweisen.

Unter Anwendung der Szenarioanalyse können durch den Vergleich von einem Referenz- mit einem Alternativ-Szenario die Wirkungen von bestimmten Maßnahmen auf den Arbeitsmarkt aufgezeigt und

analysiert werden (ZIKA u. a. 2023). Dazu werden im Projekt *Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“* Annahmen getroffen, die den bislang noch nicht im QuBe-Modellsystem abgebildeten Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft modellieren und die Grundlage für die Projektion des alternativen „Wasserstoff-Szenarios“ bilden. Um die Größenordnungen der verschiedenen Aspekte des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft zu quantifizieren, wurde bereits drei Wasserstoff-Szenarien (v1.0, v2.0 und v2.1) mit verschiedenen Sensitivitätsanalysen gerechnet. Dabei lag der Fokus auf der Sicherstellung der Versorgung Deutschlands mit grünem Wasserstoff durch die inländische Produktion und den Import, seiner Verteilung sowie dem Export von Elektrolyseanlagen (ZENK u. a. 2023a).

Ausgehend von einer vorläufigen Wirkungsanalyse wurden die Einschränkungen und Interpretationsgrenzen des **Wasserstoff-Szenarios-v1.0** sukzessive angegangen. Neben leitfadengestützten Interviews von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Positionen der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ untersuchen RONSIEK u. a. (RONSIEK u. a. 2022) anhand einer Metaanalyse mögliche Kooperationspartnerschaften für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. Zusätzlich analysieren (ZENK u. a. 2023b) Exportpotentiale von Wasserstofftechnologien für Deutschland, die sich im Zuge eines globalen Wasserstoffhochlaufs ergeben können. Die Ergebnisse aus Expertinnen- und Experteninterviews und Literaturrecherche sind in das **Wasserstoff-Szenario-v2.0** eingegangen. Nach einer Aktualisierung der Annahmen (**Wasserstoff-Szenario-v2.1**) liegt der Fokus im vierten Wasserstoff-Szenario (**Wasserstoff-Szenario-v3.0**) in der Untersuchung der spezifischen Branchenwirkung. Im Mittelpunkt steht dabei – neben der erneuten Anpassung der Annahmen an aktuelle Trends zum Stand März 2025 – die detaillierte Darstellung der branchenspezifischen Wirkungen für wasserstoffrelevante Branchen.

Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen der Szenarioanalyse dargelegt (vgl. Kapitel 2). Dabei wird auf das im QuBe-Projekt verwendete Modellinstrumentarium eingegangen und schließlich das Referenz- und Alternativ-Szenario vorgestellt. Kapitel 3 widmet sich einer detaillierten Darstellung der Annahmen, welche das Alternativ-Szenario formen. Nach der Darstellung der Ergebnisse zu den Effekten des Markthochlaufs von Wasserstoff auf die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt im Vergleich zur achten Welle der QuBe-Basisprojektionen in Kapitel 4 wird das Wasserstoff-Szenario in Kapitel 5 zusätzlich einem Deindustrialisierungs-Szenario gegenübergestellt, bevor der Bericht mit einem Fazit schließt.

Ausgenommen von diesem Pfad zur Bestimmung des Arbeitskräfteangebots sind die Berufsgruppen der Lehrenden und Pflegenden (grau). Diese hängen hauptsächlich von der Zahl der Kinder und Jugendlichen beziehungsweise der Pflegebedürftigen ab.

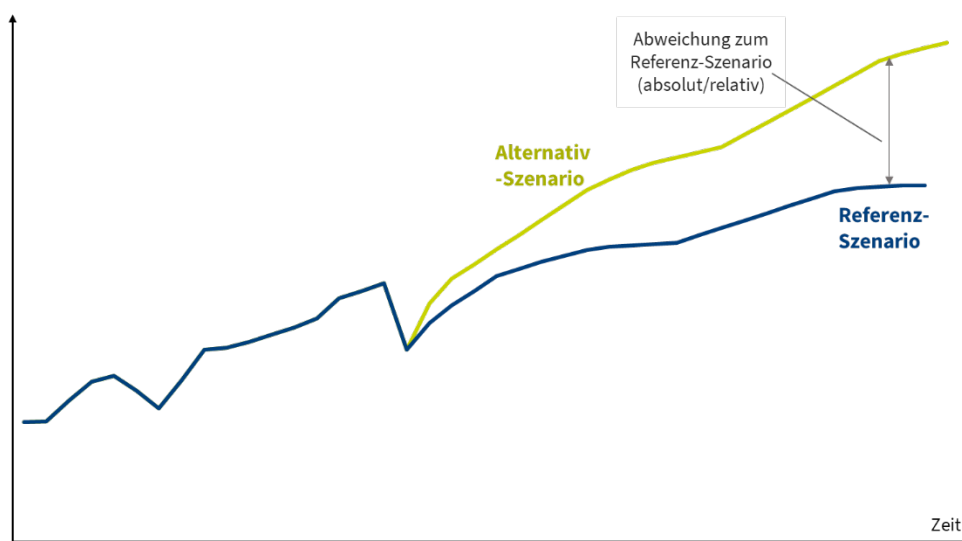
Den ökonomischen Kern des Modells (hellblau) bildet das makroökonomische Input-Output-Modell INFORGE (**I**nterindustry **F**orecasting **G**ermany). Auch hier wirkt die Demografie als ein Treiber, in diesem Fall über die Haushalte als Intermediär und deren Endnachfrage. Die Datenbasis besteht in erster Linie aus den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, die die zueinander konsistenten Inlandsproduktberechnung und Input-Output-Rechnung umfassen (ZIKA u. a. 2023). Das INFORGE-Modell folgt der INFORUM-Modellphilosophie der Bottom-up-Konstruktion und vollständigen Integration (ALMON 1991). Insgesamt werden 72 verschiedene Wirtschaftsbereiche sowie 72 Gütergruppen und Produktionsbereiche individuell modelliert. Makroökonomische Aggregate ergeben sich anschließend definitorisch (MEYER u. a. 1999). Gleichzeitig ist das Modell hochgradig endogen. Kreislaufzusammenhänge zwischen privaten Haushalten, Unternehmen, NGOs und dem Staat werden berücksichtigt und können analysiert werden. Angebots- und Nachfrageseite beeinflussen sich über die Preise gegenseitig. Unternehmen bestimmen in Abhängigkeit ihrer Kosten sowie der Importpreise ihren Absatzpreis und nachfragende Akteure reagieren mit einer Entscheidung, die die Höhe der Produktion und damit die Stückkosten bestimmt. Teil der Stückkosten sind die branchenspezifischen Löhne, die ihrerseits wiederum Einfluss auf das Produktionsniveau haben. Durch die Lohn- und Produktionsentwicklung wird in INFORGE schließlich die Nachfrage nach Arbeitskräften bestimmt, wodurch sich auch hier Interdependenzen zeigen (BECKER u. a. 2022). Gekoppelt wird das INFORGE-Modell mit dem Außenhandelsmodell GINFORS (dunkelblau), in dem internationale Handelsbeziehungen abgebildet werden und die deutsche Wirtschaft in die Weltwirtschaft eingebunden wird (AHLERT u. a. 2009). Arbeitsmarktangebot und -nachfrage können nicht unabhängig voneinander projiziert werden. Deshalb werden sie in einem so genannten Matching-Modul (gelb) gegenübergestellt und die Berufslöhne bestimmt. Dies geschieht nach insgesamt 144 Berufsgruppen (ZIKA u. a. 2023). Direkt angeschlossen an den ökonomischen Kern des QINFORGE-Modells ist zudem ein Energiemodul (dunkelgrün). Der Endenergieverbrauch sowohl der Haushalte als auch der Unternehmen beeinflusst wiederum die Endnachfrage. Zudem lassen sich Emissionen sektoral berechnen.

2.2 Szenarienrechnung

Mithilfe des QINFORGE-Modells werden zwei unterschiedliche Szenarien berechnet. Zum einen ein Referenz-Szenario, welches vergangene Trends in die Zukunft fortschreibt, aber auch plausible und konsistente beziehungsweise absehbare Entwicklungen berücksichtigt. In der vorliegenden Studie dienen die Ergebnisse der achten Welle der QuBe-Basisprojektion bis zum Jahr 2040 als Referenz-

Szenario. Über die in den Daten erkennbaren Trends hinaus fließen weitere Annahmen in das Referenz-Szenario ein. Berücksichtigt werden sowohl wirtschaftliche Verluste durch den Klimawandel als auch die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen, die die negativen Folgen des Klimawandels jedoch nicht vollständig ausgleichen können. Zudem werden Entwicklungen im Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Mobilitätswandel hin zu batterieelektrischen Antrieben für Pkw mit einbezogen. Weitere Annahmen im Referenz-Szenario umfassen unter anderem den Übergang zur ökologischen Landwirtschaft sowie die steigenden Verteidigungsausgaben im Zuge der „Zeitenwende“. Eine detaillierte Beschreibung der Annahmen und Ergebnisse der achten Welle der QuBe-Basisprojektion findet sich in (MAIER u. a. 2024). Zum anderen wird ein Alternativ-Szenario berechnet, in diesem Fall das Wasserstoff-Szenario-v3.0. Im Wasserstoff-Szenario⁴ werden zusätzliche Annahmen über den Hochlauf einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff in Deutschland integriert. Diese Annahmen werden im Folgekapitel im Detail beschrieben. Da die Modellzusammenhänge in den beiden Szenarien unverändert bleiben, sind die Differenzen in den Ergebnissen allein auf die zusätzlichen Annahmen im Alternativ-Szenario zurückzuführen.

Abbildung 2: Anwendung der Szenariotechnik, schematische Darstellung



Quelle: (ZIKA u. a. 2023)

Grundsätzlich können Ergebnisse für Indikatoren und Kenngrößen als Zeitreihe innerhalb eines Szenarios dargestellt werden oder aber als Differenz zwischen den beiden Szenarien zu einem Zeitpunkt, wie Abbildung 2 veranschaulicht (ZIKA u. a. 2023). Anders als in den vorangegangenen Szenarioanalysen (MÖNNIG u. a. 2021; ZIKA u. a. 2022) betrachtet dieser Bericht neben der Darstellung der Differenzen zwischen den Szenarien auch Analysen über den zeitlichen Verlauf im Wasserstoff-

⁴ Sofern im Folgenden nicht weiter konkretisiert, bezieht sich dieser Bericht grundsätzlich auf das Wasserstoff-Szenario-v3.0.

Szenario. Es können somit Aussagen darüber getroffen werden, ob eine Entwicklung im Alternativ-Szenario stärker oder schwächer ausfällt als im Referenz-Szenario und ob der grundsätzliche Entwicklungspfad steigend oder fallend ist.

2.3 Modellerweiterung

Für das Wasserstoff-Szenario wird das QINFORGE-Modell erweitert: Nach dem Beispiel von (MÖNNIG u. a. 2021) werden die von einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff besonders betroffenen Gütergruppen und Produktionsbereiche⁵ der Input-Output-Rechnung in tiefergegliederte Einheiten zerlegt. Dadurch kann die Vorleistungsverflechtung und die Endnachfrage nach ihnen detaillierter abgebildet werden und folgend auch die Veränderungen in den Zahlen der Erwerbstätigen der jeweiligen Branchen. Das Ausgangsproblem ist, dass mitunter sehr unterschiedliche Waren und Dienstleistungen zu Gütergruppen-Aggregaten zusammengefasst werden, wodurch es zu Verzerrungen – Über- oder Unterschätzung von Effekten kommen kann, einem so genannten „Aggregation Bias“ (MORIMOTO 1970; KYMN 1990). Bestimmte Szenarien, wie im vorliegenden Fall der Umsetzung einer Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff betreffen vor allem einzelne Elemente von Branchen. Die Differenzierung von einzelnen Gütergruppen in eine tiefere Aggregationsstufe soll eine detailliertere Analyse, der sich verändernden Liefer- und Kostenstruktur ermöglichen. Die betreffenden Gütergruppen bzw. Produktionsbereiche sind:

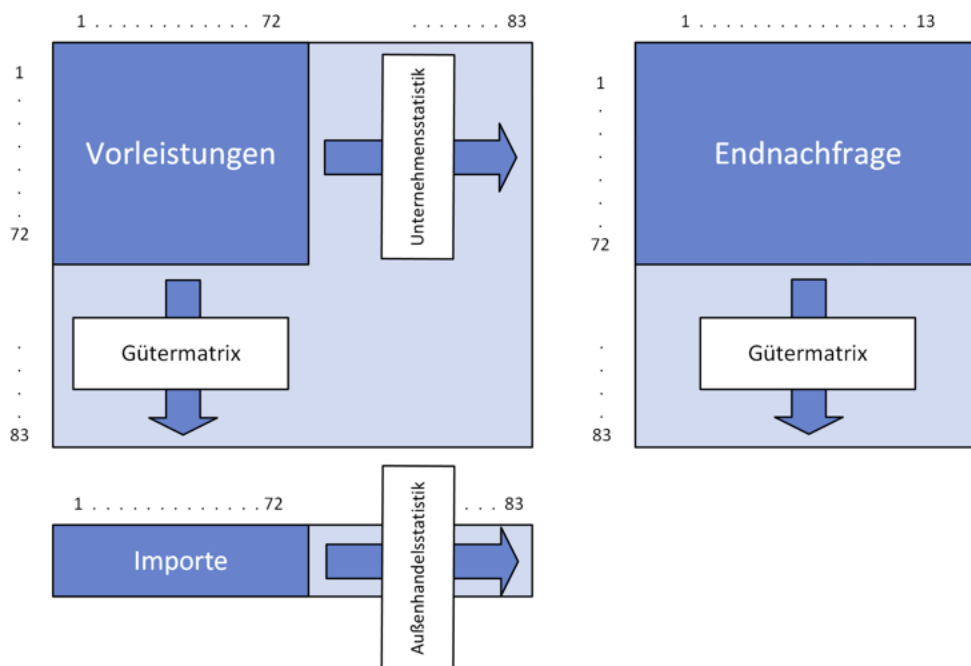
- Kokerei- und Mineralölerzeugnisse,
- Chemische Erzeugnisse,
- Keramik, bearbeitete Steine und Erden,
- Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl,
- Elektrische Ausrüstungen,
- Maschinen und
- Elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme und Kälteversorgung.

Insgesamt steigt die Struktur der Input-Output-Verflechtung in der Modellerweiterung von 72 auf 83 Gütergruppen und Produktionsbereiche. Für die Modellerweiterung waren sowohl zusätzliche Datenquellen als auch weitergehende Annahmen notwendig. Sämtliche zusätzliche Daten stammen vom Statistischen Bundesamt. Für die Erweiterung der Vorleistungs- und Endnachfrage - Zeilen der Vorleistungsverflechtung - also das Aufkommen an Gütern und Dienstleistungen, wurde eine tiefergegliederte Sonderauswertung der Verwendung von Gütern nach Wirtschaftsbereichen verwendet (DESTATIS 2023). Für die Erweiterung der Verwendungsstruktur – der Spalten der Vorleistungsverflechtung – wurde die bereichsübergreifende Unternehmensstatistik herangezogen. In ihr finden sich unter anderem Informationen über die Waren- und Dienstleistungsaufwendungen nach

⁵ In der Vorleistungsverflechtung der Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes entsprechen die Gütergruppen (Zeilen) den Produktionsbereichen (Spalten) in ihrer Gliederung und Bezeichnung.

3-Stellern aus der Klassifikation der Wirtschaftszweige (DESTATIS 2024a). Die Annahme hier ist, dass die Aufwendungen für Waren und Dienstleistungen nach Branchen eine passende Approximation der Verwendung nach Produktionsbereichen darstellt. Gleichwohl liegt hier eine Einschränkung in der Modellierung, da die Waren- und Dienstleistungsaufwendungen für jede Branche lediglich insgesamt und nicht aufgeteilt nach Gütergruppen vorliegen. Darüber hinaus werden auch die Importe nach Produktionsbereichen erweitert, da sie in ihrer Struktur der erweiterten Vorleistungsverflechtung entsprechen muss. Hierfür liefert die Außenhandelsstatistik nach Gütergruppen die notwendigen Informationen (DESTATIS 2024b). Abbildung 3 stellt die Erweiterung mit den jeweiligen Datenquellen schematisch dar.

Abbildung 3: Erweiterung der Input-Output-Struktur



Quelle: Eigene Darstellung

Mit der erweiterten Struktur kann auch die zentrale Gleichung des QINFORGE-Modells erweitert werden. Die Leontief-Gleichung bestimmt die Produktion nach Produktionsbereichen x über die technologischen Koeffizienten A und die Endnachfrage y .

$$x_t = (I - A_t)^{-1} * y_t$$

Nachdem die Produktion für die erweiterte Struktur nach 83 Produktionsbereichen bestimmt wurde, folgt eine Rückaggregation auf die ursprünglichen 72 Produktionsbereiche. Dies ist notwendig, da keine vollständige Erweiterung der Sektoren in allen Kenngrößen des Modells erfolgt (MÖNNIG u. a. 2021). Die Aufspaltung beschränkt sich auf die Vorleistungsverflechtung, die Endnachfrage, die Importe sowie die Produktionspreise.

Die Erweiterung des Input-Output-Modells kommt auch im Referenz-Szenario zum Einsatz, da ein Vergleich der Ergebnisse für die erweiterte Struktur sonst nicht möglich wäre. Dadurch ergeben sich zwar geringfügige Abweichungen zur QuBe-Basisprojektion der achten Welle, diese bleiben jedoch minimal.

3 Annahmen

Der Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft wird anhand verschiedener Annahmen im Wasserstoff-Szenario abgebildet, welche bislang nicht in den historischen Daten ersichtlich sind. Die Annahmen zum Wasserstoffhochlauf bilden die Grundlage für Eingriffe in das makroökonomische Prognosemodell. Sie wurden auf Grundlage von Literaturrecherchen als auch von Expertinnen- und Experteninterviews getroffen. In vielen Fällen bauen Annahmen aufeinander auf oder beeinflussen sich gegenseitig.

In diesem Abschnitt werden die dem Wasserstoff-Szenario zugrundeliegenden Annahmen erläutert. Diese beziehen sich auf einen Zeitraum bis 2040. In der Literatur finden sich teilweise jedoch Eckwerte für verschiedene Zeitpunkte, vornehmlich die Jahre 2030, 2045 oder 2050. Zur Erstellung einer durchgehenden Zeitreihe für das Wasserstoff-Szenario wurden die Werte zwischen den Eckwerten interpoliert.

3.1 Tabellarische Übersicht zu den getroffenen Annahmen

In Tabelle 1 werden die in diesem Kapitel erläuterten Annahmen zusammengefasst und quantitativ dargestellt. Es werden jeweils die Annahmen für die Jahre 2030 und 2040 gezeigt.

Tabelle 1: Annahmen im Wasserstoff-Szenario-v3.0

Annahmen		2030	2040
Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import	Wasserstoffgesamtbedarf in Deutschland	56 TWh	271 TWh
	Wasserstofferzeugung in Deutschland	8 TWh	93 TWh
	Benötigte Strommenge aus erneuerbaren Energien (Inland)	11 TWh	129 TWh
	Installierte Elektrolyseleistung	3 TWh	32 TWh
	Elektrolyse-Wirkungsgrad	69 %	72 %
	Wasserstoff-Importbedarf	48 TWh	178 TWh
Investitionskosten, Wasserstoff-gestehungskosten und -importkosten	Umrüstungsinvestitionen (kumuliert)	22,5 Mrd. EUR	74,4 Mrd. EUR
	Investitionskosten Elektrolyseure	511 EUR/kW	420 EUR/kW
	Wasserstoffgestehungskosten in Deutschland	0,16 EUR/kWh	0,13 EUR/kWh
	Bereitstellungskosten von Wasserstoff über Pipelineimport	0,16 EUR/kWh	0,14 EUR/kWh

	Bereitstellungskosten von Wasserstoff über Schiffsimport	0,29 EUR/kWh	0,25 EUR/kWh
Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines, Speicher und Tankstellen	Importkapazität der Häfen	16 TWh	25 TWh
	Bedarf an Speicherkapazität (Anteil vom Gesamtbedarf)	16 %	21 %
	Kapazität der Pipelines	186 TWh	429 TWh
	Pipeline-Investitionskosten kumuliert	12,1 Mrd. EUR	22,6 Mrd. EUR
	Speicher-Investitionskosten kumuliert	0,3 Mrd. EUR	8,5 Mrd. EUR
	Häfen-Investitionskosten kumuliert	3,4 Mrd. EUR	3,4 Mrd. EUR
	Tankstellen-Investitionskosten kumuliert	5,1 Mrd. EUR	6,7 Mrd. EUR
	Gesamte Investitionskosten der Wasserstoffinfrastruktur kumuliert	20,9 Mrd. EUR	41,2 Mrd. EUR
Technologieexporte	Globaler Bedarf an Elektrolyseurleistung (ohne DE)	514 GW	1.876 GW
	Exportwert von Elektrolyseuren	9 Mrd. EUR	6 Mrd. EUR
Synthetische Kraftstoffe	PtL-Bedarf Luftverkehr	3 TWh	14 TWh
	PtL-Bedarf Schifffahrt	2 TWh	13 TWh
	Synthetische Kraftstoffproduktion in Deutschland	4 TWh	6 TWh
	Importbedarf synthetischer Kraftstoffe	1 TWh	20 TWh
	Investitionskosten zur Produktion synthetischer Kraftstoffe (kumuliert)	1,0 Mrd. EUR	1,4 Mrd. EUR
Weiterbildung	Zusätzliche Schulungskosten für Wasserstoffkompetenzen	0,1 Mrd. EUR	-

3.2 Wasserstoffbedarf, -erzeugung und -import

Den Ausgangspunkt für die Beschreibung des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft bilden Annahmen zum **Bedarf an grünem Wasserstoff**⁶ in Deutschland. Für das Wasserstoff-Szenario wird angenommen, dass Wasserstoff hauptsächlich in den energieintensiven Industrien eingesetzt wird. Dies einerseits als Energieträger für Prozesse, die aufgrund der hohen notwendigen Temperaturen nicht, oder nur schwer elektrifiziert werden können und andererseits zur stofflichen Nutzung, um fossile Rohstoffe zu ersetzen. Hinzu kommt die Nutzung von Wasserstoff im Energie- und Teilen des Verkehrssektors. Dabei wird angenommen, dass Wasserstoff im Schwerlastverkehr eingesetzt wird und im restlichen Straßen- und Schienenverkehr eine überwiegende Elektrifizierung stattfindet. Im Bereich der Luft- und Schifffahrt wird der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen auf Wasserstoffbasis berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.6).

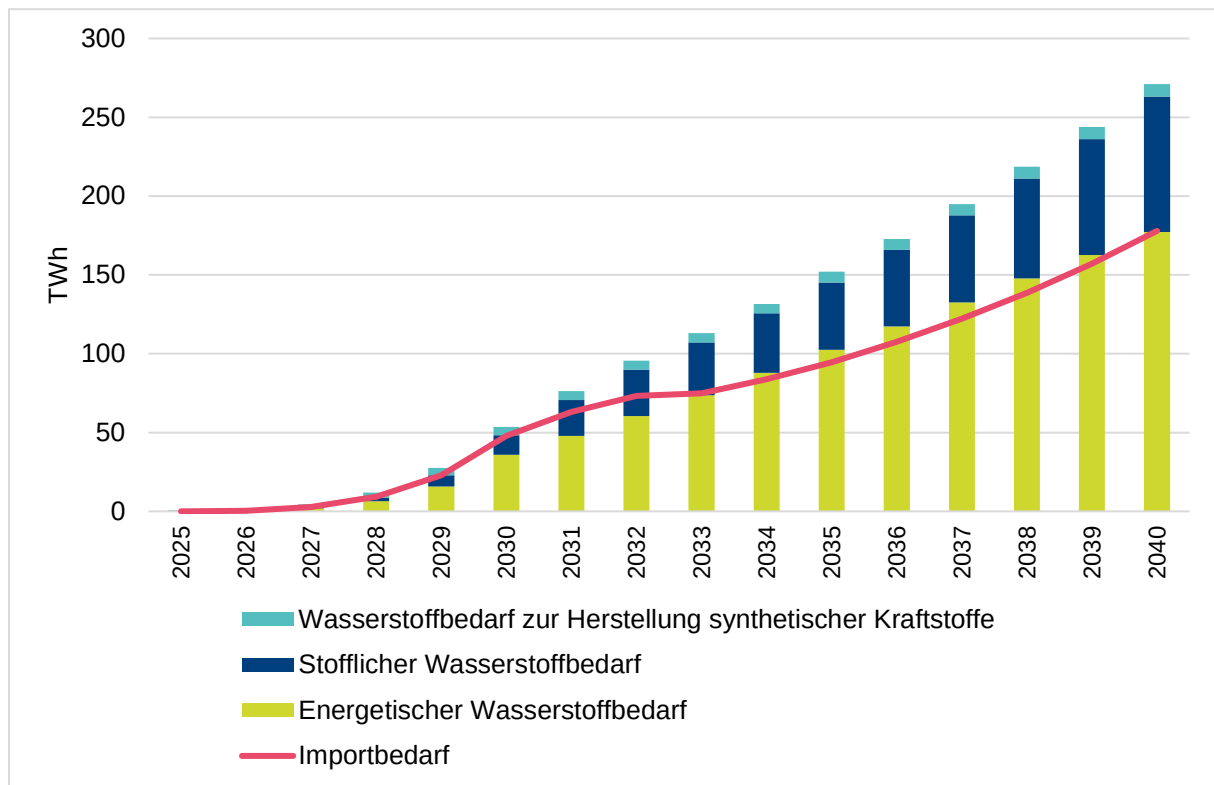
⁶ Sofern im Folgenden nicht weiter konkretisiert, bezieht sich dieser Bericht grundsätzlich auf sogenannten grünen Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wird.

In einer vertiefenden Analyse zu möglichen Wasserstoffbedarfen in den Industrien wurden aktuelle Kosten- und Nachfragestrukturen dahingehend untersucht, ob sich diese im Zuge der Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft ändern (MÖNNIG u. a. 2024). So wird im aktuellen Wasserstoff-Szenario angenommen, dass der stoffliche Wasserstoffbedarf in der Chemieindustrie verortet ist (CHEMISTRY4CLIMATE 2023), während der größte energetische Wasserstoffbedarf in der Stahlindustrie erwartet wird (WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL 2022). Weitere energetische Wasserstoffbedarfe werden, jedoch in geringerem Umfang, der Glas-, Keramik-, Papier und NE-Metallindustrie (BMWK 2022c) sowie der Zementindustrie (LENZ u. a. 2022) zugeordnet. Für die Energieerzeuger wird die Schätzung des Nationalen Wasserstoffrats zum systemnotwendigen Bedarf für eine stabile Stromversorgung herangezogen (NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2024). Damit liegen die Energieerzeuger mit ihren Wasserstoffbedarfen nur knapp hinter der Stahlindustrie. Für den Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr wurden auf die Berechnungen des Fraunhofer Instituts zurückgegriffen (FRAUNHOFER ISI 2024b).

Im Vergleich zu den vorangegangenen Wasserstoff-Szenarien (v2.0 und v2.1) fallen die Wasserstoffbedarfe im aktuellen Wasserstoff-Szenario niedriger aus. Dies liegt daran, dass der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft bislang nicht die zuvor erwartete Dynamik aufgenommen hat und neuere Studien die Bedarfsprognosen teilweise nach unten revidiert haben (z.B. in der Chemieindustrie (CHEMISTRY4CLIMATE 2023)) bzw. Ausbaupläne reduziert wurden (z.B. im Energiesektor (TAGESSCHAU 2024b)). Entsprechend wurden auch die Bedarfsannahmen im Wasserstoff-Szenario angepasst. Es wird nunmehr von einem Wasserstoffbedarf in Höhe von 56 TWh im Jahr 2030 und von 271 TWh im Jahr 2040 ausgegangen. Abbildung 4 gibt eine Übersicht über die Bedarfsannahmen.

Ein Teil des Wasserstoffbedarfs wird annahmegemäß durch inländische Wasserstofferzeugung gedeckt. Die Differenz zwischen dem inländisch erzeugten Wasserstoff und dem Wasserstoffbedarf bestimmt den Importbedarf.

Abbildung 4: Wasserstofferzeugung und Importbedarf (in TWh)



Quelle: Eigene Berechnungen

Ein Teil des Gesamtbedarfs wird annahmegemäß durch den in Deutschland erzeugten grünen Wasserstoff gedeckt werden können. Der gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie angestrebte Ausbaupfad, bis zum Jahr 2030 eine Elektrolysekapazität von 10 GW zu erreichen, scheint gemäß der allgemeinen Literaturlandschaft nicht mehr – oder nur unter Idealbedingungen - erreichbar zu sein (ODENWELLER/UECKERDT 2025; DNV 2025; WELT 2025). Ein Blick auf die IEA-Projektdatenbank - welche seit dem Jahr 2000 weltweit in Betrieb genommene und in der Planungs- oder Bauphase befindlichen Projekte u.a. zur Wasserstoffproduktion erfasst - zeigt, dass für das 10 GW Elektrolyse Ziel fast alle Projekte, die sich bisher lediglich in der Konzeptphase befinden oder bei denen derzeit noch eine Machbarkeitsstudie durchgeführt wird, realisiert werden müssen. Für lediglich rund 1,4 GW zusätzliche Elektrolyseure gebe es bereits eine finale Investitionsentscheidung oder sie befänden sich im Bau (IEA 2024).

Zusammen mit der Datengrundlage für die H₂-Bilanz des zweiten Halbjahres 2024 erstellt durch das EWI (EWI 2024) , die für das Jahr 2023 eine Elektrolyseleistung von 0,068 GW ausweisen, ergibt sich eine Wachstumsrate der in Betrieb befindlichen Elektrolysekapazitäten von etwa 1,7. Unter Annahme einer konstanten Wachstumsrate könnte so eine Elektrolyseleistung von 10 GW etwa im Jahr 2033 erreicht werden. Anschließend wird eine geringere Wachstumsrate unterstellt, um den Ausbau nicht zu überschätzen, die sich an der Marktabfrage im Rahmen des Netzentwicklungsplans Gas orientiert

(FNB GAS 2022) und durch den verzögerten Ausbaupfad im Jahr 2040 eine Leistung von rund 32 GW erreicht.

Um daraus die **Wasserstoffproduktion** in TWh herzuleiten, müssen auch der Wirkungs- und Nutzungsgrad der Elektrolyseure berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad erhöht sich gemäß Daten des EWI Global PtX Cost Tool (EWI 2021) kontinuierlich von 65 Prozent im Jahr 2019 auf 69 Prozent im Jahr 2030 und schließlich auf 72 Prozent im Jahr 2040. Dies ist ebenfalls annähernd deckungsgleich zu den in den bisherigen Szenarien ermittelten Wirkungsgraden (SCHUR u. a. 2023; RONSIEK u. a. 2024). Hinsichtlich des Nutzungsgrades werden 4000 Volllaststunden gemäß NWS (BMW i 2020) und EWI Global PtX Cost Tool (EWI 2021) angenommen.

Die gesamte jährliche Wasserstofferzeugung in TWh errechnet sich daraus wie folgt:

$$\text{Wasserstofferzeugung}_t^{TWh} = \frac{\text{Elektrolyseleistung}_t^{GW}}{1000} * \text{Wirkungsgrad}_t^{\%} * 4000^h$$

Der in Deutschland erzeugte grüne Wasserstoff reicht allerdings nicht aus, um den Gesamtbedarf zu decken. Die Bedarfslücke wird annahmegemäß aus Importen gedeckt. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche jährlich **Importquote** von 63 Prozent, wobei die Exportquote durch den verzögerten Elektrolyseurausbau bis zum Anfang der 2030er Jahre deutlich höher liegt (vgl. Abbildung 4).

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

$$\text{Benötigte Strommenge aus EE}_t^{TWh} = \frac{\text{Elektrolyseleistung}_t^{GW}}{1000} * 4000^h$$

Bei 2,8 GW installierter Leistung im Jahr 2030 ergibt sich dadurch eine benötigte Strommenge aus erneuerbaren Energien in Höhe von 11 TWh, bei 32,4 GW installierter Leistung im Jahr 2040 werden 129 TWh erneuerbare Energien benötigt. Diese benötigte Strommenge wird als zusätzlich benötigte Strommenge für das Wasserstoff-Szenario definiert. Damit wird keine Verdrängung der erneuerbaren Energien in der Anwendung in anderen Bereichen wie beispielsweise für den Verkehr oder für Wärme angenommen. Dies wird mit dem Delegated Act der Europäischen Union begründet, der in der aktuellen Fassung zusätzliches Energieaufkommen für die Wasserstoffproduktion verlangt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2023).

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

Betrachtet man den in Deutschland erzeugten Wasserstoff, müssen Annahmen zum einen über Kosten zur Elektrolyseurherstellung und zum anderen über Kosten durch den Betrieb der Elektrolyseure getroffen werden. Die **Investitionskosten** (CAPEX) des Aufbaus der Elektrolyseure stammen aus dem EWI Global PtX Cost Tool (EWI 2021). Die für das Wasserstoff-Szenario verwendeten Kosten orientieren sich am EWI 2024 Basis-Szenario (baseline) und verringern sich im Laufe der Zeit. Liegen die CAPEX in 2025 noch bei 613 EUR/kW, so fallen diese bis 2030 auf 511 EUR/kW und auf 420 EUR/kW im Jahr 2040.

Die inländischen Wasserstoffgestehungskosten (LCOH) lassen sich - wie bereits im Wasserstoff-Szenario-v2.1 (RONSIEK u. a. 2024) näher erläutert - anhand folgender Formel in der Einheit EUR/kWh ermitteln:

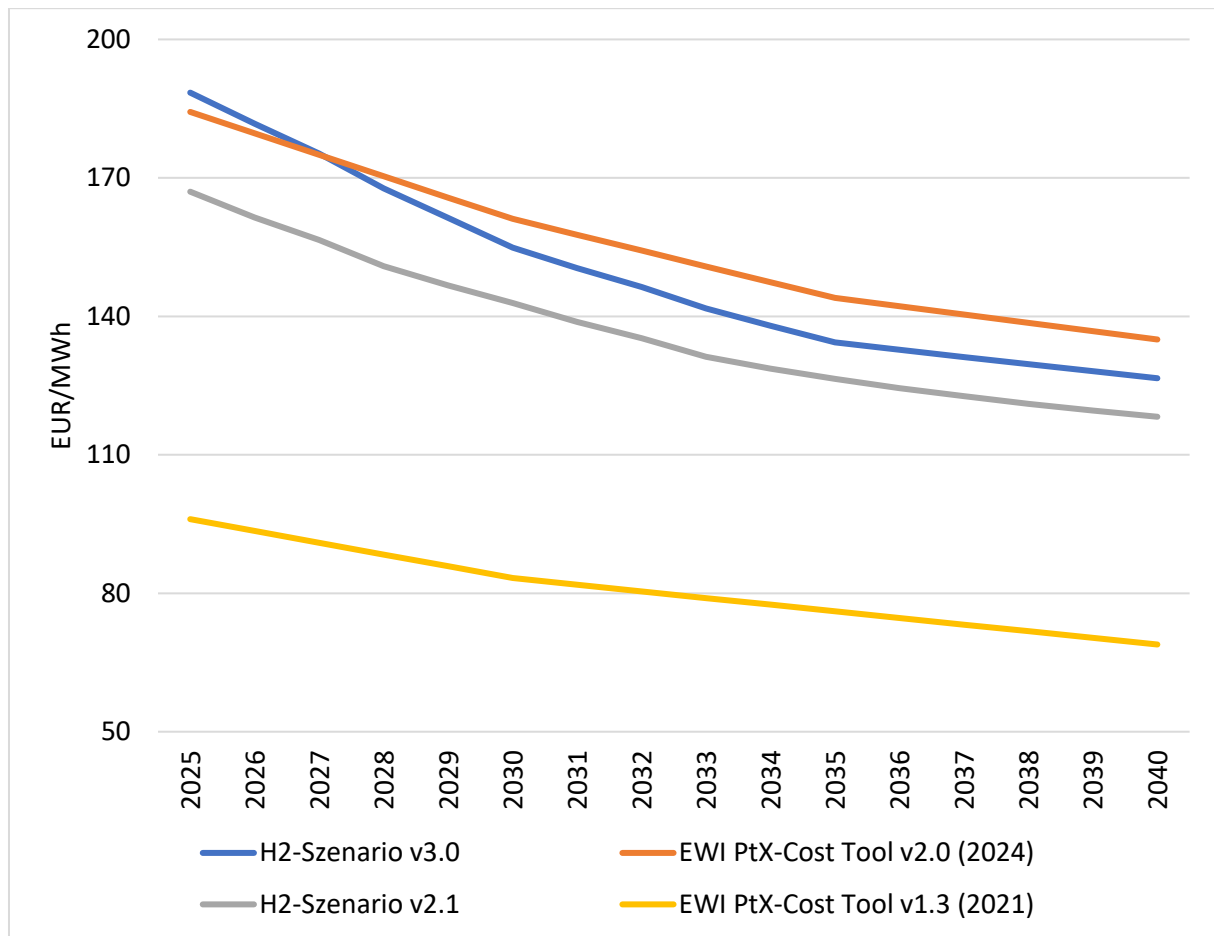
$$LCOH_t^{T_{CAP}} = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{T_{CAP}}} \left(\left(\frac{\frac{r_{T_{CAP}}}{100} * \left(1 + \frac{r_{T_{CAP}}}{100}\right)^n}{\left(1 + \frac{r_{T_{CAP}}}{100}\right)^n - 1} + \frac{OPEX_{T_{CAP}}}{100} \right) \frac{CAPEX_{T_{CAP}}}{VLH_{T_{CAP}}} + S_t \right), & \text{wenn }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

für $T_{CAP} \leq t$

LCOH	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

Mit konstanten Kapitalkosten (WACC) von 9,98 Prozent, einer Lebensdauer der Elektrolyseure von 25 Jahren, konstanten Betriebskosten in Höhe von 2 Prozent der CAPEX und einem Strompreis, der 2025 bei rund 105 EUR/MWh liegt und bis 2040 kontinuierlich auf etwa 72 EUR/MWh fällt (vgl. (EWI 2021), liegen diese (LCOH-v3.0) im Vergleich zum Wasserstoff-Szenario v2.1 (LCOH-v2.1) leicht höher. Da die LCOH in der dritten Version des EWI Global PtX Cost Tools stark nach oben korrigiert wurden und so nur leicht oberhalb der gemäß der obigen Formel errechneten LCOH-v3.0 liegen (vgl. Abbildung 5), werden für das Wasserstoff-Szenario-v3.0 – nicht zuletzt aus Konsistenzgründen zu u.a. den Produktionskosten im Ausland - die Wasserstoffgestehungskosten dem EWI Global PtX Cost Tool entnommen (EWI 2021). So liegen diese im Jahr 2025 bei rund 184 EUR/MWh und fallen bis 2030 auf etwa 161 EUR/MWh und auf etwa 135 EUR/MWh in 2040.

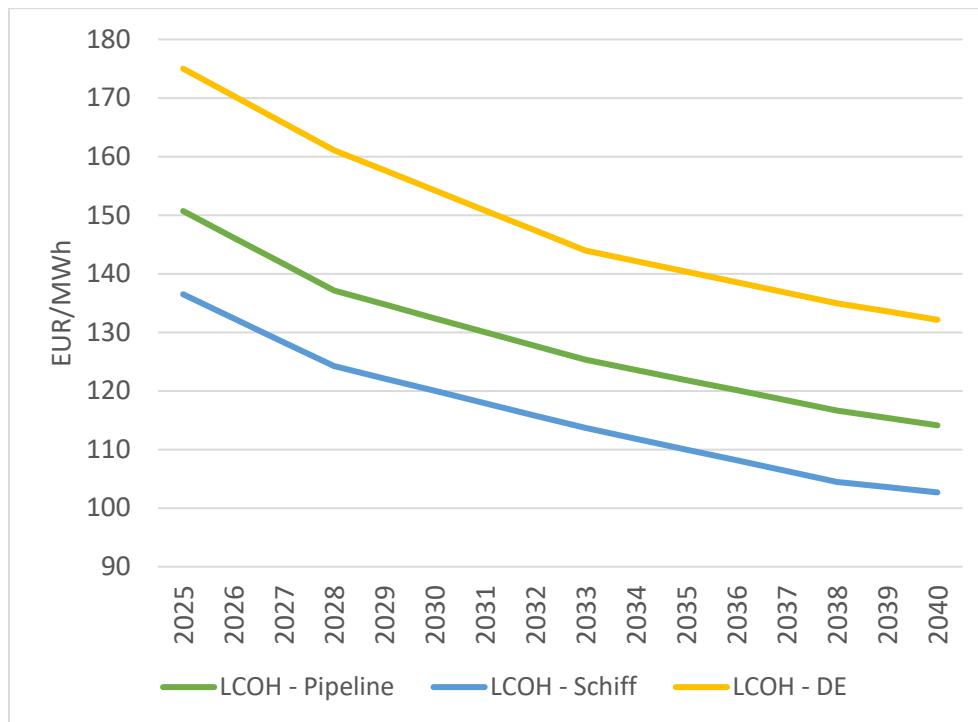
Abbildung 5: Wasserstoffgestehungskosten in Deutschland nach Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen, (EWI 2020; 2021; RONSIEK u. a. 2024)

Die Produktionskosten für Wasserstoff im Ausland stammen, wie bereits oben erwähnt, ebenfalls aus dem EWI Global PtX Cost Tool (EWI 2021). Die für das Wasserstoff-Szenario verwendeten Kosten sind der Mittelwert aus den gewichteten Produktionskosten der Länder, aus denen Deutschland potenziell Wasserstoff importiert. Für den Pipelinetransport infrage kommen dabei die Länder Aserbaidschan, Dänemark, Algerien, Estland, Spanien, Finnland, Frankreich, Vereinigtes Königreich, Irland, Litauen, Marokko, Norwegen, Portugal, Schweden, Turkmenistan, Tunesien und Türkei. Für den Schiffstransport (wobei hier Wasserstoff in Form von Derivaten bezogen wird) infrage kommen dabei die Länder Australien, Chile, Indien, Kanada, Marokko, Mexiko, Namibia, Saudi-Arabien und Südafrika, insbesondere, weil bereits Energiepartnerschaften mit diesen Ländern bestehen (BMWK 2025).

Abbildung 6: Wasserstoffgestehungskosten nach Region



Quelle: Eigene Berechnungen mit Daten vom (EWI 2021)

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 schließlich 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 den Import von Wasserstoffderivaten sind den Importkosten zusätzlich auch Kosten für die Rückumwandlung in Wasserstoff hinzuzurechnen, sodass man schließlich die Bereitstellungskosten erhält. Diese sind für das Wasserstoff-Szenario ebenfalls dem EWI Global PtX Cost Tool entnommen (EWI 2021). Wie bereits von MERTEN u. a. (2023) dargestellt, zeigt sich, dass der Import von Wasserstoff über Pipelines günstiger gegenüber Schiffsoptionen sein wird.

Die Transformation zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft hat annahmegemäß zur Folge, dass sich der Energiemix ändert. Im Vergleich zur Basisprojektion wird kein zusätzlicher Energiebedarf angenommen. Grüner Wasserstoff verdrängt somit fossile Energieträger - wie Gas und Erdöl - und reduziert deren Import. Im Falle der synthetischen Kraftstoffe werden fossiler Schiffsdiesel und fossiles Kerosin ersetzt. Folglich wird der Einsatz von grünem Wasserstoff in TWh dem fossilen Importbedarf in gleicher Höhe ersetzen. Die importierte Menge und der Preis bestimmen somit, ob der wertmäßige Import beim Umschwung auf eine Wasserstoffwirtschaft höher oder niedriger ausfällt.

Um Wasserstoff im Produktionsprozess nutzen zu können, werden in den Sektoren zudem Umrüstungsinvestitionen anfallen (MÖNNIG u. a. 2024). Dies betrifft insbesondere die Stahlbranche und die Energieversorger. In der Stahlherstellung werden Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen ersetzt. Unterstellt wird bei der Annahme zum Investitionsbedarf, dass die Dekarbonisierung von einer Million Tonnen Rohstahl eine Milliarde Euro an Investitionen kostet (VDI-NACHRICHTEN 2022). Im Energieversorgungssektor werden künftig H₂-ready-Gaskraftwerke gebaut (TAGESSCHAU 2024b), wodurch unter Berücksichtigung von Kostenschätzungen von TRANSNETBW (2023) insgesamt bis 2035 zusätzliche Investitionen in Höhe von rund 8 Mrd. Euro entstehen.

3.4 Wasserstoffinfrastruktur – Häfen, Pipelines und Speicher

Für den Import, die Speicherung und die Verteilung des Wasserstoffs müssen Annahmen über Bereitstellung und Kosten der benötigten Infrastruktur getroffen werden. Konkret werden im Wasserstoff-Szenario fünf Hafenprojekte berücksichtigt, zu denen bereits Planungen und Kapazitätsangaben öffentlich verfügbar waren (BMWK 2022a; UNIPER 2025; RWE 2025; BP 2025; DEUTSCHE REGAS 2025). Der Import soll dabei über Ammoniak, das anschließend in Wasserstoff umgewandelt wird, erfolgen. Damit könnten bis 2031 rund 25 TWh Wasserstoff importiert werden. Die Investitionskosten für die Importterminals belaufen sich dabei annahmegemäß auf rund 3,4 Mrd. EUR. Die Annahmen über die Kapazitäten sowie die Investitionskosten fußen auf Angaben auf den Internetseiten der jeweiligen Projekte sowie auf Gesprächen mit Expertinnen und Experten. Die jährlichen Betriebskosten für Wasserstoff-Importterminals liegen gemäß Angaben des EWI bei vier Prozent der Investitionskosten (EWI 2020) und werden für das Wasserstoff-Szenario übernommen. Da die Hafenkapazitäten alleine nicht ausreichen werden, um den Importbedarf zu decken, wird angenommen, dass der restliche Import per grenzüberschreitende Pipelines erfolgt.

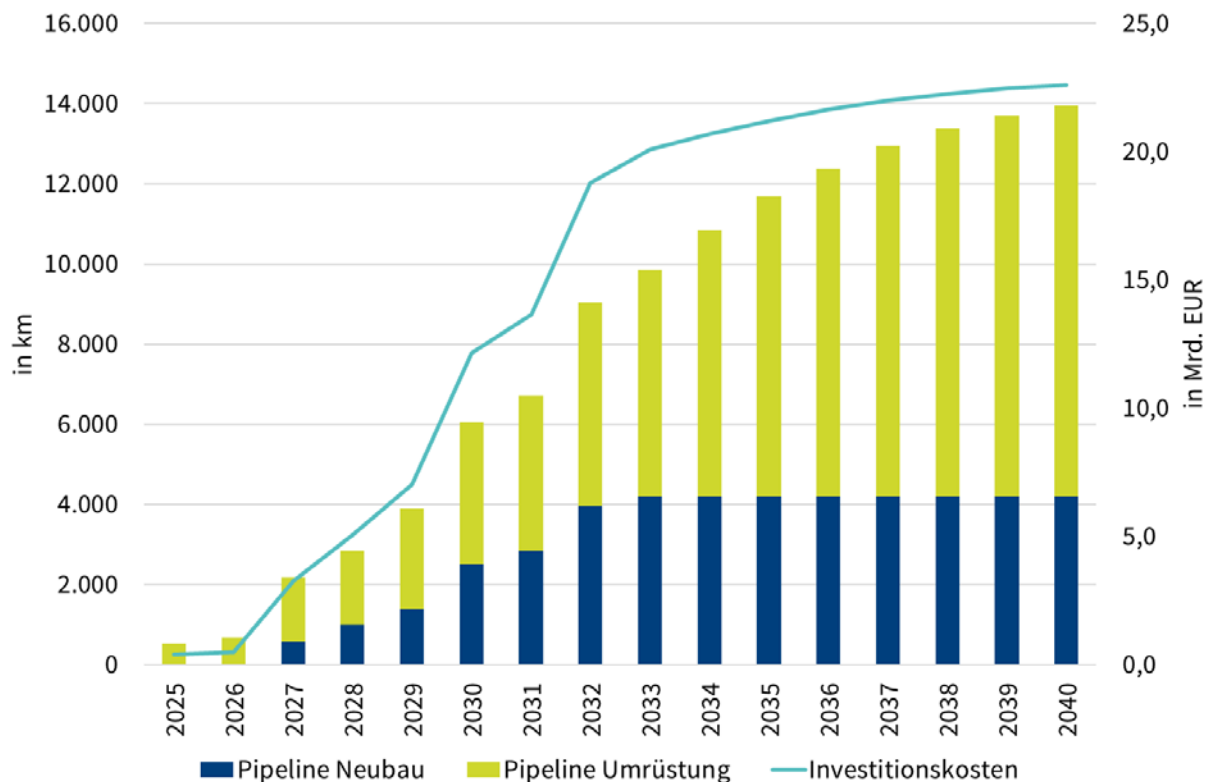
Für den inländischen Wasserstofftransport wird ein Teil des Erdgasnetzes umgerüstet und genutzt werden können. Darüber hinaus werden allerdings auch neue Pipelines benötigt. Für den Pipelinebau wird auf die Daten des Wasserstoff-Kernnetzes zurückgegriffen, die detaillierte Angaben bis zum Jahr 2032 zur Verfügung stellen. Demnach sollen bis 2032 9.040 km Wasserstoffpipelines um- bzw. neugebaut und damit eine Transportkapazität von 278 TWh zur Verfügung gestellt werden (FNB GAS). Nach 2032 folgt der Ausbau im Wasserstoff-Szenario dem Wasserstoffbedarf, wobei ein gewisser Vorlauf des Ausbaus vor dem eigentlichen Bedarf modelliert wird. Im Jahr 2040 wird von einem etwa 14.000 km langem Wasserstoffnetz ausgegangen, welches zu rund 10.000 km aus umgerüsteten sowie zu 4.000 km aus neu gebauten Pipelines besteht.

Die Annahmen zu den anfallenden Investitionskosten werden im Wasserstoff-Szenario-v3.0 ebenfalls auf Grundlage der Daten des Wasserstoff-Kernnetzes (FNB GAS) getroffen. Der Leitungsumbau erfordert demnach Investitionen von rund 567.000 Euro pro km. Beim Neubau von Pipelines fallen

annahmegemäß 3,6 Mio. Euro pro km an. Zusätzliche Investitionskosten entstehen durch Verdichterstationen. In Abbildung 7 werden die Annahmen über die Entwicklung der Pipelinelänge und der Investitionskosten des Wasserstoffnetzes dargestellt. Es werden jeweils kumulierte Werte gezeigt.

Die jährlichen Betriebskosten des Pipelinenetzes belaufen sich auf den Kilometer gerechnet auf rund 53.000 Euro pro Jahr (FNB GAS). Die Betriebskosten werden nur für die neugebauten Pipelines berechnet, die zusätzlich zu den Betriebskosten der bereits bestehenden Pipelines hinzukommen.

Abbildung 7: Wasserstoff-Pipelinennetz: Länge und Investitionskosten



Quelle: Eigene Berechnungen mit Daten der (FNB GAS)

Um einen der großen Vorteile von Wasserstoff - die Möglichkeit zur längerfristigen **Speicherung** - zu realisieren, benötigt es ausreichende Speicherkapazitäten. Für das Wasserstoff-Szenario wird der Speicherbedarf an den Wasserstoffbedarf der Energieversorger zum Betreiben von Wasserstoff-Kraftwerken gekoppelt. Berücksichtigt werden dafür langfristige Speichermöglichkeiten in Salzkavernen, die vor allem zur saisonalen Speicherung geeignet sind.

Gemäß BÜLTEMEIER u. a. (2022) können ab 2027 31 Kavernenspeicher auf eine vollständige Wasserstoffspeicherung umgestellt werden. Damit können 30,7 TWh Wasserstoffspeicherkapazität bereitgestellt werden. Dies erfordert Investitionen in Höhe von insgesamt 1,1 Mrd. Euro. Zur Deckung des zusätzlichen Speicherbedarfs müssen anschließend neue Wasserstoff-Kavernenspeicher gebaut werden. Ein Wasserstoff-Kavernenspeicher kann demnach eine Energiemenge von ca. einem TWh speichern und erfordert Investitionen in Höhe von rund 270 Mio. Euro pro Kaverne. Die

Investitionskosten für den Speicherum- und -neubau belaufen sich im Wasserstoff-Szenario bis 2040 somit kumuliert auf rund 8,5 Mrd. Euro. Für die jährlich anfallenden Betriebskosten der Wasserstoffspeicher werden, SENS u. a. (2022) folgend, im Wasserstoff-Szenario jährlich rund zwei Prozent der Investitionskosten als Betriebskosten angenommen.

Um den Schwerlastverkehr im Wasserstoff-Szenario mit ausreichend Wasserstoff versorgen zu können, werden zudem Tankstellen benötigt. 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 EUROPÄISCHEN UNION 2023b). Zur Versorgung des Schwerlastverkehrs werden bis 2040 rund 100 zusätzliche Tankstellen benötigt und dabei rund 156 Mio. EUR Investitionskosten pro TWh Tankstellenkapazität veranschlagt (ROSE/WIETSCHEL/GNANN). Damit belaufen sich die Investitionskosten bis 2040 kumuliert auf 4,6 Mrd. Euro. Es wird angenommen, dass vier Prozent der Investitionskosten als Betriebskosten anfallen.

3.5 Exportannahmen

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass deutsche Hersteller von Wasserstofftechnologien – in erster Linie Elektrolyseuren – einen Anteil am Weltmarkt von zehn Prozent realisieren können. Diese Annahme fußt auf dem Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie des BMWK (BMWK 2022d). Um die konkreten Exportvolumina berechnen zu können, braucht es darüber hinaus Informationen zur weltweit installierten Elektrolyseleistung. Bis 2030 werden laut der IEA Datenbank zu Wasserstoffproduktions-Projekten weltweit insgesamt rund 515 GW an Elektrolysekapazität installiert (IEA 2024). Dabei wurden auch Projekte berücksichtigt, die sich zurzeit noch in Planung oder in der Konzeptphase befinden und zu denen noch keine finale Investitionsentscheidung getroffen wurde. Für den langfristigen Horizont 2050 wird die Annahme von 3300 GW weltweiter Elektrolyseleistung aus der Net Zero Roadmap 2050 der IEA übernommen (IEA 2023). Die Werte für den dazwischen liegenden Zeitraum werden interpoliert. Jeweils subtrahiert werden die Annahmen zur Elektrolyseleistung in Deutschland. Der Exportpreis ergibt sich aus den Investitionskosten für Elektrolyseure (siehe Abschnitt 3.3).

3.6 Synthetische Kraftstoffe

Anders als für den Schwerlasttransport wird für die Luft- und Schifffahrt angenommen, dass Wasserstoff nicht direkt als Antriebsmittel genutzt wird, sondern in Form von synthetischen Kraftstoffen zum Einsatz kommt. Wie bereits im Wasserstoff-Szenario-v2.1, wird auch im Wasserstoff-Szenario-v3.0 davon ausgegangen, dass ein Anteil des synthetischen Kraftstoffbedarfs im Inland produziert wird.

Zunächst wurde der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen in der Luft- und Schifffahrt ermittelt. Im **Luftverkehr** dürfte der Kraftstoffbedarf gemäß FRAUNHOFER ISI (2024b) von 131 TWh im Jahr 2025 auf 142 TWh im Jahr 2040 ansteigen. Im Zuge der Umsetzung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU ist eine nationale Quote zum Beimischen von strombasiert hergestelltem, nachhaltigem Kerosin (Power-to-Liquid, PtL) zu konventionellem Kerosin im Flugverkehr eingeführt worden. Demnach soll beim Luftverkehr die energetische Quote für PtL-Kerosin in 2026 bei 0,5 Prozent, in 2028 bei ein Prozent und in 2030 bei zwei Prozent liegen (BMDV).

Im Oktober 2023 wurde zudem vom Rat der EU die Verordnung über die „ReFuelEU Aviation“ Initiative angenommen. Darin werden Mindestanteile für nachhaltige Flugkraftstoffe (sustainable aviation fuels, SAF) definiert (RAT DER EUROPÄISCHEN UNION 2023a). Unter Berücksichtigung des Kraftstoffbedarfs und unter Anwendung der Mindestanteile steigt der Bedarf an PtL-Kerosin von 3 TWh im Jahr 2030 auf 14 TWh im Jahr 2040. Die Produktionskosten für PtL-Kerosin in Deutschland belaufen sich gemäß (EWI 2021) auf 451 EUR/MWh im Jahr 2030 und sinken anschließend auf 374 EUR/MWh im Jahr 2040. Die Bereitstellungskosten für PtL-Kerosin aus dem Ausland liegen mit 404 EUR/MWh im Jahr 2030 und 337 EUR/MWh im Jahr 2040 tiefer als die inländischen Produktionskosten.

Der Bedarf an synthetischem Kraftstoff für die **Schifffahrt** in Form von Methanol orientiert sich an der EU Verordnung über die „FuelEU Maritime“-Initiative (RAT DER EUROPÄISCHEN UNION 2023c). Die Hochseeschifffahrt hatte 2020 gemäß (FRAUNHOFER ISI 2024a) einen Energiebedarf von 43 TWh. Der Energieverbrauch der Binnen- und Küstenschifffahrt lag 2020 bei knapp 3 TWh (AG ENERGIEBILANZEN 2022). Die „FuelEU Maritime“-Initiative gibt vor, dass die CO₂-Intensität in der Schifffahrt bis 2030 um sechs Prozent und bis und bis 2040 um 31 Prozent gesenkt werden soll. Unter der Annahme, dass der CO₂-Reduktionspfad durch den Ersatz mit synthetischen Kraftstoffen im gleichen Umfang erzielt wird, und dass etwa 90 Prozent der Energie von Schiffen verbraucht wird, die unter die „FuelEU Maritime“-Initiative fallen ergibt sich ein Methanolbedarf von rund zwei TWh im Jahr 2030 und von 13 TWh im Jahr 2040. Die Produktionskosten für Methanol in Deutschland belaufen sich gemäß EWI (2021) auf 405 EUR/MWh im Jahr 2030 und sinken anschließend auf 330 EUR/MWh im Jahr 2040. Die Bereitstellungskosten für Methanol aus dem Ausland liegen bei 373 EUR/MWh im Jahr 2030 und 308 EUR/MWh im Jahr 2040.

In der IEA Projektdatenbank finden sich 38 Projekte zur Herstellung von Wasserstoffderivaten in Deutschland, bei drei Projekten handelt es sich um Folgephasen bereits erfasster Projekte (IEA 2024). Demonstrationsprojekte, Projekte zur Einspeisung von grünem Methan in das Gasnetz oder die Produktion von Wasserstoffderivaten für die Grundstoffchemie (bereits abgedeckt durch die Annahmen in Abschnitt 3.2) wurden für die Berechnungen nicht berücksichtigt. Die inländischen Produktionskapazitäten für Methanol und PtL-Kerosin ergeben sich letztlich aus sechs Projekten der

IEA Projektdatenbank und den hierzu gesammelten Informationen bzgl. Produktionsmengen und Produktionsbeginn aus öffentlich zugänglichen Quellen, ergänzt um Informationen aus den Expertinnen- und Experteninterviews. Demnach könnten in Deutschland bis 2030 je zwei TWh PtL-Kerosin und Methanol hergestellt und die Produktion bis 2040 auf vier TWh PtL-Kerosin ausgeweitet werden, während sie für Methanol konstant bliebe. Für die inländische Produktion von Wasserstoffderivaten werden zusätzlicher Wasserstoff und Kohlenstoff benötigt. Es wird angenommen, dass das benötigte CO₂ durch Industrieabtrennung für den Syntheseprozess zur Verfügung steht. Der zusätzliche Wasserstoffbedarf für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist in Abschnitt 3.2 mitberücksichtigt. Während der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen bis 2030 zu einem großen Teil durch die inländische Produktion gedeckt werden könnte, nimmt der Importbedarf im Zeitverlauf deutlich zu.

Unter Annahme des oben skizzierten Ausbaupfades und den Investitionskosten pro kW-Leistung aus dem EWI Global PtX Cost Tool (EWI 2021), belaufen sich die Investitionskosten für die Syntheseanlagen bis 2030 auf rund eine Mrd. Euro und bis 2040 auf rund 1,4 Mrd. EUR. Es wird angenommen, dass rund zwei Prozent der Investitionskosten als Betriebskosten anfallen.

3.7 Weiterbildung

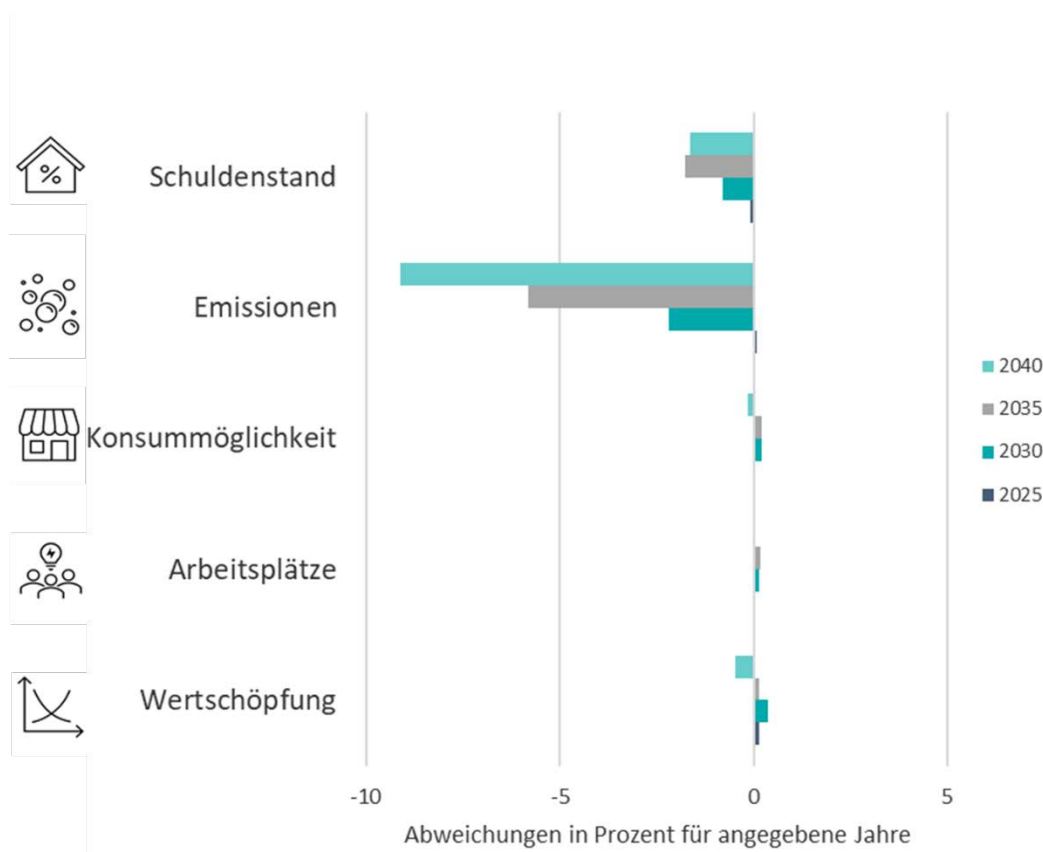
Auf Basis durchgeführter Expertinnen- und Experteninterviews und durch Erkenntnisse aus weiteren Projekten (GWS 2024; BIBB 2024; SAMRAY/SCHUR) wird angenommen, dass es bis Ende der 2020er-Jahre in mehreren Branchen zu einer Steigerung der Weiterbildungsinvestitionen kommt, da neue Technologien, Produktionsprozesse und Sicherheitsstandards eingeführt werden müssen und Beschäftigte zusätzliche Kenntnisse über Wasserstofftechnologien benötigen. Anschließend sinken diese bis Mitte der 2030er-Jahre wieder auf das Niveau, das ohne den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zu erwarten gewesen wäre. 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 2023). Neben den gesteigerten Weiterbildungsinvestitionen deutscher Unternehmen können in der Weiterbildungsbranche weitere Umsätze durch Bildungsexporte in das Ausland generiert werden (NIEDIEK). 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 (RONSIK u. a. 2024).

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse im Überblick

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Effekte eines Wasserstoffhochlaufes unter den gegebenen Prämissen, für ausgewählte Kenngrößen der Volkswirtschaft in Deutschland. Eindeutig ist, dass der Umstieg auf eine Wasserstoffwirtschaft die CO₂-Emission deutlich reduzieren kann. Im Vergleich zum Referenz-Szenario im Jahr 2040 können fast 10 Prozent zusätzlich an CO₂-Emissionen eingespart werden. Auch zeigt sich, dass trotz der angenommenen staatlichen Förderung für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft der Schuldenstand des Staates reduziert werden kann. Die Effekte auf die Wertschöpfung sind gering und bis 2035 positiv. In den Folgejahren wird sich die Wirtschaftsleistung, unter den gegebenen Annahmen, relativ zum Vergleichslauf abschwächen. Dagegen können über alle betrachteten Zeitpunkte mehr Arbeitsplätze aufgebaut werden - auch wenn die Dynamik ebenfalls gegen Ende des Betrachtungshorizontes nachlässt.

Abbildung 8: Ergebnisse des Vergleichs zwischen Wasserstoff-Szenario und QuBe-Basisprojektion (8. Welle)



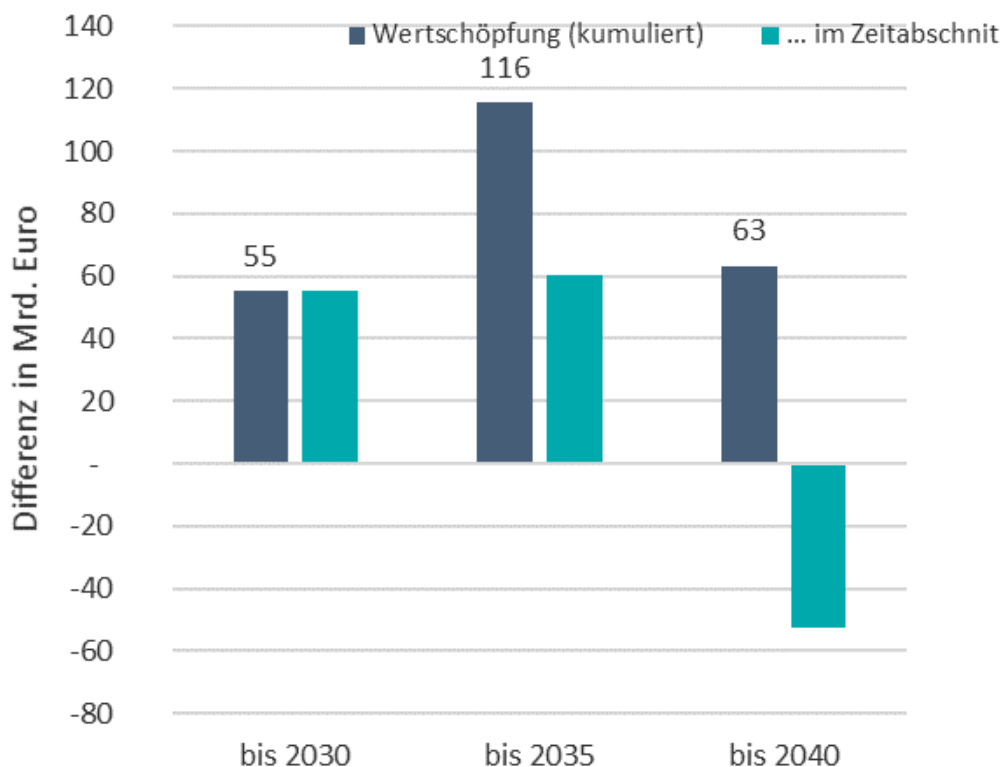
Quelle: Eigene Berechnungen

4.2 Folgen für Wertschöpfung und Wachstum

Der Blick auf die Ergebnisse zeigt Abbildung 9, dass sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bis 2035 positiv auf das Wirtschaftswachstum auswirkt. Erst in den Folgejahren ist mit einer

Abschwächung des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (BIP) relativ zum Referenz-Szenario auszugehen. Über den gesamten Projektionszeitraum, von 2025 bis 2040, kann allerdings ein kumulierter Wertschöpfungsgewinn in Höhe von 63 Mrd. Euro eingefahren werden. Die höheren Wertschöpfungsbeiträge bis 2035 von 116 Mrd. Euro gehen in den nachfolgenden Jahren etwas verloren, da die Wachstumseffekte aus zusätzlich anfallenden Ausrüstungs- und Bauinvestitionen sukzessive auslaufen. Auch dämpfen die Preissteigerungen im Inland durch höhere Energiekosten die internationale Wettbewerbsfähigkeit, was die realen Exportmöglichkeiten einschränkt. Die höheren Betriebskosten einer wasserstoffbasierten Wirtschaft geben sich langfristig zu erkennen. Sollten sich die Preisannahmen für die Gesteigungs- und bereitstellungskosten von Wasserstoff im In- und Ausland und die Kosten für den Import von fossilen Energieträgern zugunsten von Wasserstoff ändern, könnte auch langfristig mit höheren Wertschöpfungseffekten zu rechnen sein. Eine hierzu vorgenommene Sensitivitätsanalyse im Wasserstoff-Szenario-v2.1 hat die Effekte veränderter Wasserstoffgestehungskosten deutlich gemacht (RONSIK u. a. 2024).

Abbildung 9: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 10 sind die Abweichungen in den einzelnen Komponenten des preisbereinigten BIP in Fünf-Jahres-Schritten bis 2040 zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario dargestellt. Es zeigt sich, dass die höhere Wirtschaftsleistung vor allem auf Ausrüstungsinvestitionen im Inland (z.B. in Elektrolyseure und Pipelines) zurückzuführen ist. Die zusätzlichen Bauinvestitionen,

die vor allem durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien getätigt werden, haben einen ebenso positiven Einfluss auf das BIP.

Die Konsumausgaben der privaten Haushalte werden sich zunächst aufgrund der besseren Beschäftigungssituation, die wiederum Folge der erhöhten Investitionstätigkeit in den Branchen ist, erhöhen. Mehr Menschen in Beschäftigung und bessere Verdienstmöglichkeiten der Erwerbstätigen wirken sich positiv auf den privaten Konsum aus. Langfristig dominieren allerdings die höheren Preiseffekte und der private Konsum wird sich relativ zum Vergleichs-Szenario abschwächen.

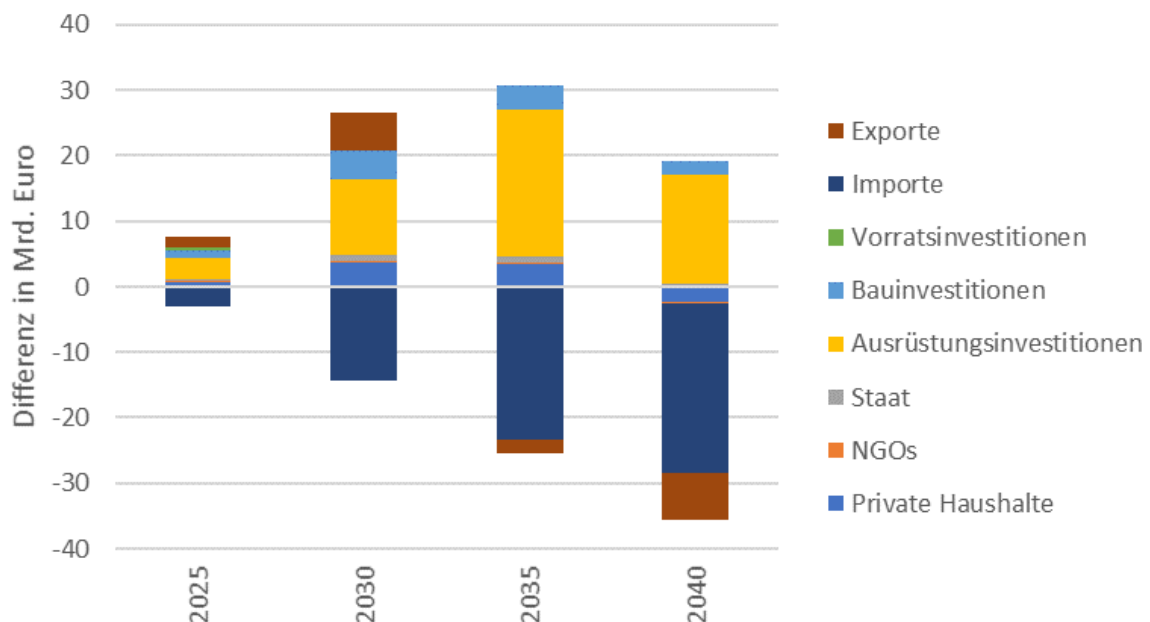
Am Anfang des Projektionszeitraums wirken sich noch die Exporte positiv auf das BIP aus, die sich durch zusätzliche Ausfuhren der Maschinenbau- und Elektroindustrie ergeben. Die Differenz der Exporte nimmt allerdings im Verlauf des Prognosezeitraums ab und dreht ab Mitte der 2030er Jahre ins Negative. Dies liegt zum einen an den sinkenden Investitionskosten für die Herstellung von Elektrolyseuren in Deutschland, was den nominalen Exportumsatz für Elektrolysetechnologie senkt. Der nominelle Exportwert steigt dadurch weniger schnell, als bei höheren Herstellungskosten angenommen werden könnte. Gleichzeitig erhöht sich das generelle Preisniveau in Deutschland, was die Stückkosten steigern lässt und die internationale Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland produzierter Produkte schmälert.

Über den gesamten Zeitraum dämpfen die höheren Importausgaben das BIP im Wasserstoff-Szenario ab. Sie sind der Hauptgrund, warum der Wasserstoffhochlauf nicht über den gesamten Prognosezeitraum eine makroökonomische Erfolgsgeschichte ist. Da die Nachfrage nach Wasserstoff höher eingeschätzt wird als die inländischen Produktionsmöglichkeiten, wird der zusätzlich benötigte Wasserstoff importiert werden müssen. Gleichwohl auch langfristig die Wasserstoffkosten sinken werden, ist mit einem niedrigeren Preis für die fossilen Energieträger zu rechnen. Die fossilen Energieträger büßen ihren Kostenvorteil nach aktuellem Erkenntnisstand nicht ein.

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

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

Abbildung 10: Wirkung auf die Komponenten des preisbereinigten Bruttoinlandsprodukts (in Mrd. EUR)



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Wirkung auf die nominale Produktion ist in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt – für diejenigen Branchen mit den absolut stärksten Effekten im Jahr 2040. Während insgesamt die nominale Produktion bis 2040 auf einem höheren Niveau verläuft als im Referenz-Szenario, ist die Wirkung auf die Branchen unterschiedlich verteilt.

Vor allem die Chemieindustrie wird hohe Umsatz- und Produktionsverluste einfahren. Die Herstellung von chemischen Erzeugnissen verteuert sich im Wasserstoff-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario, wodurch vergleichsweise weniger produziert wird. Der steigende und teurere Importbedarf von grünem Wasserstoff im Verlauf der Projektion wird die negative Produktion in der Branche verstärken. Die starke Negativwirkung ist zu großen Teilen rechnerischer Natur, da die hohen und

steigenden Wasserstoffimporte zu einem erheblichen Teil den Importen der Chemieindustrie zugeschrieben werden. Steigende Importe reduzieren rein rechnerisch die heimische Produktion – wenn nicht gleichzeitig die Endnachfrage erhöht wird. Für viele Produkte der chemischen Industrie wird allerdings gerade die Wasserstoffwirtschaft zu einem geringeren Produktionspotential führen, da viele wasserstoffbasierte Produktionen wie bspw. die Ammoniakproduktion ins Ausland verlagert werden können.

Andere Industriezweige werden dagegen in einem Wasserstoffhochlauf-Szenario besser dastehen als in einem Szenario ohne wasserstoffbasierte Produktionsvorgänge. Das betrifft insbesondere die Energieversorger, die für den Großteil der heimischen Wasserstoffproduktion verantwortlich sind. Hier wirkt sich aber auch die zusätzliche Investitionstätigkeit der Branche in die Infrastruktur und in den Kraftwerkspark aus.

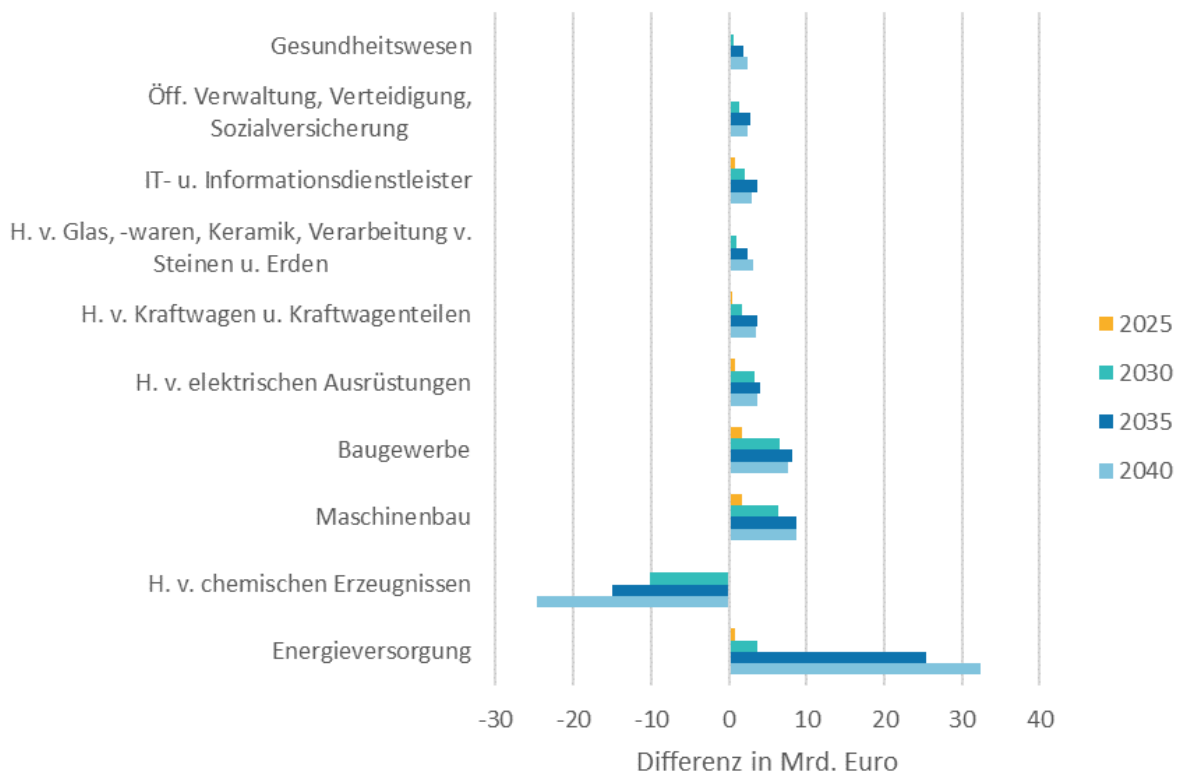
Das Baugewerbe wird insbesondere in der Aufbauphase der Wasserstoffwirtschaft höhere Umsätze als im Referenz-Szenario erzielen können. Der zusätzliche Bau von Pipelines, Häfen oder Speicherstätten sowie erneuerbare Energieanlagen wirken sich hier positiv aus.

Der Maschinenbau und die elektrischen Ausrüster profitieren von den sich aus der Entwicklung der Wasserstofftechnologie ergebenden Exportpotentialen. Der Umsatzgewinn kann im gesamten Prognosehorizont sukzessive ausgebaut werden.

Glas, -waren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden wird ebenso wie die Metallerzeuger (nicht in Abbildung 11 enthalten) von dem Umstieg auf die Wasserstoffwirtschaft profitieren. Durch die Transformation kann der Umsatz durch höhere Preise für grüne Produkte erhöht werden.

Andere Branchen werden ebenfalls Umsatzzuwächse erzielen, profitieren aber eher indirekt von der Entwicklung. So zum Beispiel die IKT-Branche, die insbesondere Dienstleistungen für viele Branchen des verarbeitenden Gewerbes erbringt. Der öffentliche Dienst oder das Gesundheitswesen wird hauptsächlich durch induzierte Effekte und Preiswirkungen mit Umsatzzuwächsen reagieren.

Abbildung 11: Zehn Wirtschaftsbereiche (63er Gliederung, WZ-2008) mit den größten absoluten Wirkungen im Jahr 2040 auf die nominale Produktion im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040



Quelle: Eigene Berechnungen

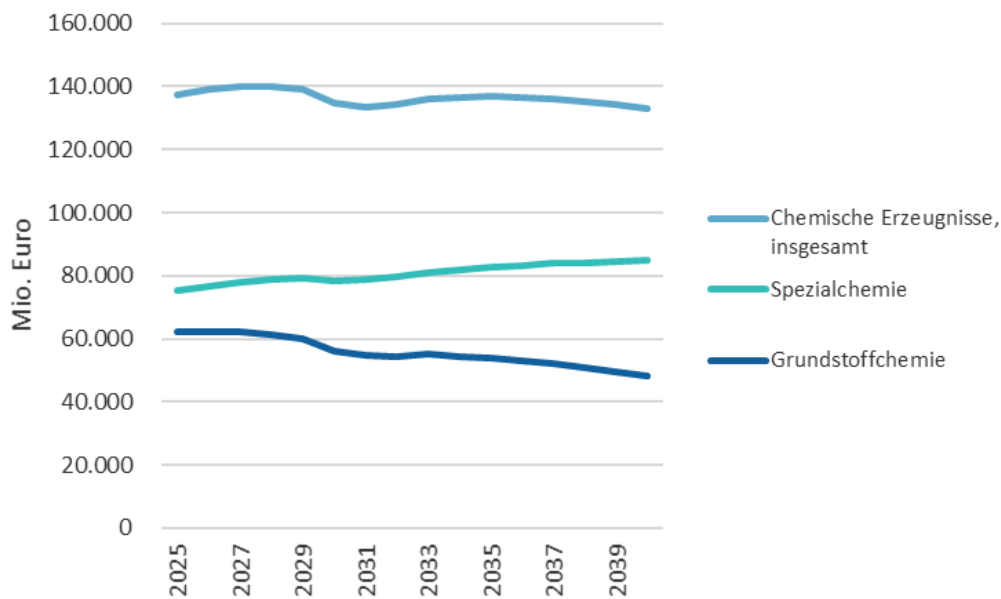
4.3 Nominale Produktion: Deep-Dive in die Gütergruppen

Für ausgewählte Gütergruppen wird ein tieferer Blick auf die Entwicklung in einer Wasserstoffwirtschaft geworfen. Dabei wird gezeigt, welche der unterliegenden Gruppen von der Entwicklung besonders profitieren oder verlieren werden. Der Blick wird dabei nicht auf die Abweichung zum Referenz-Szenario gelegt, sondern auf die Entwicklung der Teil-Branchen im Wasserstoff-Szenario relativ zu der Entwicklung der übergeordneten Branchen ebenfalls im Wasserstoff-Szenario.

4.3.1 Chemische Erzeugnisse: (1) Grundstoff- und (2) Spezialchemie

Die Chemieindustrie wird in einer wasserstoffbasierten Wirtschaft wie hier angenommen, ihre Produktion deutlich verringern. Statt wie in der Vergangenheit die Produktion kontinuierlich zu steigern, ist ein eher konstantes bis langfristig leicht sinkendes (nominales) Produktionsniveau bis 2040 zu erwarten. Davon betroffen wird allerdings hauptsächlich die Grundstoffchemie sein. Die Spezialchemie wird dagegen auch langfristig weiterhin wachsen können. Diese schon in der Vergangenheit zu beobachtende Spezialisierung in der Chemieindustrie wird durch den Übergang in eine Wasserstoffwirtschaft forciert.

Abbildung 12: Nominale Produktion der Gütergruppe Chemische Erzeugnisse

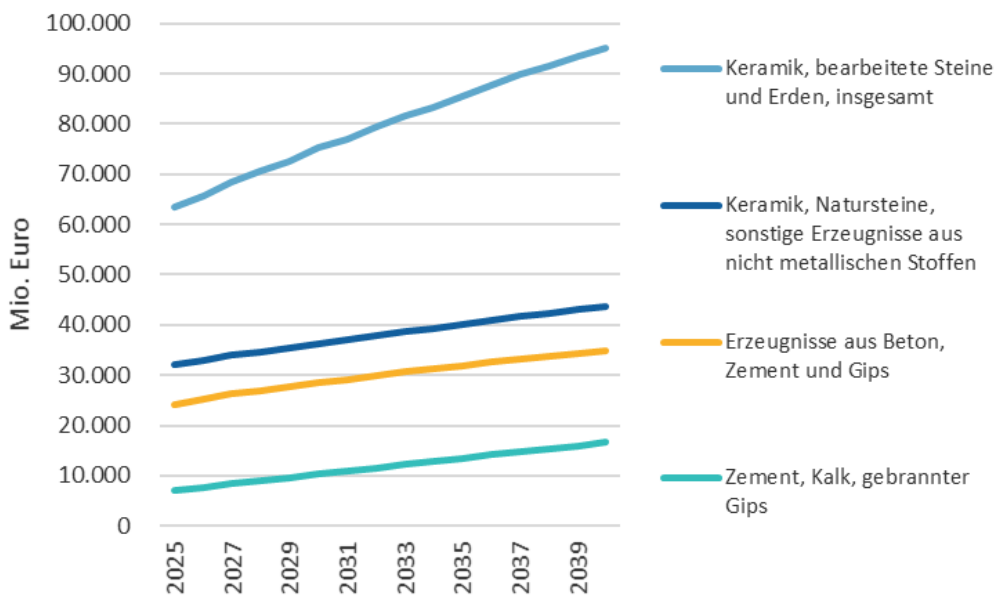


Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.2 Keramik, bearbeitete Steine und Erden: (1) Keramik, Natursteine, sonstige Erzeugnisse aus nicht metallischen Stoffen, (2) Zement, Kalk, gebrannter Gips und (3) Erzeugnisse aus Beton, Zement und Gips

Gleichwohl die vom Umsatz kleinste Untergruppe dieser Gütergruppe, wird Zement, Kalk und gebrannter Gips die höchsten Umsatzzuwächse generieren können. Diese werden zwar auch langfristig absinken, aber auch 2040 gut 2,3 Prozentpunkte über den Wachstumsraten der anderen Teilgruppen (Keramik oder Beton) liegen. Der Umsatzanteil wird von heute knapp 11 Prozent auf 17,5 Prozent im Jahr 2040 ansteigen. Verlieren wird dagegen die Branche Keramik, Natursteine und sonstige Erzeugnisse aus nicht metallischen Stoffen.

Abbildung 13: Nominale Produktion der Gütergruppe Keramik, bearbeitete Steine und Erden



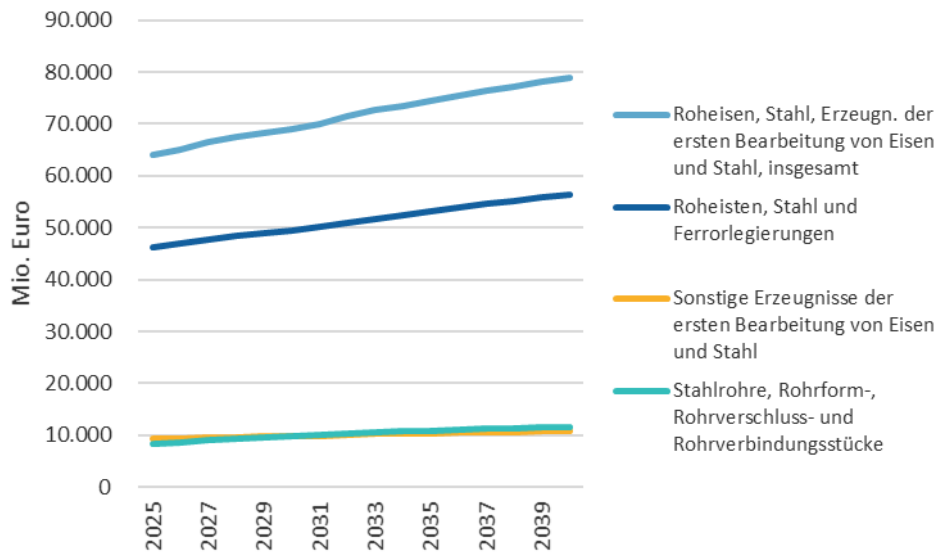
Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.3 Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl: (1)

Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen, (2) Stahlrohre, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücke und (3) Bearbeitung von Eisen und Stahl

Die Stahlherstellung kann durch den Wasserstoffhochlauf ihre nominale Produktion nicht nur im Vergleich zum Referenz-Szenario erhöhen. Auch kann das hohe Umsatzniveau der Roheisen- und Stahlproduktion langfristig gehalten werden. Der Umsatzanteil zwischen den einzelnen Güterkategorien wird bis 2040 nahezu unverändert bleiben. Dies hat auch damit zu tun, dass die Güter in einer engen vertikalen Integration zueinanderstehen. Also die Herstellung von Roheisen oft mit der Herstellung von Stahlrohren und anderen Erzeugnissen aus der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl in enger Verbindung stehen.

Abbildung 14: Nominale Produktion der Gütergruppe Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl

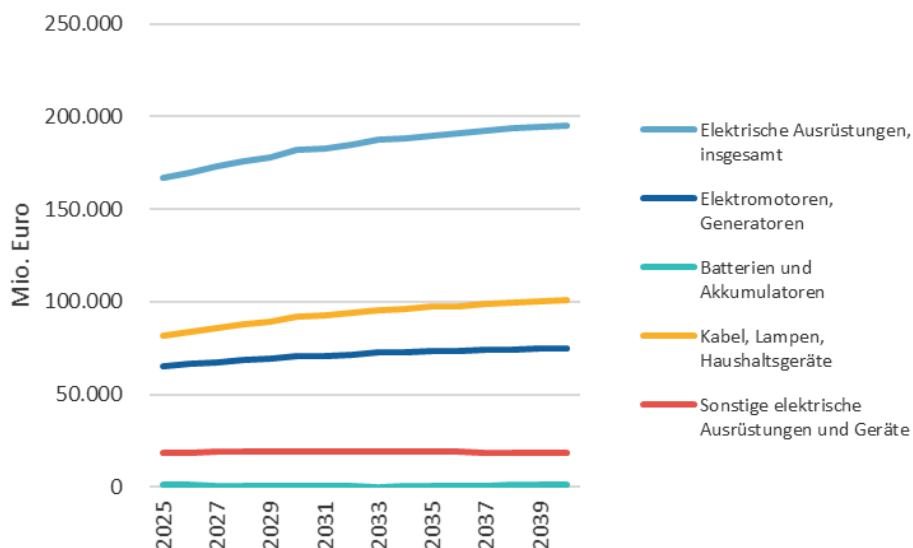


Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.4 Elektrische Ausrüstungen: (1) Elektromotoren, Generatoren, (2) Batterien und Akkumulatoren, (3) Kabel, Lampen, Haushaltsgeräte und (4) Sonstige elektrische Ausrüstungen und Geräte

Der Bereich Elektrische Ausrüstungen profitiert insgesamt sowohl vom inländischen Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft als auch durch den Export von Wasserstofftechnologien und kann die nominale Produktion weiter steigern. Insbesondere die Untergruppen Elektromotoren, Generatoren und Kabel, Lampen, Haushaltsgeräte können durchweg positive Produktionszuwächse verzeichnen. Lediglich die sonstigen elektrischen Ausrüstungen und Geräte weisen einen leichten Produktionsrückgang bis 2040 auf.

Abbildung 15: Nominale Produktion der Gütergruppe Elektrische Ausrüstungen

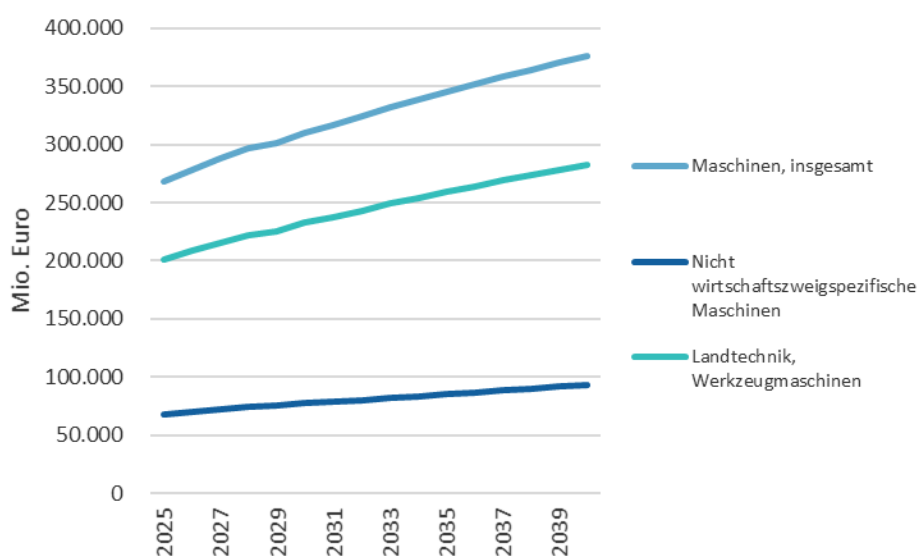


Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.5 Maschinen: (1) Nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen und (2) Landtechnik, Werkzeugmaschinen

Die Umsatzzuwächse aus den Technologieexporten werden im Maschinenbau hauptsächlich den nicht-wirtschaftszweigspezifischen Maschinen zuzurechnen sein. Landtechnik und Werkzeugmaschinen werden zwar auch indirekte, positive Effekte erfahren. Allerdings schlagen diese Effekte weniger stark aus. Bis 2040 wird der nicht-wirtschaftszweigspezifische Zweig einen Umsatzanteil von 68 Prozent erreicht haben – von einem heutigen Niveau kommend das bei 45 Prozent liegt.

Abbildung 16: Nominale Produktion der Gütergruppe Maschinen

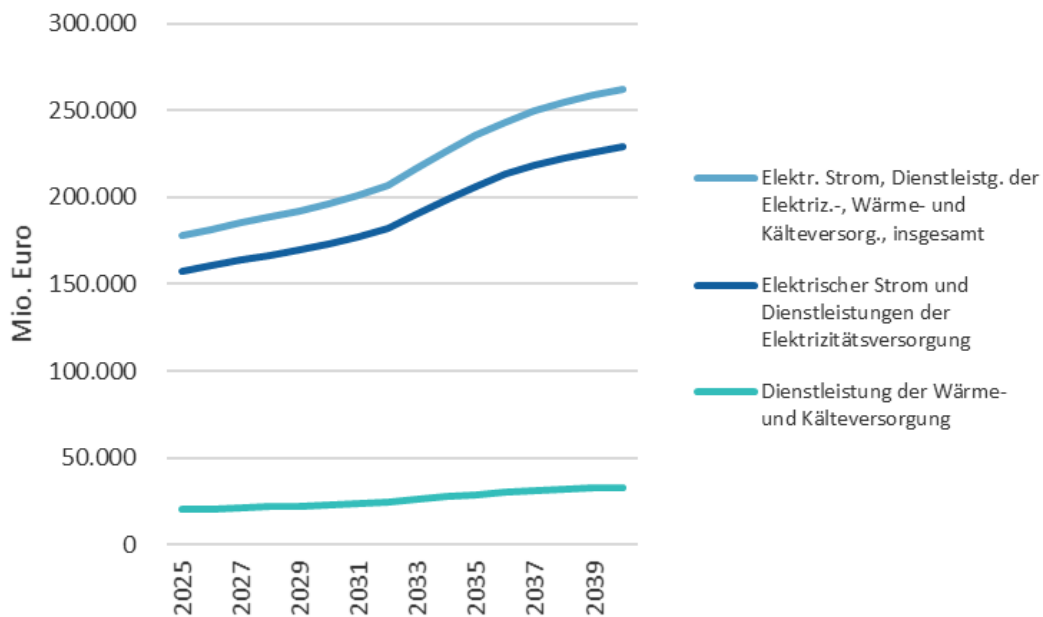


Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.6 Elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung: (1) Elektrischer Strom und Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung und (2) Dienstleistung der Wärme- und Kälteversorgung

Durch die Wasserstoffherzeugung mittels elektrischen Stroms kann diese Gütergruppe ihre Produktion deutlich erhöhen. Zwischen 2023 und 2040 kann die nominale Produktion in der Gütergruppe insgesamt um fast 50 Prozent gesteigert werden. Die Steigerung im umsatzschwächeren Bereich der Dienstleistungen der Wärme- und Kälteversorgung fällt dabei sogar noch etwas stärker aus als im Bereich Elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung. Dies dürfte jedoch vor allem mit den höheren Energiekosten zusammenhängen und einer geringen Nachfrageelastizität.

Abbildung 17: Nominale Produktion der Gütergruppe elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung, Wärme- und Kälteversorgung



Quelle: Eigene Berechnungen

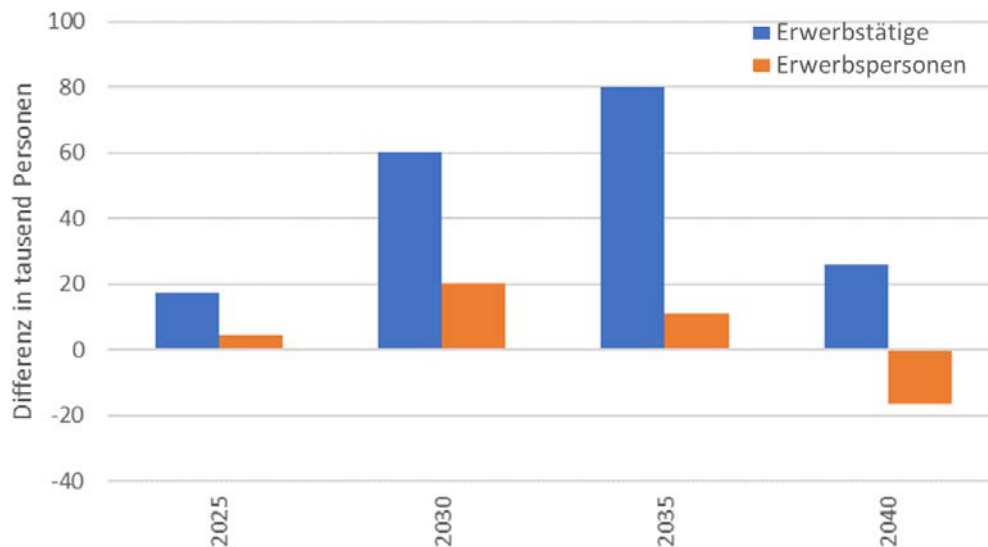
4.4 Folgen für den Arbeitsmarkt

Auf den Arbeitsmarkt haben die getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durchweg positive Effekte. In Abbildung 18 sind die Abweichungen der Zahl an Erwerbstätigen und Erwerbspersonen zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario in Fünf-Jahres-Schritten bis 2040 dargestellt. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2025 bis 2040 wird es zu einem Anstieg der Erwerbstätigen um durchschnittlich jährlich 54.000 Personen gegenüber dem Referenz-Szenario kommen. Gegen Ende des Projektionszeitraums lassen die positiven Erwerbstätigeneffekte etwas nach.

Auch die Zahl an Erwerbspersonen (Erwerbstätige und Erwerbslose) liegt bis 2040 über der im Referenz-Szenario (vgl. Abbildung 18). Zwischen 2025 und 2040 sind durchschnittlich jährlich 11.000 Personen mehr auf dem Arbeitsmarkt aktiv. Das heißt, dass durch die im Vergleich zum Referenz-Szenario positive Wirtschaftsentwicklung und die damit einhergehenden besseren Verdienstmöglichkeiten nicht nur mehr Personen beschäftigt sein, sondern auch mehr Personen ihre Arbeitskraft auf dem Arbeitsmarkt zur Verfügung stellen werden (MÖNNIG/ZIKA 2023). Mit abschwächender Wirtschaftsentwicklung gegen Ende des Projektionszeitraums wird dieser Effekt allerdings zurückgehen.

Insgesamt und über den gesamten Projektionshorizont hinweg wird die Zahl der Erwerbslosen auf einem niedrigeren Niveau liegen als im Referenz-Szenario.

Abbildung 18: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen und die der Erwerbspersonen (in Tsd. Personen)



Quelle: Eigene Berechnungen

Der Blick auf die Erwerbstätigen getrennt nach Wirtschaftsbereichen zeigt ein detaillierteres Bild. In Abbildung 19 sind die zehn Wirtschaftsbereiche mit den größten absoluten Abweichungen im Jahr 2040 zum Referenz-Szenario in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 dargestellt. Mit Ausnahme der Chemieindustrie, befinden sich in der Aufzählung hauptsächlich Wirtschaftsbereiche, deren Erwerbstätigenzahlen vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft profitieren werden. Dabei profitieren oder verlieren die Branchen aus unterschiedlicher Betroffenheit von dem Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft.

Zum einen können die Branchen **direkt** von der Wasserstofftransformation betroffen sein. Dabei handelt es sich um Effekte, die sich direkt aus den Annahmen ableiten lassen.

- Zum Beispiel wirkt sich die Annahme der höheren Exportmöglichkeiten der Elektrolyseure direkt auf die betreffenden Exportbranchen, **Maschinenbau** und **Elektrotechnik**, aus. Diese Branchen können nicht nur ihre Umsätze und reale Produktion steigern, sondern im Zuge dessen auch neue Arbeitsplätze anbieten.
- Eine der am stärksten positiv betroffenen Branchen ist das **Baugewerbe**. Ursache dafür sind die zusätzlichen Bauinvestitionen in die Wasserstoffinfrastruktur und der zusätzliche Ausbau der erneuerbaren Energien. Auch hier sind Umsätze und Produktion positiv betroffen.
- Der Anstieg im Bereich **Erziehung und Unterricht** ist auch direkt mit dem Wasserstoffhochlauf in Verbindung zu bringen, was unter anderem auf die steigenden Weiterbildungsbedarfe für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zurückzuführen ist.

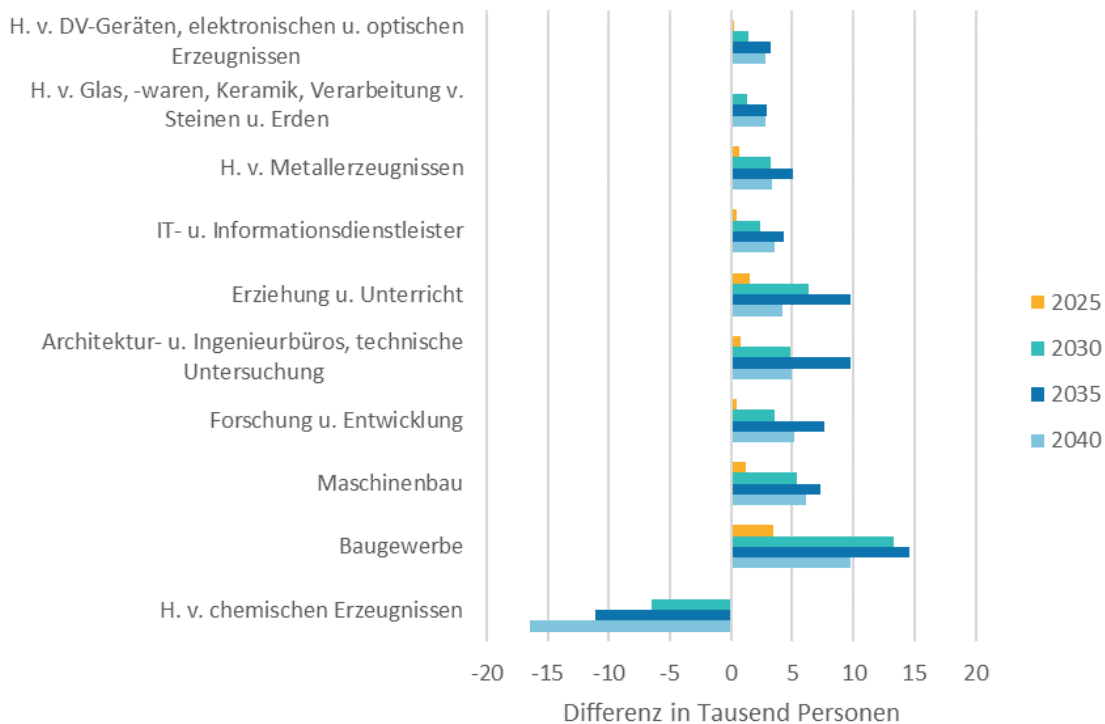
- Die **Herstellung von chemischen Erzeugnissen** verteuert sich im Wasserstoff-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario, wodurch vergleichsweise weniger produziert wird und entsprechend weniger Arbeitskräfte benötigt werden.

Indirekte Effekte sind solche Effekte, die durch die direkten Effekte impliziert werden.

- So bewirkt die hohe Bautätigkeit für den Aufbau der Infrastruktur auch die Nachfrage nach **Architekturleistungen**.
- Zusätzliche Arbeitsplätze im **IKT-Bereich** wird aufgrund der höheren Nachfrage nach deren Dienstleistungen durch andere Branchen initiiert.
- 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** sind indirekt betroffen, indem ihre Dienstleistungen verstärkt von den direkt betroffenen Wirtschaftsbereichen nachgefragt werden.

Induzierte Effekte wiederum sind solche Effekte, die sich nachgelagert aus den direkten und indirekten Effekten ergeben. Meistens wird damit der Konsummultiplikator angesprochen, weil durch die vorlaufenden Effekte implizite Einkommensveränderungen die Ausgaben beeinflussen. Negative Erwerbstätigeneffekte im **Gastgewerbe und im Einzelhandel** (nicht in Abbildung 19 enthalten) sind beispielsweise auf die höheren Preise zurückzuführen, die sich aus dem insgesamt höheren Preisniveau in Folge der steigenden Vorleistungsbezüge für grünen Wasserstoff ergeben.

Abbildung 19: Zehn Wirtschaftsbereiche (63er Gliederung, WZ-2008) mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040



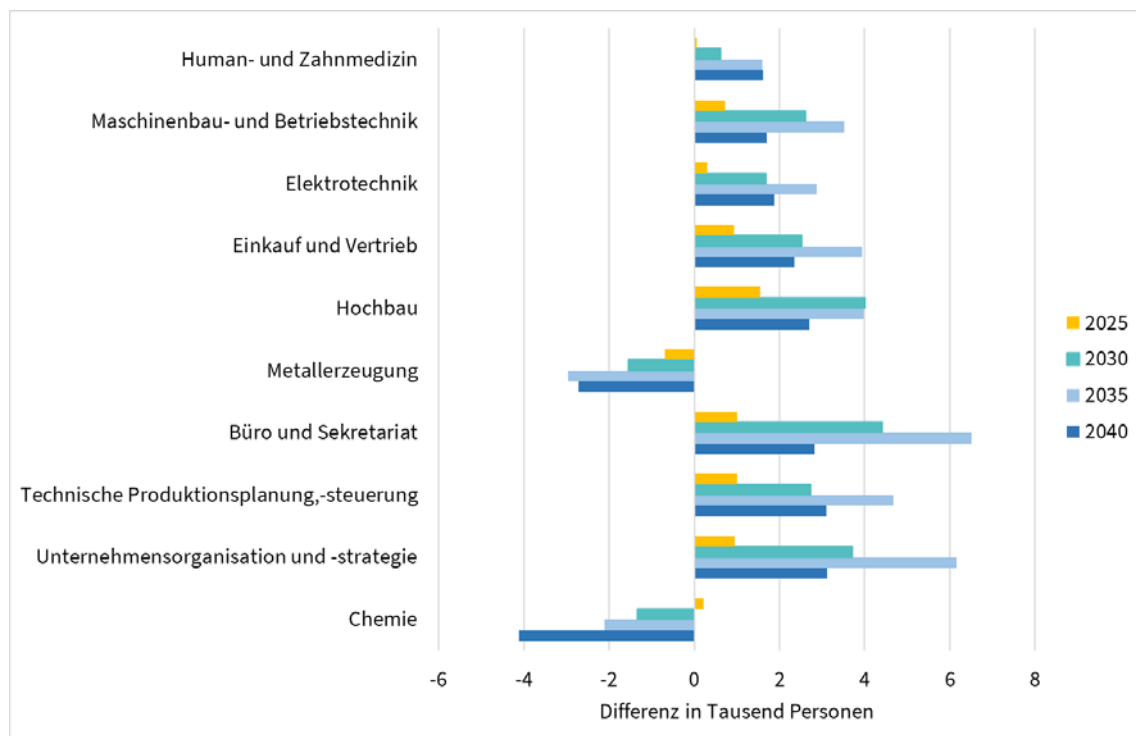
Quelle: Eigene Berechnungen

Für eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios auf die Berufsstruktur zeigt Abbildung 20 die zehn Berufsgruppen (3-Steller der KldB 2010) mit den größten absoluten Abweichungen im Jahr 2040 zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Referenz-Szenario in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040. Anders als für die Betrachtung der Wirtschaftsbereiche ist aufgrund des Branchen-Beruf-Mixes eine einfache Zuordnung der Berufe in direkt, indirekt und induziert betroffene Berufe kaum möglich.

Bei der Berufsgruppe mit der größten Abweichung an Erwerbstätigen handelt es sich um Chemieberufe. Hier liegen die Erwerbstätigenzahl aufgrund des Produktionsrückgangs in der Chemieindustrie insbesondere langfristig deutlich niedriger als im Referenz-Szenario. Ebenfalls negativ ist der Effekt auf die Berufsgruppe der Metallerzeugung. Zwar kann die nominale Produktion in der Gütergruppe Roheisen, Stahl und Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl weiter gesteigert werden, dies liegt jedoch an einem höheren Preisniveau. Höhere Erwerbstätigenzahlen zeigen sich hingegen in der Unternehmensorganisation und -strategie. Dies kommt dadurch zustande, dass diese Berufsgruppe in vielen Wirtschaftsbereichen und in verhältnismäßig hoher Anzahl vertreten ist. Gleiches trifft auf die Berufsgruppen Büro und Sekretariat, Einkauf- und Vertrieb zu und speziell mit Blick auf das Verarbeitende Gewerbe auch für die Technische Produktionsplanung und -steuerung. Dennoch sind unter den Top-Zehn auch Berufe, welche die Beobachtungen bei den Wirtschaftszweigen

widerspiegeln. So werden vermehrt Erwerbstätige in den Berufsgruppen Hochbau, Elektrotechnik sowie Maschinenbau- und Betriebstechnik eingestellt. Die positive Wirkung auf die Human- und Zahnmedizin ergibt sich aus induzierten Effekten. In den Berufsgruppen Unternehmensorganisation und -strategie, Hochbau und Elektrotechnik bestanden 2023 gemäß Bundesagentur für Arbeit bereits Engpässe auf dem Arbeitsmarkt (BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT 2022). Hier dürfte es für die Unternehmen im Zuge eines Wasserstoffhochlaufs sowohl kurz-, mittel- als auch langfristig schwerer werden geeignetes Personal aus diesen Berufsgruppen zu rekrutieren.

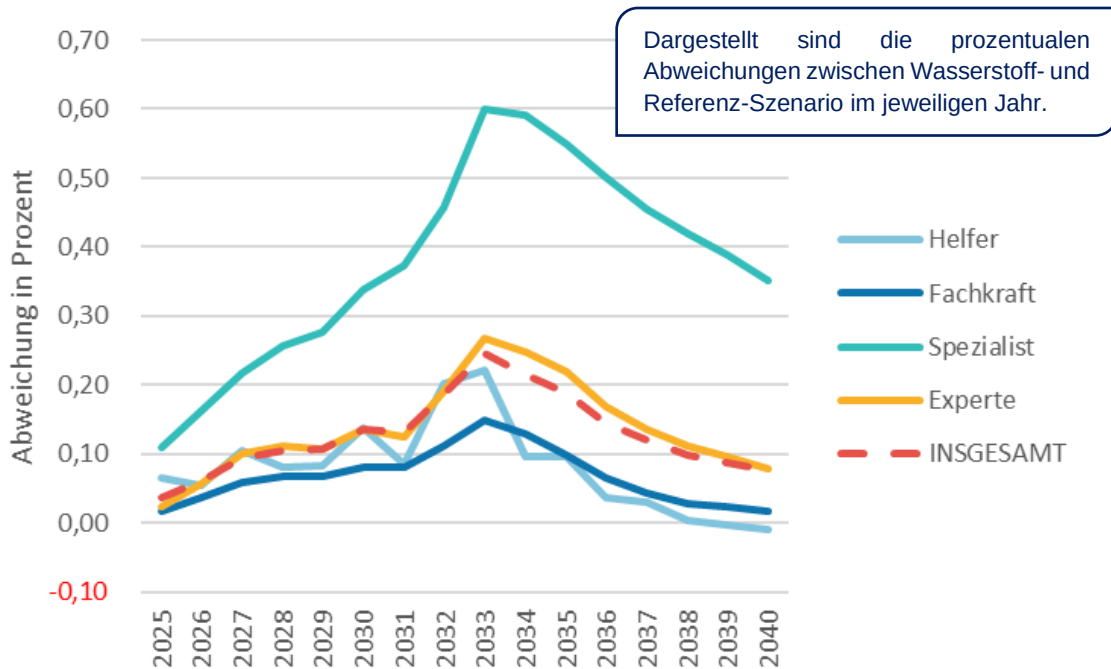
Abbildung 20: Zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen im Jahr 2025, 2030, 2035 und 2040 (3-Steller KldB 2010)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 21 stellt die Abweichungen der Erwerbstätigenzahlen zum Referenz-Szenario getrennt nach Anforderungsniveau in relativer Abweichung dar. Die rote gestrichelte Linie zeigt die relative Abweichung der Erwerbstätigen insgesamt. Dabei wird ersichtlich, dass insbesondere Spezialistinnen- und Spezialistentätigkeiten überdurchschnittlich stark in einem Wasserstoffhochlauf-Szenario nachgefragt werden. Die Expertinnen und Experten entwickeln sich in etwa gemäß dem Durchschnitt aller Anforderungsniveaus. Fachkräfte und Hilfskräfte werden relativ gesehen dagegen unterdurchschnittlich betroffen sein. Hilfskräfte werden zudem gegen Ende der Projektion weniger nachgefragt werden als im Referenz-Szenario. Es zeigt sich, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft mit einer deutlichen Tendenz zu höheren Ansprüchen an die ausgeübten Tätigkeiten der Beschäftigten einhergeht.

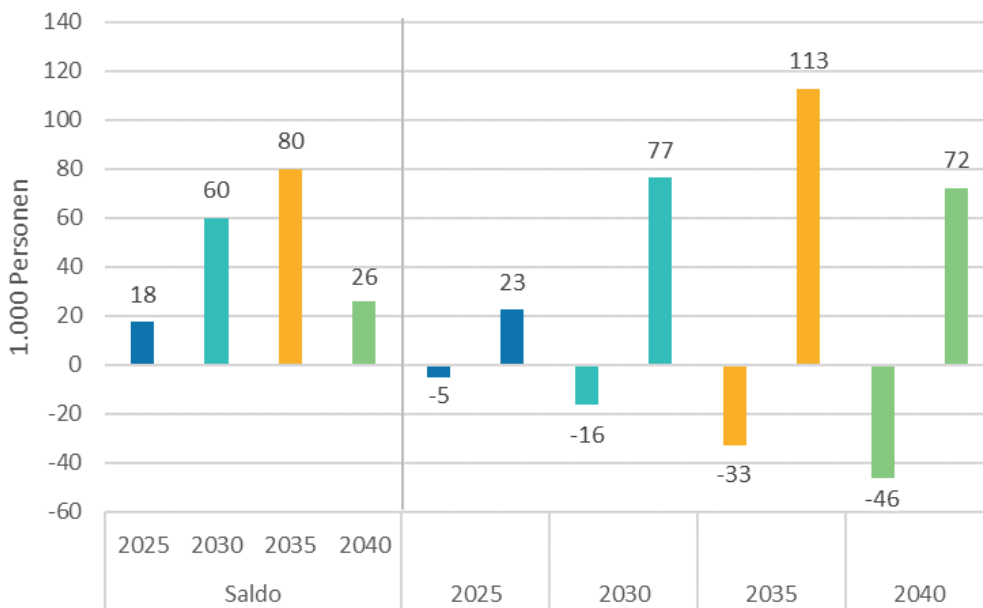
Abbildung 21: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Anforderungsniveaus 2025-2040 (in Prozent)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 22 veranschaulicht die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze nach Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombinationen (72 Wirtschaftsbereiche x 144 Berufsgruppen = 10.368 Kombinationen) im Vergleich zur Basisprojektion. Im Jahr 2040 werden im Wasserstoff-Szenario 72.000 neue Arbeitsplätze vorhanden sein, die es im Referenz-Szenario nicht gibt. Umgekehrt gibt es im Referenz-Szenario 46.000 Arbeitsplätze, die im Wasserstoff-Szenario nicht mehr vorhanden sind. In Summe werden im Wasserstoff-Szenario damit im Jahr 2040 rund 26.000 Arbeitsplätze mehr vorhanden sein als im Referenz-Szenario. Bei dieser konsolidierten Betrachtung können zwar auch neue Arbeitsplätze in spezifischen Wirtschaftsbereichs-Berufs-Kombination entstehen. Wenn in der gleichen Wirtschafts-Berufs-Kombination aber gleichzeitig Arbeitsplätze abgebaut werden, wird implizit angenommen, dass die vorher neu geschaffenen Arbeitsplätze wieder reduziert werden.

Abbildung 22: Wirkung auf die Zahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 (in Tsd. Personen)



Quelle: Eigene Berechnungen

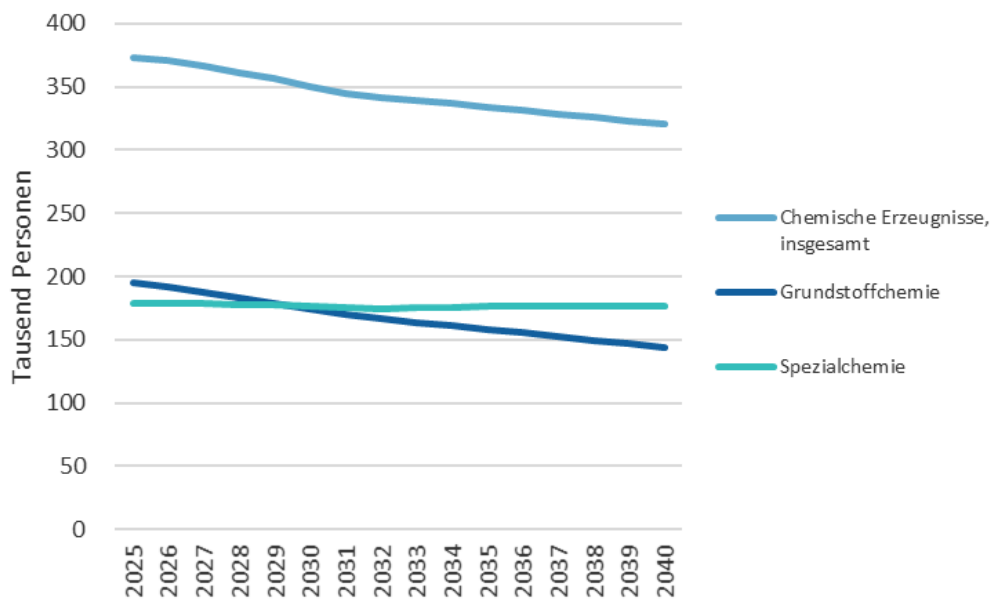
4.5 Erwerbstätige: Deep-Dive in die Produktionsbereiche

Für ausgewählte Produktionsbereiche wird ein tieferer Blick auf die Entwicklung der Erwerbstätigen jener Gruppen im Wasserstoff-Szenario geworfen. Der Blick wird dabei nicht auf die Abweichung zum Referenz-Szenario gelegt, sondern auf die Entwicklung im Zeitverlauf und beinhaltet somit sowohl den allgemeinen Trend der QuBe-Basisprojektion als auch die Wirkungen des Wasserstoff-Szenarios.

4.5.1 Chemische Erzeugnisse: (1) Grundstoff- und (2) Spezialchemie

Die Chemieindustrie wird im Zuge des Produktionsabbaus auch kontinuierlich Arbeitsplätze abbauen. Davon betroffen wird allerdings hauptsächlich die *Grundstoffchemie* sein. Die *Spezialchemie* wird dagegen langfristig zwar auch keinen signifikanten Stellenaufbau betreiben, aber ihr Beschäftigteniveau halten können.

Abbildung 23: Erwerbstätige im Produktionsbereich Chemische Erzeugnisse

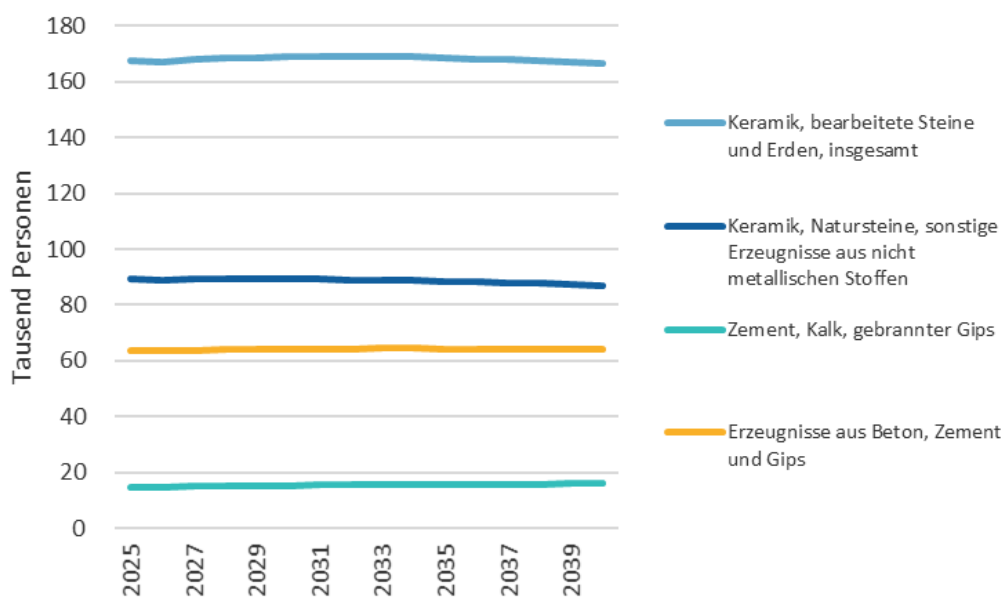


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.2 Keramik, bearbeitete Steine und Erden: (1) Keramik, Natursteine, sonstige Erzeugnisse aus nicht metallischen Stoffen, (2) Zement, Kalk, gebrannter Gips und (3) Erzeugnisse aus Beton, Zement und Gips

Gleichzeitig zu dem steigenden Umsatzanteil der *Zementindustrie* wird in dieser Untergruppe auch der Beschäftigtenanteil leicht zulegen. Der Aufbau der Stellen wird hauptsächlich zulasten der *Keramikindustrie* gehen. Die weiterverarbeitende Industrie von *Beton, Zement oder Gips* kann dagegen ihr Beschäftigtenniveau weitestgehend stabil halten.

Abbildung 24: Erwerbstätige im Produktionsbereich Keramik, bearbeitete Steine und Erden



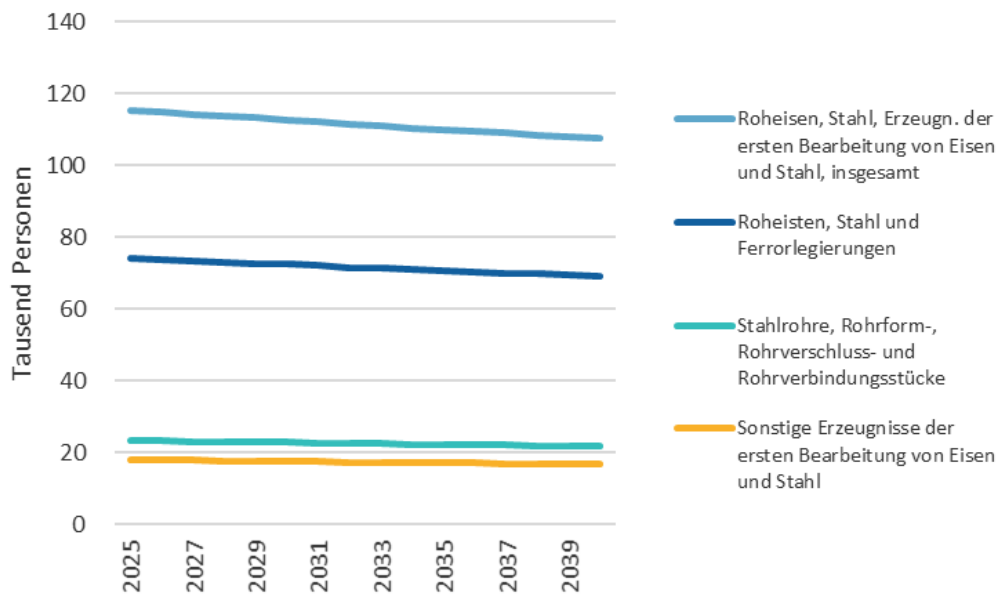
Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.3 Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl: (1)

Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen, (2) Stahlrohre, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücke und (3) Bearbeitung von Eisen und Stahl

Die *Stahlherstellung* kann durch den Wasserstoffhochlauf ihr Beschäftigteniveau weitestgehend stabil halten. Zwar werden auch hier langfristig Stellen abgebaut, jedoch in einem empirisch zu beobachtenden langfristigen Pfad. Es kommt zu keiner signifikanten Änderung der Erwerbstätigenanteile zwischen einzelnen Produktionsbereichen.

Abbildung 25: Erwerbstätige im Produktionsbereich Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl

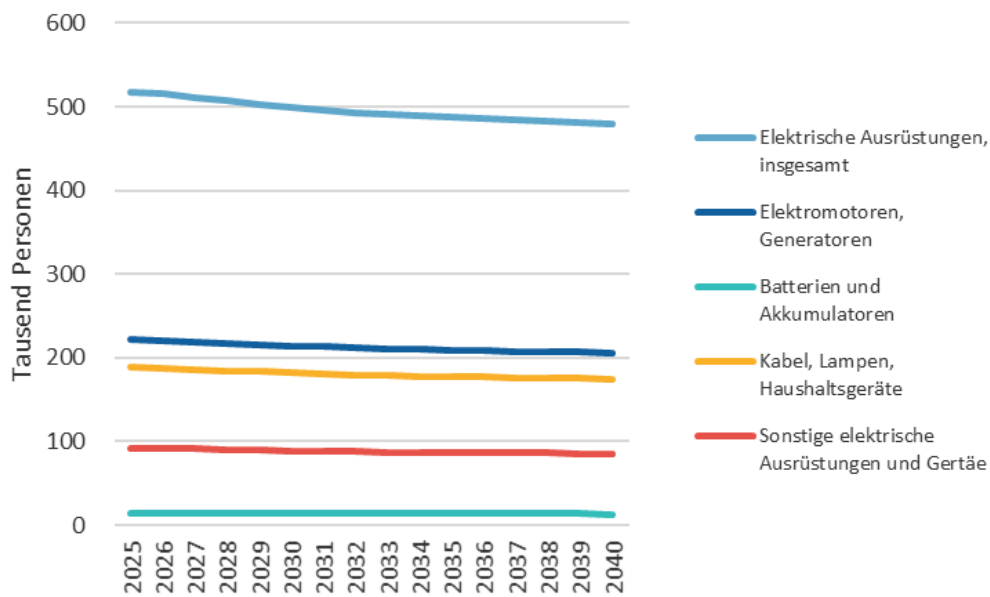


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.4 Elektrische Ausrüstungen: (1) Elektromotoren, Generatoren, (2) Batterien und Akkumulatoren, (3) Kabel, Lampen, Haushaltsgeräte und (4) Sonstige elektrische Ausrüstungen und Geräte

Trotz der positiven Entwicklung der nominalen Produktion, werden im Produktionsbereich der *elektrischen Ausrüstung* langfristig Stellen abgebaut. Wie in der Stahlindustrie auch, folgt auch diese Entwicklung einem empirisch zu beobachtenden langfristigen Pfad. Der Rückgang der Erwerbstätigen weist in allen vier Untergruppen eine ähnliche Dynamik auf.

Abbildung 26: Erwerbstätige im Produktionsbereich: elektrische Ausrüstung

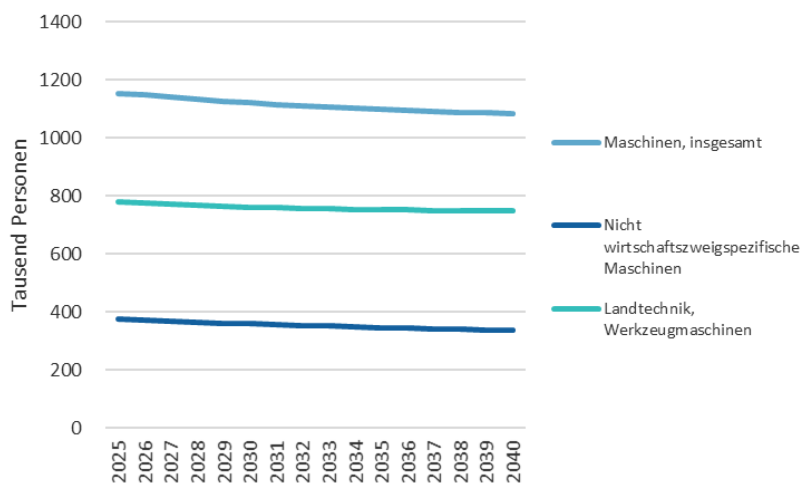


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.5 Maschinen: (1) Nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen und (2) Landtechnik, Werkzeugmaschinen

Während der *Maschinenbau* insgesamt in der langen Frist Personal abbauen wird, werden im Bereich *Nicht-wirtschaftszweigspezifische Maschinen* Arbeitsplätze neu geschaffen. Das liegt direkt mit den Exportmöglichkeiten von Wasserstofftechnologien in Verbindung.

Abbildung 27: Erwerbstätige im Produktionsbereich: Maschinen

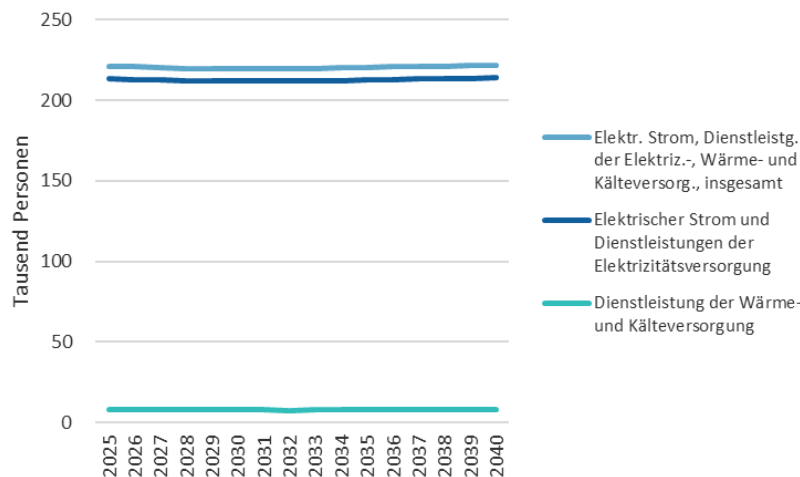


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.6 Elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung: (1) Elektrischer Strom und Dienstleistungen der Elektrizitätsversorgung und (2) Dienstleistung der Wärme- und Kälteversorgung

Im Produktionsbereich *elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung* wird das Erwerbstätigenniveau zu über 90 Prozent aus der *Elektrizitätsversorgung* gespeist. Auch langfristig wird sich daran nichts ändern.

Abbildung 28: Erwerbstätige im Produktionsbereich elektrischer Strom



Quelle: Eigene Berechnungen

5 Exkurs: Alternativ-Szenario zur Deindustrialisierung

Bislang wurden die Wasserstoff-Szenarien mit der QuBe-Basisprojektion als Referenz-Szenario verglichen. In der QuBe-Basisprojektion werden bisherige Trends und Verhaltensweisen beibehalten und bereits beschlossene Maßnahmen oder als unvermeidliche Veränderungen erachtete Einflüsse berücksichtigt. Bei den QuBe-Projektionen handelt es sich jedoch nicht um Szenarien, die eine Erreichung der Klimaziele modellieren. Vielmehr schreiben sie den aktuellen Entwicklungspfad in die Zukunft fort und können durch zusätzliche Annahmen, wie in den Wasserstoff-Szenarien, einen alternativen Entwicklungspfad einschlagen.

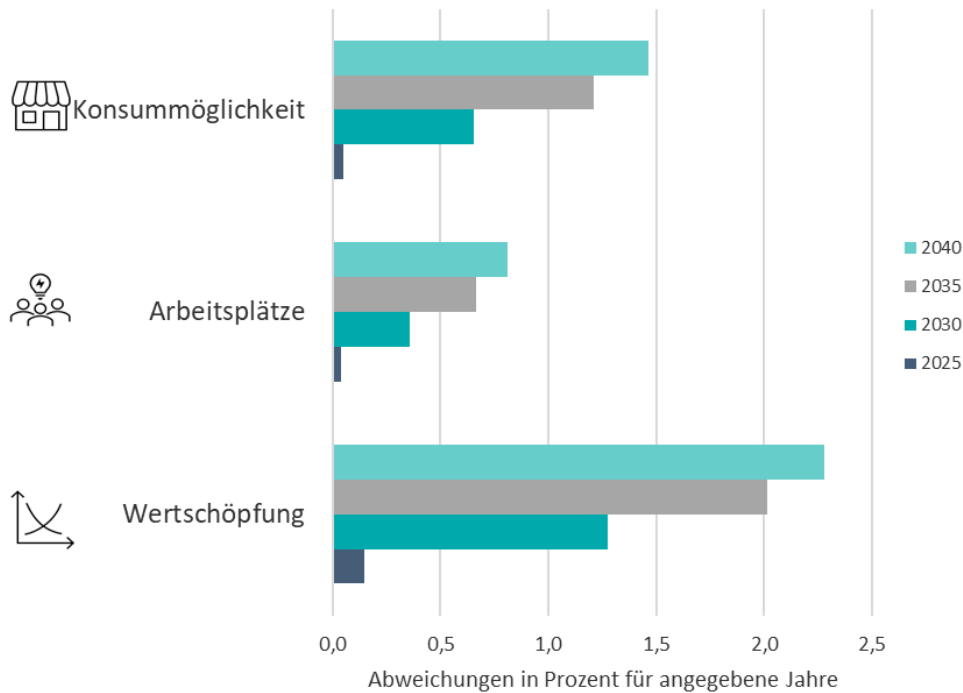
Das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 wurde jüngst explizit in das Grundgesetz aufgenommen (TAGESSCHAU 2025). Der Einsatz von grünem Wasserstoff stellt allerdings nur eine Technologie dar, um dieses Ziel zu erreichen – insbesondere um die Klimaneutralität in energieintensiven Industrien zu erreichen. Andere Möglichkeiten wie Carbon Capture and Storage (CCUS) könnten auch zur Erreichung von Klimaneutralität genutzt werden. Ebenfalls denkbar ist, dass die energieintensiven Industrien ins Ausland abwandern. Diese alternativen Pfade zur Erreichung der Klimaneutralität in energieintensiven Industrien sind in der QuBe-Basisprojektion nicht berücksichtigt worden. Da zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserstoff-Szenarios-v3.0 keine alternativen Technologien im großen Maßstab zur

Anwendung kommen konnten, wurde für die energieintensiven Industrien der Weg der Abwanderung genauer untersucht. Dass in der QuBe-Basisprojektion jedoch nicht von einer Abwanderung ausgegangen wird, ist ein Grund für die langfristig geringere Wertschöpfung durch eine Umstellung auf Wasserstoff.

Es stellt sich somit die Frage, wie das Wasserstoff-Szenario gegenüber einem Szenario abschneidet, in dem die Transformation hin zu einer klimafreundlicheren Produktion verpasst wird und gleich viel CO₂ reduziert wie im Wasserstoff-Szenario – allerdings durch eine verminderte Industrieproduktion (Deindustrialisierungs-Szenario). Dies wäre möglich, wenn konventionell produzierte Güter keinen Absatz mehr finden oder Teile der Produktion ins Ausland verlagert würden. Um dieser Frage zu begegnen, wurde ein zusätzliches Szenario ohne den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft modelliert, in dem die Produktion in den energieintensiven Industrien so weit heruntergefahren wird, dass die zusätzliche CO₂-Emissionsreduktion insgesamt des Wasserstoff-Szenarios auch in dem Deindustrialisierungs-Szenario getroffen wird. Dabei ist zu beachten, dass weder im Wasserstoff-Szenario noch im Deindustrialisierungs-Szenario das Ziel der Klimaneutralität erreicht werden wird. Gemäß den getroffenen Annahmen, die auf Literaturrecherchen und Expertinnen- und Experteninterviews basieren, wird die Umstellung eines Teils der Wirtschaft auf Wasserstoff alleine nicht ausreichen, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen.

Die Ergebnisse in Abbildung 29 zeigen, dass das Wasserstoff-Szenario gegenüber dem Deindustrialisierungs-Szenario deutlich besser abschneidet (vgl. Abschnitt 4.1). Da die Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft es ermöglicht, dass ein Großteil der energieintensiven Industrien in Deutschland gehalten werden können, ist der Wertschöpfungsgewinn einer Wasserstofftransformation aus diesem Blickwinkel durchaus beachtlich. Das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt liegt im Wasserstoff-Szenario im Jahr 2040 um 378 Mrd. Euro über dem preisbereinigten Bruttoinlandsprodukt im Deindustrialisierungs-Szenario. Kumuliert kann zwischen 2025 und 2040 850 Mrd. € an Wertschöpfung im Inland gehalten werden. Ebenso können viele Arbeitsplätze durch den Umstieg auf eine wasserstoffbasierte Produktion in den energieintensiven Industrien gehalten werden. Da es sich hierbei in der Regel auch um gut bezahlten Jobs handelt, bleiben auch die Konsummöglichkeiten hoch. Die Effekte erhöhen sich mit der weiteren Durchdringung der Wasserstoffwirtschaft, was reziprok mit der zunehmenden Abwanderung von Industrien in Verbindung steht.

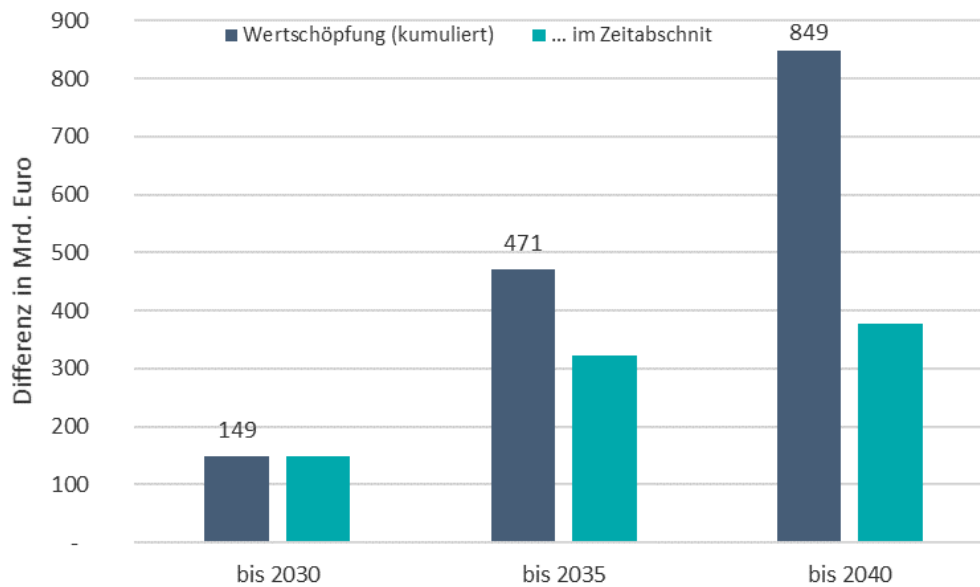
Abbildung 29: Ergebnisse des Vergleichs zwischen Wasserstoff- und Deindustrialisierungs-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Über den gesamten Projektionszeitraum von 2025 bis 2040 kumulieren sich die Wertschöpfungsgewinne im Wasserstoff-Szenario in diesem Szenariovergleich auf fast 850 Mrd. Euro (vgl. Abbildung 30). Im Deindustrialisierungs-Szenario liegt das Bruttoinlandsprodukt nicht nur aufgrund der geringeren Produktion in den energieintensiven Industrien niedriger, auch hier führen Zweit- und Drittrundeneffekte durch eine geringere Nachfrage nach Vorleistungsgütern und Dienstleistungen sowie geringeren Konsumausgaben infolge schlechterer Verdienstmöglichkeiten zu weiteren Negativeffekten auf die Wirtschaftsleistung.

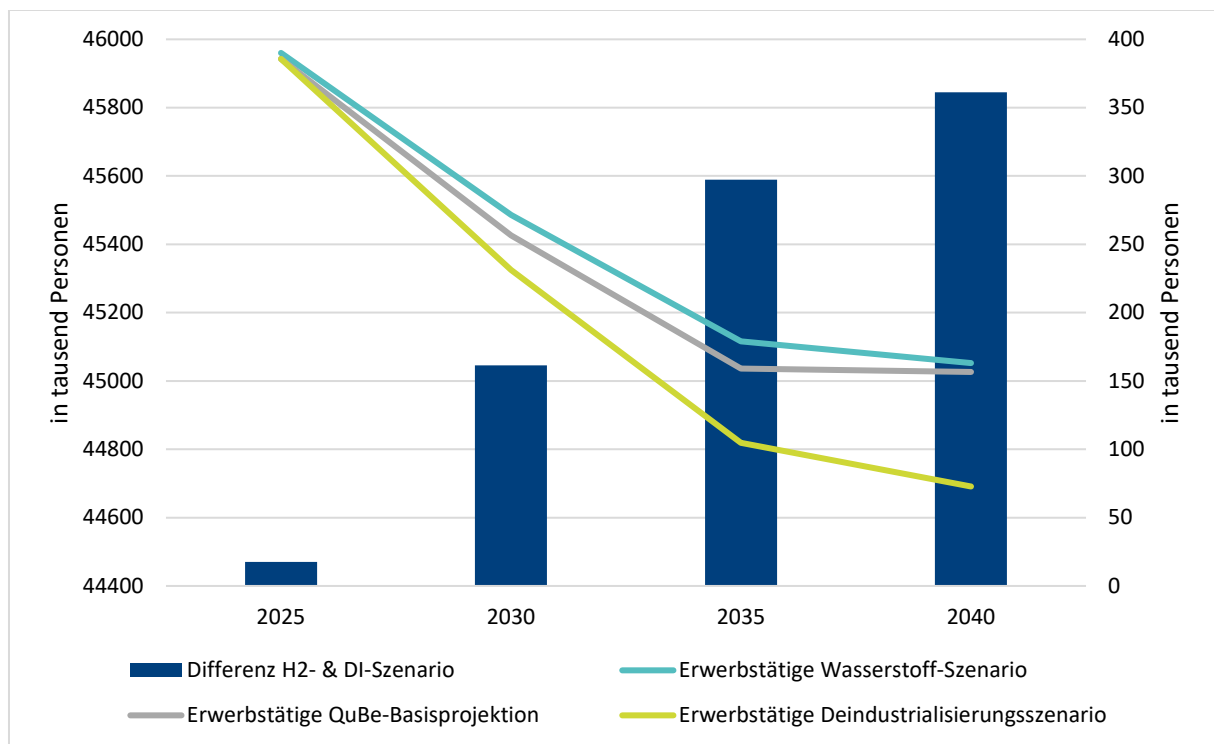
Abbildung 30: Wirkung auf das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Vergleich zum Deindustrialisierungs-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft hat auch im Vergleich zum Deindustrialisierungs-Szenario positive Arbeitsmarktwirkungen, welche ebenfalls höher ausfallen als im Vergleich zur QuBe-Basisprojektion. Zwischen 2025 und 2040 sind im Wasserstoff-Szenario durchschnittlich jährlich 215.000 Personen mehr erwerbstätig als im Deindustrialisierungs-Szenario. In Abbildung 31 sind die Abweichungen der Zahl an Erwerbstätigen zwischen dem Wasserstoff-Szenario und dem Deindustrialisierungs-Szenario in Fünf-Jahres-Schritten bis 2040 dargestellt. Die Positivwirkung nimmt dabei im Zeitverlauf zu. Während im Wasserstoff-Szenario im Jahr 2025 rund 18.000 Personen mehr beschäftigt sind, liegt die Abweichung 2040 mit rund 361.000 Personen deutlich über der Erwerbstätigenzahl im Deindustrialisierungs-Szenario.

Abbildung 31: Wirkung auf die Zahl der Erwerbstätigen im Vergleich zum Deindustrialisierungs-Szenario (in tausend Personen)



Quelle: QuBe-Projekt, 8. Welle, eigene Berechnungen

Dieser Exkurs hat gezeigt, dass im Kontext der Erreichung von CO₂-Neutralität die Wasserstofftransformation starke positive Wirtschafts- und Arbeitsmarkteffekte haben kann. Mit heutigem Stand der Technik und Umsetzungsmöglichkeiten (CCUS) ist die Wasserstofftransformation eine der wenigen Optionen, die Deutschland hat, um energieintensive Industrien in Deutschland halten zu können. Die Alternative der Verlagerung von Produktionsstandorten ins Ausland, wird Wertschöpfung und Arbeitsplätze kosten. Schaffen die Industrieunternehmen die Transformation hin zu einer klimafreundlicheren Produktion nicht und es kommt infolgedessen zu Produktionsrückgängen bzw. -verlagerungen, fällt die entgangene Wertschöpfung höher aus als bei einer Umstellung auf eine Wasserstoffwirtschaft, selbst wenn diese höhere Energiekosten nach sich zieht als das Beibehalten fossiler Energieträger.

6 Fazit

Wasserstoff ist ein Schlüsselement zur Dekarbonisierung in den energieintensiven Industrien sowie in Teilen des Verkehrssektors und kann einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich von Schwankungen bei der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien leisten. Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie und deren Fortschreibung wurden ambitionierte Ziele für den Wasserstoffhochlauf gesetzt. Trotz Fortschritten im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur (BMF 2025) und dem Import von Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten (BMWK 2024), bleibt vor allem der Ausbau der inländischen

Wasserstoffproduktion hinter den Erwartungen zurück. So waren 2024 gerade einmal Elektrolyseure mit einer Kapazität von 0,12 GW in Betrieb und lediglich Projekte mit einem Umfang von insgesamt 1,32 GW im Bau oder haben eine finale Investitionsentscheidung erhalten (IEA 2024). Doch auch auf der Nachfrageseite bleiben weiterhin große Unsicherheiten bestehen, wie beispielsweise die Überlegungen in der Stahlindustrie zum Baustopp von Direktreduktionsanlagen gezeigt haben (TAGESSCHAU 2024a). Der Wasserstoffhochlauf fällt im Wasserstoff-Szenario-v3.0 deshalb geringer aus als in den vorangegangenen Szenarien. Gleichzeitig deuten neuere Kostenschätzungen auf höhere Gestehungs- und Bereitstellungskosten für grünen Wasserstoff und dessen Derivate hin, welche sich ebenfalls auf die Szenarioergebnisse auswirken.

Für das Wasserstoff-Szenario-v3.0 wurde eine Erweiterung im Prognose- und Simulationsmodell vorgenommen. Hierzu wurde die Input-Output-Struktur im Modell erweitert, um die Vorleistungsverflechtungen und die Endnachfrage nach Gütergruppen und Produktionsbereichen detaillierter abbilden zu können. Leisten einzelne Gütergruppen und Produktionsbereiche einen signifikanten Beitrag zur Wasserstoffwirtschaft, wurden sie weiter aufgespalten, um so die Annahmen des Wasserstoff-Szenarios-v3.0 präziser einstellen zu können. Dies ermöglicht auch eine vertiefte Analyse der Gütergruppen und Produktionsbereiche hinsichtlich nominaler Produktion und Erwerbstätigenzahlen.

Die Ergebnisse des Wasserstoff-Szenarios-v3.0 zeigen bis 2035 ein höheres preisbereinigtes Bruttoinlandsprodukt als in der QuBe-Basisprojektion, die als Referenz-Szenario dient. Ab 2036 ist es niedriger als im Referenz-Szenario. Von 2025 bis 2040 liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Durchschnitt dennoch um 4,0 Mrd. Euro höher (+0,1 Prozent jährlich). Die Wertschöpfungsgewinne kumulieren sich über den Projektionszeitraum bis 2040 damit auf rund 63 Mrd. Euro. Die negativen Effekte ab der zweiten Hälfte der 2030er Jahre sind einerseits auf auslaufende Ausrüstungs- und Bauinvestitionen zurückzuführen und andererseits auf die höheren Energiekosten im Vergleich zu fossilen Energieträgern. Die einzelnen Wirtschaftszweige sind dabei unterschiedlich betroffen. Während die Energiewirtschaft vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durchgängig profitiert und die Produktion im Zeitverlauf ausweiten kann, verzeichnet die chemische Industrie, genauer gesagt die Grundstoffchemie, zunehmend niedrigere Produktionswerte. Wie bereits in den vorherigen Wasserstoff-Szenarien wirkt sich der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auch im Wasserstoff-Szenario-v3.0 insgesamt positiv auf den Arbeitsmarkt aus. Die Zahl der Erwerbstätigen liegt zwischen 2025 und 2040 um durchschnittlich 54.000 Personen höher als im Referenz-Szenario. Trotz niedrigerem Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2040, sind im Wasserstoff-Szenario-v3.0 2040 immer noch 26.000 Personen mehr beschäftigt als im Referenz-Szenario. Dies liegt unter anderem daran, dass die von einer Wasserstoffwirtschaft positiv betroffenen Wirtschaftszweige arbeitsintensiver sind als

negativ betroffene Wirtschaftszweige. Höhere Erwerbstätigenzahlen als im Referenz-Szenario werden beispielsweise in den Berufsgruppen Unternehmensorganisation und -strategie, Technische Produktionsplanung und -steuerung, Büro und Sekretariat sowie dem Hochbau erwartet. Entsprechend erhöhen sich auch die Suchdauern der Betriebe nach geeigneten Personen in diesen Berufsgruppen. Die negativen Effekte auf die Wirtschaftsaktivitäten in der Chemieindustrie spiegeln sich hingegen in niedrigeren Erwerbstätigenzahlen in den Chemieberufen wider und auch die Berufsgruppe der Metallerzeugung ist negativ betroffen. Der Arbeitsplatzaufbau in anderen Bereichen kompensiert in Summe jedoch die Negativeffekte in einzelnen Branchen und Berufen. Mit Blick auf die Anforderungsniveaus zeigt sich langfristig ein deutlich höherer Bedarf an Spezialisten und Spezialistinnen, während der Bedarf an Helfern und Helferinnen gegen Ende des Projektionszeitraums sogar etwas niedriger ausfällt als im Referenz-Szenario.

Bereits 2021 wurde vom Bundesverfassungsgericht festgestellt, dass die Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens Verfassungsrang haben. Mit der Grundgesetzänderung im März 2025 wurde der Zielhorizont 2045 explizit in das Grundgesetz aufgenommen (TAGESSCHAU 2024a). Wird die Transformation hin zu einem klimafreundlichen Wirtschaftssystem verpasst, ist mit verschärften Maßnahmen zur Emissionsreduktion bzw. mit Sanktionen zu rechnen. Diese können steigende CO₂-Preise oder Strafzahlungen an andere EU-Staaten umfassen, insbesondere wenn die Ziele der EU-Klimaschutzverordnung verfehlt werden (UBA 2025). Es besteht zudem das Risiko, dass die deutsche Industrie an Innovationskraft verliert, während andere Länder klimafreundlichere Technologien und Produkte entwickeln (BDI 2024). Es ist somit denkbar, dass sich die Industrieproduktion in einem derartigen Szenario verringern könnte. In einem Exkurs wurde das Wasserstoff-Szenario-v3.0 deshalb einem Deindustrialisierungs-Szenario gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass durch die Anstrengungen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ein deutlich höheres Wertschöpfungs- und Beschäftigungsniveau gehalten werden kann. Von 2025 bis 2040 liegt das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im Wasserstoff-Szenario-v3.0 in diesem Vergleich um durchschnittlich 53 Mrd. Euro höher (+1,5 Prozent jährlich) und es sind durchschnittlich 215.000 Personen mehr erwerbstätig als im Deindustrialisierungs-Szenario.

Die Wasserstoff-Szenarien-v1.0 bis -v3.0 haben gezeigt, dass der Arbeitsmarkt insgesamt vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft profitiert und dadurch mehr Personen erwerbstätig sein werden. Der Effekt auf die Wirtschaftsleistung hängt hingegen vor allem vom Kostenverhältnis zwischen alternativem und fossilen Energieträger ab. Hier besteht Spielraum für staatliche Maßnahmen, um Wasserstoff in der Phase des Hochlaufs auf ein wettbewerbsfähiges Preisniveau zu bringen. Die weitergehende Analyse im Wasserstoff-Szenario-v3.0 hat indes auch gezeigt, dass Risiken für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt bestehen auf ein niedrigeres Produktions- und Beschäftigungsniveau

zu rutschen, sollte die Transformation hin zu einem klimafreundlicheren Wirtschaften verpasst werden.

7 Literaturverzeichnis

AG ENERGIEBILANZEN (Hrsg.): Energiebilanz der Bundesrepublik 2020 2022. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/04/bilanz20d.pdf> (Stand: 28.03.2025)

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

ALMON, Clopper: The Inforum Approach to Interindustry Modeling. In: Economic Systems Research (1991) 3, S. 1-8

BDI (Hrsg.): Transformationspfade für das Industrieland Deutschland. Kurzfassung 2024. URL: <https://bdi.eu/artikel/news/transformationspfade-fuer-das-industrieland-deutschland-studie-kurzfassung> (Stand: 28.03.2025)

BECKER, Lisa; BERNARDT, Florian; BIERITZ, Loreto; MÖNNIG, Anke; PARTON, Frederik; ULRICH, Philip; WOLTER, Marc Ingo: INFORGE in a Pocket 2022. URL: https://downloads.gws-os.com/GWS-Kurzmitteilung_2022_02.pdf (Stand: 28.03.2025)

BIBB (Hrsg.): Wasserstoff – ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende (H2PRO) 2024. URL: <https://www.bibb.de/de/153309.php> (Stand: 28.03.2025)

BIBB (Hrsg.): Transformation in der Chemie- und Raffinerieindustrie: Die Berufe sind fit! 2023. URL: https://www.bibb.de/dokumente/pdf/h2pro-factsheet_06-23_chemie-_und_raffinerieindustrie_web.pdf (Stand: 28.03.2025)

BMDV (Hrsg.): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. URL: https://ptl-roadmap.de/wp-content/uploads/2023/06/210614_PtL-Roadmap-BF_f.pdf (Stand: 15.12.2025)

BMF (Hrsg.): Finanzierung des Wasserstoff-Kernnetzes: Die erste Auszahlung an die Wasserstoff-Kernnetzbetreiber aus dem Amortisationskonto ist erfolgt 2025. URL: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2025/03/2025-03-25-finanzierung-des-wasserstoff-kernnetzes.html>

BMWl (Hrsg.): Die nationale Wasserstoffstrategie. Berlin 2020. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/DE/2020/nationale-wasserstoffstrategie-pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 28.03.2025)

BMWK (Hrsg.): Internationale Wasserstoffzusammenarbeit 2025. URL: <https://www.bmwk.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Wasserstoff/Foerderung-National-International/Internationale->

Wasserstoffzusammenarbeit_Formular.html?input_=ecbaaba4-1368-4cc9-ae47-e3fe0839e752>p=%252667e27853-e6c2-4c06-a589-bb62391acc15_list%253D3&resourceId=e6182f1c-a120-4857-8d3a-b8baf107fe40&selectSort=title_text_sort%20desc&selectSort.GROUP=1&pageLocale=de (Stand: 28.03.2025)

BMWK (Hrsg.): Wichtiger Schritt vorwärts – EU-Kommission genehmigt zweite Ausschreibung in H2Global zum Ankauf von grünen Wasserstoffprodukten 2024. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/12/20241227-eu-kommission-genehmigt-zweite-ausschreibung-in-h2global.html>

BMWK (Hrsg.): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023. Berlin 2023. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/DE/20/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 28.03.2025)

BMWK (Hrsg.): Habeck: „Erstes Importterminal für grünen Ammoniak kommt nach Hamburg - Standortentscheidung ist Wegmarke für Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft“ 2022a. URL: <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 (Hrsg.): Dritter Fortschrittsbericht Energiesicherheit. Berlin 2022b. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/20220720_dritter-fortschrittsbericht_energiesicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (Stand: 19.02.2022)

BMWK (Hrsg.): Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie. Ergebnispapier zum NWS-Industriedialog. Berlin 2022c. URL: 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 (Stand: 10.04.2024)

BMWK (Hrsg.): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Berlin 2022d. URL: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-der-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Stand: 15.12.2025)

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

BP (Hrsg.): Wilhelmshaven green hydrogen hub 2025. URL: https://www.bp.com/de_de/germany/home.html (Stand: 28.03.2025)

BÜLTEMEIER, Hagen; KEßLER, Benjamin; HÜTTENRAUCH, Jens; SPERLICH, Jonas; KÜHN, Michael; SCHLICHTENMAYER, Maurice; WAGLER, Torsten; KRUCK, Olaf; SCHNEIDER, Gregor-Sönke: WASSERSTOFF SPEICHERN – SOVIEL IST SICHER. Transformationspfade für Gasspeicher 2022. URL: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201926-abschlussbericht-transformation-ugs.pdf> (Stand: 28.03.2025)

BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT (Hrsg.): Engpassanalyse 2022. URL: <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Fachkraeftebedarf/Engpassanalyse-Nav.html> (Stand: 28.03.2025)

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045 2021. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Stand: 28.03.2025)

CHEMISTRY4CLIMATE (Hrsg.): Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht 2023 2023. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung-es.pdf>

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

DESTATIS (Hrsg.): 48112-0003 Unternehmen (EU), Waren- und Dienstleistungskäufe, Bruttoinvestitionen u.w. betriebsw. Kennzahlen: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008 1-/2-/3-/4-Steller) 2024a. URL: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/48112/table/48112-0003/search/s/NDgxMTI=> (Stand: 28.03.2025)

DESTATIS (Hrsg.): 51000-0005 Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warensystematik 2024b. URL: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/51000/table/51000-0005/table-toolbar/search/s/NTEwMDA=> (Stand: 28.03.2025)

DESTATIS (Hrsg.): Sonderauswertung der Gütermatrix. Wiesbaden. Wiesbaden 2023. URL: <https://www-genesis.destatis.de/>

DEUTSCHE REGAS (Hrsg.): Das H2-Import-Terminal Lubmin 2025. URL: <https://deutsche-regas.de/locations/h2-import-terminal-lubmin> (Stand: 28.03.2025)

DNV (Hrsg.): Energy Transition Outlook. Germany 2025 2025. URL: <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/germany/download/> (Stand: 28.03.2025)

EWI (Hrsg.): Datengrundlage für die H2Bilanz 2024 2. Halbjahr. EWI_Datengrundlage_H2-Bilanz_2024_02.xlsx 2024. URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/datengrundlage-fuer-die-h2bilanz-2024-2-halbjahr/> (Stand: 28.03.2025)

EWI (Hrsg.): EWI Global PtX Cost Tool 1.3 2021. URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/>

EWI (Hrsg.): Schätzung der langfristigen globalen Versorgungskosten für kohlenstoffarmen Wasserstoff. Global_H2_Cost_Tool_v3.xlsx 2020. URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/schaetzung-der-langfristigen-globalen-versorgungskosten-fuer-kohlenstoffarmen-wasserstoff/> (Stand: 28.03.2025)

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

FNB GAS (Hrsg.): Wasserstoff-Kernnetz. URL: <https://fnb-gas.de/wasserstofftransport/wasserstoff-kernnetz/> (Stand: 28.03.2025)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. O45-Szenarien. Modul Verkehr. Karlsruhe 2024a. URL: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Verkehr_Bericht.pdf (Stand: 28.03.2025)

FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): Verkehr Energiebedarf 2024b. URL: <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de/open-view/8237/e091497917a8aceaad8b2972faebf0e8> (Stand: 28.03.2025)

GWS (Hrsg.): Wertschöpfung und Beschäftigung in der saarländischen Wasserstoffwirtschaft 2024. URL: <https://www.gws-os.com/de/die-gws/news/detail/wertschoepfung-und-beschaeftigung-in-der-saarlaendischen-wasserstoffwirtschaft> (Stand: 28.03.2025)

IEA (Hrsg.): Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database. Updated 02/10/2024 2024. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database> (Stand: 28.03.2025)

IEA (Hrsg.): Net Zero Roadmap. A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. 2023 Update 2023. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/8ad619b9-17aa-473d-8a2f-4b90846f5c19/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf (Stand: 28.03.2025)

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

KYMN, Kern: Aggregation in Input–Output Models: a Comprehensive Review, 1946–71. In: Economic Systems Research (1990) 2, S. 65-93

LENZ, Konstantin; SCHLICHTMANN, Erik; BUWIDOWITSCH, Eugen; THOMAS, Andre; LEYDOLPH, Richard; STRAßBURG, Steffen; ROMANO, Marie-Sophie: Wasserstoffnachfragepotentiale bis zum Jahr 2050 in Deutschland und der Europäischen Union 2022. URL: https://fh-erfurt.de/Dokumente/GTI/Dokumente_GE/forschung/lenz/fp-2022-wasserstoffnachfragepotentiale.pdf

MAIER, Tobias; KALINOWSKI, Michael; SCHUR, Alexander C.; ZIKA, Gerd; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.: Weniger Arbeitskraft, weniger Wachstum. Ergebnisse der achten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040. In: BIBB Report 01/2024 (2024)

MAIER, Tobias; KALINOWSKI, Michael; ZIKA, Gerd; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.: Es wird knapp. Ergebnisse der siebten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040. In: BIBB Report 03/2022 (2022)

MERTEN, Frank; SCHOLZ, Alexander; HECK, Simon; LANGE, Steffen: Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarfen für die CO₂-neutrale Transformation. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW 2023. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8344/file/8344_Wasserstoffkosten.pdf (Stand: 28.03.2025)

MEYER, Bernd; BOCKERMANN, Andreas; EWERHART, Georg; LUTZ, Christian (Hrsg.): Marktkonforme Umweltpolitik. Wirkungen auf Luftschadstoffemissionen, Wachstum und Struktur der Wirtschaft 1999

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

MÖNNIG, Anke; RONSIEK, Linus; SCHNEEMANN, Christian; SCHUR, Alexander C.; ZENK, Johanna: Grüner Wasserstoff und energieintensive Industrien. In: BIBB Discussion Paper (2024)

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

MORIMOTO, Yoshinori: On Aggregation Problems in Input-Output Analysis. In: Review of Economics and Statistics (1970) 37, S. 119-126

NATIONALER WASSERSTOFFRAT (Hrsg.): Update 2024: Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland 2024. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-05-03_NWR-Grundlagenpapier_Update_2024_Wasserstoffbedarfe.pdf (Stand: 28.03.2025)

NIEDIEK, Silvia: Grünen Wasserstoff international erschließen. In: Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis 52 4, S. 47-48

ODENWELLER, Adrian; UECKERDT, Falko: The green hydrogen ambition and implementation gap. In: Nature Energy (2025) 10, S. 110-123

RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (Hrsg.): Initiative „ReFuelEU Aviation“: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors 2023a. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>

RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (Hrsg.): Infrastruktur für alternative Kraftstoffe: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt für mehr Ladestationen und Tankstellen in ganz Europa 2023b. URL: <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 EUROPÄISCHEN UNION (Hrsg.): Initiative „FuelEU Maritime“: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Seeverkehrs 2023c. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>

RONSIK, Linus; MÖNNIG, Anke; SCHNEEMANN, Christian; ZENK, Johanna; SCHROER, Jan P.; SCHUR, Alexander C.: Potentielle Partnerländer für den Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland. In: BIBB Discussion Paper (2022)

RONSIK, Linus; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; SAMRAY, David; SCHROER, Jan P.; SCHUR, Alexander C.; ZENK, Johanna: Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff: Szenario-v2.1. Abschlussbericht der ersten Projektphase. In: IAB Forschungsbericht 07/2024 (2024)

ROSE, Philipp; WIETSCHEL, Martin; GNANN, Till: Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen? URL: https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/WP-09-2020_Wasserstoff-Tankstellen_Wi-Gnt-rose.pdf (Stand: 28.03.2025)

RWE (Hrsg.): RWE-Projekte am Standort Brunsbüttel 2025. URL: <https://www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/projektvorhaben/projektstandort-brunsbuettel/> (Stand: 28.03.2025)

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

SAMRAY, David; SCHUR, Alexander: Angebote zur beruflichen Weiterbildung im Themenbereich Wasserstoff. Ergebnisse einer Befragung von Weiterbildungsanbietern. In: Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis 53 4, S. 56-57

SCHUR, Alexander C.; MÖNNIG, Anke; RONSIEK, Linus; SCHNEEMANN, Christian; SCHROER, Jan P.; ZENK, Johanna: Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“. Abschlussbericht der ersten Projektphase. In: BIBB Discussion Paper (2023)

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

TAGESSCHAU (Hrsg.): Was im Grundgesetz geändert wurde 2025. URL: <https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/finanzpaket-grundgesetz-aenderungen-100.html>

TAGESSCHAU (Hrsg.): Thyssenkrupp überprüft Pläne zum grünen Umbau 2024a. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/thyssenkrupp-gruener-umbau-transformation-100.html>

TAGESSCHAU (Hrsg.): Deutlich kleiner als ursprünglich geplant 2024b. URL: <https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/kraftwerksstrategie-106.html>

TRANSNETBW (Hrsg.): Anreizwirkung Neubau-Vorschuss 2023. URL: https://www.transnetbw.de/_Resources/Persistent/b/d/7/9/bd793c1560aac21d8ee3f2ae3a0be49fe4c0e54c/Enervis-Studie%20Anreizwirkung%20Neubau-Vorschuss%2024.03.2023.pdf (Stand: 28.03.2025)

UBA (Hrsg.): Klimaziele bis 2030 erreichbar. Gesetzliches Emissionsbudget wird eingehalten – weiter Handlungsbedarf bei Verkehr, Gebäuden und natürlichen Senken 2025. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaziele-bis-2030-erreichbar>

UN (Hrsg.): The Paris Agreement | United Nations 2015. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement> (Stand: 28.03.2025)

UNIPER (Hrsg.): Green-Wilhelmshaven 2025. URL: <https://www.uniper.energy/de/loesungen/energy-transformation-hubs/energy-transformation-hub-nordwest/green-wilhelmshaven> (Stand: 28.03.2025)

VDI-NACHRICHTEN (Hrsg.): Stahl: Diese Anlagentechnik wird bei Thyssenkrupp und Co. den Hochofen ablösen 2022. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-anlagentechnik-wird-bei-thyssenkrupp-und-co-den-hochofen-abloesen/>

WELT (Hrsg.): Wasserstoff für die Klimawende - Woher soll er kommen? 2025. URL: <https://www.welt.de/regionales/nrw/article255171712/Wasserstoff-fuer-die-Klimawende-Woher-soll-er-kommen.html>

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (Hrsg.): Nationale Wasserstoffstrategie 2.0: Handlungsbedarf aus Sicht der Stahlindustrie. Berlin 2022. URL: https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20221125_Pos_Wasserstoffstrategie_2.0.pdf (Stand: 15.12.2025)

ZENK, Johanna; MÖNNIG, Anke; RONSIEK, Linus; SCHNEEMANN, Christian; SCHUR, Alexander C.; STEEG, Stefanie: Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030. In: BIBB Discussion Paper (2023a)

ZENK, Johanna; RONSIEK, Linus; SCHUR, Alexander C.; HUPP, Jonas; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; SCHROER, Jan P.: Exportpotenziale von Wasserstofftechnologien. In: BIBB Discussion Paper (2023b)

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

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