

Emissionsarme Primärstahlproduktion mit grünem Wasserstoff: Arbeitsmarktstudie 2023

im Auftrag des

Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbandes (DWV) e.V.,
Fachkommission Hydrogen Steel (HySteel),



gefördert aus Mitteln des

Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gesamtgutachten erstellt durch

Prof. Dr. André Küster Simic, Alexander Dobras, Hauke Friedrichsen,
Okan Gül, Jan Phillip Putscher, Jana Schablinski,
Janek Schönfeldt, Dr. Stefan Stracke, Frederic Waag

Impressum

Herausgeber

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) e.V.
Fachkommission Hydrogen Steel (HySteel)
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin

Durchgeführt von

Q&A Banner · Küster Unternehmensberatung GmbH
Centroallee 263b
46047 Oberhausen



wmp consult – Wilke Maack GmbH
Schaarsteinwegsbrücke 2
20459 Hamburg



HSBA Hamburg School of Business Administration
Willy-Brandt-Straße 75
20459 Hamburg



© 2023

Inhalt

| | |
|--|-----|
| Executive Summary: Kernaussagen und Handlungsempfehlungen zum Erhalt und Ausbau von Industriearbeitsplätzen und Wertschöpfung in Deutschland im Rahmen der Transformation der Stahlindustrie | 9 |
| Kernaussagen | 10 |
| Handlungsempfehlungen..... | 19 |
| 1. Kontext, Auftrag und Ziele der Studie | 26 |
| 1.1. Kontext | 26 |
| 1.2. Gegenstand des Auftrags | 26 |
| 1.3. Leitfragen der Studie | 27 |
| 2. Methodische Vorgehensweise..... | 29 |
| 2.1. Überblick | 29 |
| 2.2. Szenarien für die Primärstahlerzeugung als Ausgangsbasis | 30 |
| 2.3. Analyse von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten in der Primärstahlindustrie | 31 |
| 2.4. Simulationsmodell zur Abschätzung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten für die betrachteten vorgelagerten Wertschöpfungsstufen | 33 |
| 2.5. Mögliche Veränderungen der Stahlnachfrage und Transformationseffekte in ausgewählten nachgelagerten Branchen | 37 |
| 3. Stahlindustrie | 39 |
| 3.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation..... | 39 |
| 3.2. Treibhausgasemissionen, Technologiewechsel sowie regulatorische Rahmenbedingungen | 48 |
| 3.3. Volkswirtschaftliche und regionale Bedeutung der Primärstahlindustrie | 53 |
| 3.4. Analyse unternehmerischer Transformationsoptionen | 57 |
| 3.5. Szenarien für eine wasserstoffbasierte Transformation der Primärstahlproduktion in Deutschland 2030 und 2045 | 68 |
| 3.6. Auswirkungen der Szenarien auf Beschäftigung und Qualifizierung in der Primärstahlindustrie..... | 71 |
| 4. Wasserstoff | 85 |
| 4.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation..... | 85 |
| 4.2. Auswirkungen der Szenarien..... | 92 |
| 5. Erneuerbare Energien: Windenergie | 101 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.1. | Branchen- und Arbeitsmarktsituation..... | 101 |
| 5.2. | Auswirkungen der Szenarien..... | 107 |
| 5.3. | Die Windenergiebranche als Abnehmer von Stahl..... | 117 |
| 6. | Erneuerbare Energien: Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse.... | 121 |
| 6.1. | Branchen- und Arbeitsmarktsituation..... | 121 |
| 6.2. | Auswirkungen der Szenarien..... | 126 |
| 7. | Automobilindustrie..... | 133 |
| 7.1. | Branchen- und Arbeitsmarktsituation..... | 133 |
| 7.2. | Die Automobilindustrie als Abnehmer von Stahl | 141 |
| | Literatur und Quellen | 145 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schätzung der Anzahl der Beschäftigten in der Primärstahlindustrie (links) sowie geografische Lage der Hochöfen und regionale Arbeitslosenquoten 2021 (in %, rechts)..... | 11 |
| Abbildung 2: Szenarien im Überblick: Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute in Deutschland 2030 und 2045 (in Mio. Tonnen pro Jahr, links) Bandbreite Beschäftigungseffekte in den Alternativszenarien 2 und 3 (Anzahl Beschäftigte, rechts)..... | 14 |
| Abbildung 3: Auswirkung der Primärstahlszenarien auf die Anzahl der Beschäftigten in den vorgelagerten Branchen Wasserstoff (links) und erneuerbare Energien (rechts) 2045 | 18 |
| Abbildung 4: Anzahl der Befragte Experten nach Fachbereichen | 29 |
| Abbildung 5: Zusammenfassung: Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute in Deutschland 2030 und 2045 entlang der Szenarien (in Mio. Tonnen pro Jahr) | 30 |
| Abbildung 6: Analyse von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten der Primärstahlindustrie (schematisch) | 32 |
| Abbildung 7: Ableitung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten entlang der Szenarien (schematisch)..... | 34 |
| Abbildung 8: Gegenüberstellung der Anzahl der Beschäftigten und der Betriebe der Wirtschaftszweige 24.1 und 24.2 nach Abgrenzung der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamtes 2022 | 41 |
| Abbildung 9: Rohstahlproduktion in Deutschland nach Produktionsverfahren 2013-2022 (in Mio. Tonnen)..... | 42 |
| Abbildung 10: Anzahl der Betriebe und Umsatzerlöse der Stahlindustrie in Deutschland 2013-2022 (in Mrd. €)..... | 43 |
| Abbildung 11: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie 2013-2022..... | 44 |
| Abbildung 12: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie nach Altersgruppen 2013-2022 | 45 |
| Abbildung 13: Altersstruktur der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie im Vergleich zur Altersstruktur aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland 2022 (Anteile in %) | 46 |
| Abbildung 14: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Anforderungsniveau 2013-2022 | 47 |
| Abbildung 15: Anforderungsniveau der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie im Vergleich zum Anforderungsniveau aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland 2022 (Anteile in %) | 48 |
| Abbildung 16: Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland 2020 (in Mio. Tonnen CO ₂)..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 17: Prognostizierte Marktreife verschiedener Stahlerzeugungstechnologien 2020-2045 | 50 |
| Abbildung 18: Stahlintensive Branchen: Umsatz 2021 (in Mrd. €), Arbeitsplätze 2020 (in Tsd.) sowie Stahlanteil an Vorleistungen (in %) | 54 |
| Abbildung 19: Anzahl der Beschäftigten und Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern (Mio. €) der Primärstahlindustrie | 55 |
| Abbildung 20: Standorte der Hochöfen für die Primärstahlerzeugung (integrierte Hüttenwerke in Deutschland) | 55 |
| Abbildung 21: Hochofenstandorte der Primärstahlindustrie sowie verfügbares Einkommen privater Haushalte (in € je Einwohner, links) und Arbeitslosenquote ziviler Erwerbspersonen (in %, rechts) | 56 |
| Abbildung 22: Hochofenstandorte der Primärstahlindustrie sowie Arbeitslosenquote ziviler Erwerbspersonen auf regionaler Ebene (in %) | 57 |
| Abbildung 23: Unternehmerische Transformationsoptionen und indikative Einordnung von Kosten im Vergleich zur Wasserstoffproduktion in Deutschland (schematisch) | 60 |
| Abbildung 24: Wesentliche Determinanten für Wasserstoffimporte (schematisch) | 62 |
| Abbildung 25: Potenzielle Entwicklung des internationalen Wasserstoffmarktes ... | 63 |
| Abbildung 26: Kostenstruktur der DRI-Produktion bei 100% H ₂ -Einsatz (in %) sowie Vergleich der Roheisenkosten bei eigener DRI-Produktion vs. HBI-Bezug aus Drittländern (in Euro pro Tonne) (schematisch und indikativ) | 64 |
| Abbildung 27: Standorte von geplanten Anlagen oder Projekten zur Stahlerzeugung auf Basis von grünem Wasserstoff | 66 |
| Abbildung 28: Überblick ausgewählter H ₂ -/Stahl-Projekte und -Standorte (Rohstahlkapazität in Mio. Tonnen) (schematisch) | 67 |
| Abbildung 29: Basisszenario: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr) | 68 |
| Abbildung 30: Szenario 2: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr) | 70 |
| Abbildung 31: Szenario 3: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr) | 70 |
| Abbildung 32: Wesentliche Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen für das Gelingen einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie in Deutschland (schematisch) | 71 |
| Abbildung 33: Beschäftigungsstruktur in der Stahlindustrie 2022 (Anzahl der Beschäftigten, indikativ) | 72 |
| Abbildung 34: Beschäftigung: Gesamteffekt der Primärstahlindustrie in Deutschland 2022 (Anzahl der Beschäftigten) | 73 |
| Abbildung 35: Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern: Gesamteffekt der Primärstahlindustrie in Deutschland 2022 (in Mio. €) | 74 |
| Abbildung 36: Basisszenario: Beschäftigungsstruktur entlang der „Kernbereiche für die Transformation“ 2022-2036 (Anzahl der Beschäftigten) | 75 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 37: Einfluss der Transformation entlang der Unternehmensbereiche (schematisch) | 76 |
| Abbildung 38: „Typisierte Clusterung“ (schematisch) | 77 |
| Abbildung 39: Digitale Kompetenzen (Anteil der Einwohner in %), IKT-Fachkräfte (Anteil der Erwerbstätigen in %) und IKT-Absolventen (Anteil aller Absolventen in %) 2021 | 79 |
| Abbildung 40: Szenario 3: Beschäftigungsstruktur entlang der „Kernbereiche für die Transformation“ 2020-2036 (in FTE) | 81 |
| Abbildung 41: Szenario 3: Beschäftigungseffekte der Roheisenproduktion (links) sowie Beschäftigungseffekte der Roheisenproduktion und Weiterverarbeitung (rechts, jeweils Anzahl der Beschäftigten) (exemplarisch) | 82 |
| Abbildung 42: Szenarien 2 und 3: Bandbreite der Beschäftigungseffekte (Anzahl der Beschäftigten) | 83 |
| Abbildung 43: Szenarien 2 und 3: Bandbreite der Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern (in Mio. €) | 84 |
| Abbildung 44: Umsatz der Hersteller von Industriegasen 2013-2022 (in Mrd. €) ... | 87 |
| Abbildung 45: Produktion von Wasserstoff 2013-2022 (in Mio. Tonnen) | 88 |
| Abbildung 46: Anzahl der Beschäftigten im Bereich der Herstellung von Industriegasen 2013-2022 | 89 |
| Abbildung 47: Anzahl der Betriebe im Bereich der Herstellung von Industriegasen nach Beschäftigtengrößenklassen 2013-2022 | 91 |
| Abbildung 48: Annahme Wasserstoff-Netz 2050 | 95 |
| Abbildung 49: Erforderliche Erzeugungskapazität im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in GW) | 97 |
| Abbildung 50: Beschäftigungseffekte im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in FTE) | 99 |
| Abbildung 51: Wertschöpfungseffekte im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in Mio. €) | 100 |
| Abbildung 52: Installierte Leistung und jährlicher Zubau im Bereich Wind Onshore 2011-2022 (in GW) | 102 |
| Abbildung 53: Installierte Leistung und jährlicher Zubau im Bereich Wind Offshore 2011-2022 (in GW) | 103 |
| Abbildung 54: Nettostromerzeugung durch Windenergie 2011-2022 (in TWh) | 104 |
| Abbildung 55: Anzahl der Beschäftigten (direkt und indirekt) in den Bereichen Wind Onshore und Offshore 2011-2021 | 105 |
| Abbildung 56: Erforderliche Anlagenkapazität im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in GW) | 108 |
| Abbildung 57: Erforderliche Anlagenkapazität im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in GW) | 109 |
| Abbildung 58: Erforderliche Nettostromerzeugung im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in TWh) | 109 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 59: Erforderliche Nettostromerzeugung im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in TWh) | 110 |
| Abbildung 60: Beschäftigungseffekte im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in FTE) | 113 |
| Abbildung 61: Beschäftigungseffekte im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in FTE) | 114 |
| Abbildung 62: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in Mio. €) | 116 |
| Abbildung 63: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in Mio. €) | 117 |
| Abbildung 64: Installierte Leistung in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2022 (in GW) | 123 |
| Abbildung 65: Bruttostromerzeugung durch Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2022 (in TWh) | 124 |
| Abbildung 67: Anzahl der Beschäftigten (direkt und indirekt) in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2021 | 125 |
| Abbildung 68: Erforderliche Nettostromerzeugung in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in TWh) | 127 |
| Abbildung 69: Erforderliche Anlagenkapazität in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in GW) | 128 |
| Abbildung 70: Beschäftigungseffekte in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse (in FTE) | 130 |
| Abbildung 71: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in Mio. €) | 132 |
| Abbildung 72: Umsatz in der Automobilindustrie 2013-2022 (in Mrd. €) | 134 |
| Abbildung 73: Anzahl der produzierten Pkw und Nutzfahrzeuge in Deutschland 2018-2022 (in 1.000) | 135 |
| Abbildung 74: Anzahl der Betriebe in der Automobilindustrie 2013-2022 | 136 |
| Abbildung 75: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie 2013-2022 | 137 |
| Abbildung 76: Anzahl der Auszubildenden in der Automobilindustrie 2013-2022 | 138 |
| Abbildung 77: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie nach Altersgruppen 2013-2022 | 139 |
| Abbildung 78: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie nach Anforderungsniveau 2013-2022 | 140 |

Executive Summary: Kernaussagen und Handlungsempfehlungen zum Erhalt und Ausbau von Industriearbeitsplätzen und Wertschöpfung in Deutschland im Rahmen der Transformation der Stahlindustrie

Die vorliegende Studie ist im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspaketes „Wissenstransfer und Innovation“ der Fachkommission HySteel des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbandes (DWV) e.V. entstanden und analysiert die Auswirkungen der Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff auf den Arbeitsmarkt. Anknüpfend an die Auftragsvorgaben („Terms of Reference“ der Fachkommission HySteel) stehen bei der Bearbeitung die folgenden Punkte im Vordergrund:

1. Analyse der aktuellen Situation des deutschen Arbeitsmarktes in der deutschen Stahlindustrie und in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff sowie den nachgelagerten Stufen Automobil und Windkraft
2. Szenarien-basierte Analyse der Auswirkungen der Transformation der deutschen Primärstahlindustrie in den Zeithorizonten 2030 und 2045 auf die Entwicklung von Beschäftigung und Wertschöpfung im Stahlsektor und in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff sowie den nachgelagerten Stufen Automobil und Windkraft
3. Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zum Erhalt und zum Ausbau deutscher Industriearbeitsplätze und heimischer Wertschöpfung in den oben beschriebenen Bereichen

Die Studie liefert neue Erkenntnisse zu den folgenden Aspekten:

- Es erfolgt erstmalig eine eingehende Analyse der Zahl der direkt in der Primärstahlindustrie Beschäftigten sowie ihrer Struktur und der regionalen Verteilung von Beschäftigung. Darüber hinaus werden indirekt bei Vorleistern sowie über Einkommenseffekte Beschäftigtenzahlen abgeschätzt.
- Es werden Szenarien für die Transformation der Primärstahlindustrie und erstmalig deren Effekte auf Beschäftigung und Wertschöpfung beschrieben. Grüner Stahl kann aus betriebswirtschaftlicher Sicht zukünftig wettbewerbsfähig und profitabel in Deutschland produziert werden, wenn die Rahmenbedingungen entsprechend gestaltet wer-

den, so dass aus dieser Sicht eine vollständige Transformation – inkl. Roheisenstufe – gelingen könnte. Wird dagegen ein Teil der Wertschöpfungskette – die Roheisenstufe – nur partiell transformiert, drohen beträchtliche negative Auswirkungen auf Beschäftigung und Wertschöpfung in Deutschland.

- Das Gelingen der Transformation hat eine personalwirtschaftliche und somit „menschliche“ Komponente im Hinblick auf Motivation und Qualifikation von Belegschaften und Personalgewinnung, die nicht vernachlässigt werden darf.
- „Transformationsinduzierte“ Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte durch den primärstahlbedingten Ausbau erneuerbarer Energien und der Wasserstoffwirtschaft bieten signifikante Arbeitsplatz- und Wertschöpfungspotenziale. Die Stahlindustrie kann zu einem Katalysator eines Wasserstoffclusters in Deutschland werden.
- Die Primärstahlindustrie steht in wechselseitigen Verflechtungen mit den Endabnehmerindustrien Windkraft und Automobil. Eine nicht vollständige Transformation der Primärstahlindustrie kann Auswirkungen auf die Sourcingstrategien der nachgelagerten Industrien haben. Vorteile von geschlossenen Wertschöpfungsketten in Deutschland liegen in engen Lieferbeziehungen und stabilen Logistikkosten.
- Insgesamt ist die Transformation der Stahlindustrie somit nicht nur eine ökologische und technische, sondern auch eine besondere volkswirtschaftliche, strukturpolitische und soziale Herausforderung.

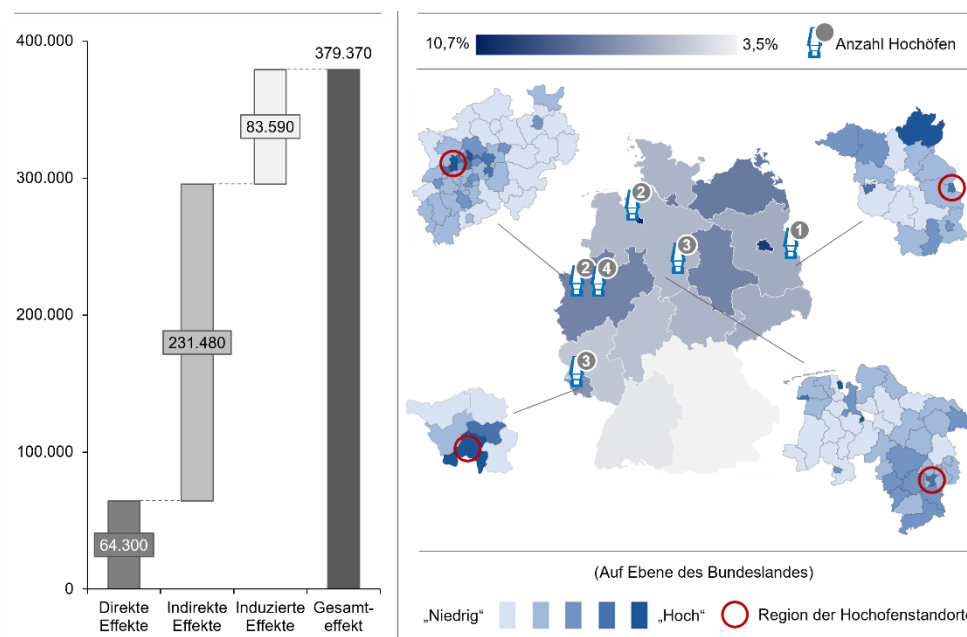
Kernaussagen

Primärstahlindustrie: Ausgangslage

- Die wasserstoffbasierte Transformation der Primärstahlindustrie kann durch Reduktion von knapp 8% der deutschen Treibhausgasemissionen einen wichtigen ökologischen Beitrag leisten und zur Entwicklung eines Wasserstoffclusters in Deutschland entscheidende Impulse liefern.
- Die Transformation des sogenannten Upstream-Bereiches – also der Stahlerzeugung an sich – wird voraussichtlich bereits bis Mitte/Ende der 2030er Jahre erfolgen.
- Technologisch wird für die Roheisenproduktion ein Wandel von der Hochofenroute hin zur Direktreduktionsroute notwendig. Zwei Verfahren, Direktreduktion mit Einschmelzer oder Direktreduktion mit Elektrolichtbogenofen, werden sich dabei voraussichtlich durchsetzen. In der Weiterverarbeitung, dem Downstream, kommt der Einsatz von Wasserstoff z.B. für Brenner in Frage, wobei u.a. metallurgische Fragen noch zu klären sind.

- Die Primärstahlindustrie ist mit 380.000 Arbeitsplätzen ein wichtiger Faktor für den Arbeitsmarkt, insbesondere in strukturschwachen Regionen: Über 64.000 Menschen sind direkt in der Primärstahlindustrie beschäftigt. Hinzu kommen abgeschätzt mehr als 230.000 Beschäftigte bei Zulieferern und Dienstleistern und knapp 84.000 Beschäftigte über induzierte Effekte. Berücksichtigt man die Bedeutung der gesamten Stahlindustrie als Vorleister für Wertschöpfungsketten in vielen Industriezweigen, so hat sie Auswirkungen auf ca. 5 Mio. Beschäftigte.
- Da die Beschäftigten in der Stahlindustrie vorwiegend in strukturschwachen Regionen in Deutschland angesiedelt sind, hat eine erfolgreiche Transformation auch eine strukturpolitische und soziale Komponente (Abbildung 1).

Abbildung 1: Schätzung der Anzahl der Beschäftigten in der Primärstahlindustrie (links) sowie geografische Lage der Hochöfen und regionale Arbeitslosenquoten 2021 (in %, rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

- Die Belegschaften der Primärstahlunternehmen sind geprägt durch einen überproportionalen Anteil an Fachkräften und ein hohes Durchschnittsalter. Vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels stellt die Altersstruktur der Fachkräfte eine Herausforderung dar.
- Die „grüne Transformation“ muss durch eine „digitale Transformation“ in der Primärstahlindustrie begleitet werden. Digitalisierungsmaßnahmen spielen eine zentrale Rolle zur Steigerung der Effizienz der Hochofenroute. Der Technologiewechsel von der Hochofen- hin

zu der Direktreduktionsroute mit „State of the Art“ Anlagen muss hier ein beschleunigender Faktor sein.

Primärstahlindustrie: Unternehmerische Transformationsoptionen

- Für die Transformation der Primärstahlindustrie stellt sich die Frage, ob Direktreduktionsanlagen in Deutschland gebaut werden und die gesamte Primärstahlroute inkl. Roheisenproduktion oder HBI („Hot Briquetted Iron“) – auch Eisenschwamm – importiert wird und somit die Eisenerzeugung außerhalb Deutschlands stattfindet. Werden DRI-Anlagen („Direkt reduziertes Eisen“) in Deutschland gebaut, werden Wasserstoff und Strom in großen Mengen zu wettbewerbsfähigen Konditionen benötigt.
- Für den Bau und Betrieb von Direktreduktionsanlagen in Deutschland und gegen den Bezug von HBI sprechen qualitative Kriterien und die Mitigation von Risiken. Resilienz und Technologieinnovationen sind hierbei aus industriepolitischer Sicht entscheidende Faktoren für eine (umfangreiche) Eigenproduktion von Wasserstoff und DRI. Weiterhin sprechen die verstärkte Ausrichtung auf eine Kreislaufwirtschaft (Schrotteinsatz in Einschmelzer oder Elektroöfen) und energetische Ressourceneffizienz sowie weitere ökologische Aspekte (bspw. Entsorgung von Schlacke) für die heimische DRI-Produktion. Ein Import von Brammen stellt vor dem Hintergrund von Produktspezifikationen (z.B. Güten, Legierungen, Abmessungen) und größeren logistischen Herausforderungen keinen realistischen Entkopplungspunkt für Importe dar.
- Der Bau und Betrieb von DRI-Anlagen in Deutschland – also die Transformation des gesamten Herstellungsprozesses der Primärroute (inkl. Roheisenproduktion) – kann auch zukünftig bei entsprechender Gestaltung der Rahmenbedingungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht wettbewerbsfähig und profitabel sein. Hierbei kommt es unter anderem auf den Vergleich der Kostennachteile und -vorteile einer DRI-Produktion in Deutschland im Vergleich zum HBI-Bezug an.
- Ein Kostennachteil deutscher DRI-Produktion im Vergleich zu HBI-Importen kann sich aufgrund zukünftig höherer grüner Wasserstoff- und Stromkosten aus erneuerbaren Energien in Deutschland gegenüber optimalen Standorten für erneuerbare Energien ergeben, der in dieser Untersuchung perspektivisch mit 50 bis 150 Euro pro Tonne quantifiziert wird. Demgegenüber stehen Kostenvorteile: Diese ergeben sich durch geringere Energiebedarfe („Reheating“) und in diesem Zusammenhang erhöhte Tap-to-Tap Zeiten (die kapazitätserhöhend wirken) sowie durch geringere Brikettierungs- und Transportkosten. Ein Pluspunkt ist die bereits vorhandene „Infrastruktur“ in

Deutschland und Europa z.B. im Hinblick auf Häfen für Eisenerz, die an anderen Standorten der Welt erst aufgebaut werden müsste.

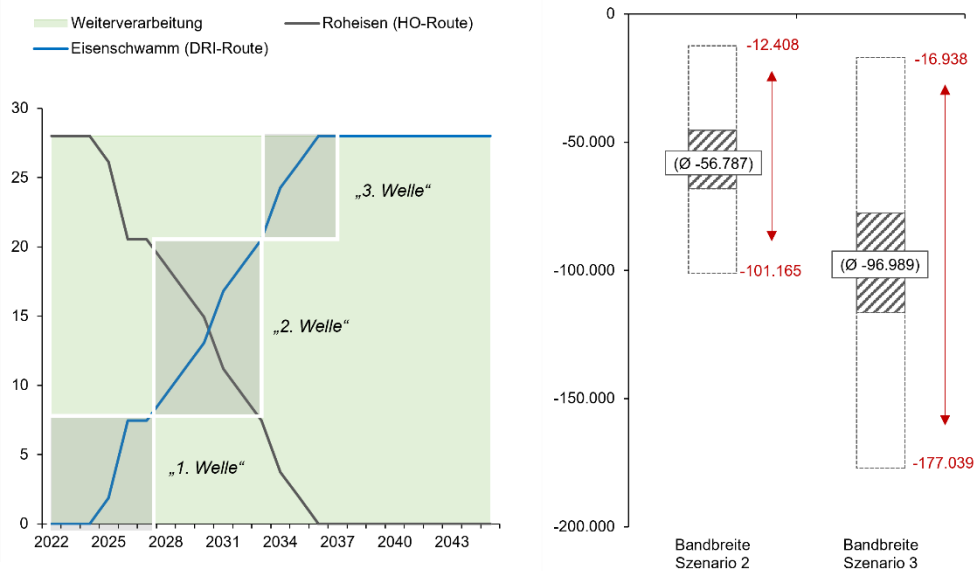
- Ein entscheidender Faktor dürfte die Marge sein, die deutsche Stahlunternehmen im Falle eines Bezuges von HBI als Zuschlag auf die Herstellkosten der Zulieferer aufbringen müssten. Herrschende Meinung ist, dass HBI zumindest mittelfristig ein knappes Gut bleiben wird. Auch bei längerfristigen HBI-Partnerschaften (mit ausländischen Drittunternehmen) ist durch Abhängigkeiten (Marktmacht) und das mit dem Aufbau solcher Anlagen verbundene Risiko mit erheblichen Knappheits- und Risikozuschlägen zu rechnen. Auch „Take or Pay-Vertragsstrukturen“ erscheinen in diesem Zusammenhang wahrscheinlich. Allein diese Marge auf die Herstellkosten und die Bezugsrisiken dürften die Kostenvorteile aufwiegen.
- In Summe stehen dem Kostennachteil deutscher DRI-Produktion im Vergleich zu HBI-Importen aus kostengünstigen Regionen in Höhe von 50 bis 150 Euro Kostenvorteile des Betriebes von Direktreduktionsanlagen in Deutschland in einer Bandbreite von 70 bis 80 Euro pro Tonne gegenüber. Hinzu kommt die Marge auf die Herstellkosten für HBI, die in dieser Untersuchung mit 50 bis 150 Euro pro Tonne quantifiziert wird, so dass sich insgesamt ein Kostenvorteil für den Betrieb einer DRI-Anlage in Deutschland ergäbe. Der Vergleich stützt sich u.a. auf die Annahme zur zukünftigen Verfügbarkeit von Wasserstoff zu wettbewerblichen Preisen in Deutschland. Bei anderen Einschätzungen kann der Kostenvergleich anders ausfallen. Energiekosten auf der einen und die Struktur eines sich entwickelnden HBI-Marktes auf der anderen Seite werden letztlich die entscheidenden Determinanten sein.
- Projektförderungen (in Form von IPCEI/KUEBLL-Förderungen, KSV-Förderungen oder Ähnlichem) sind temporär erforderlich, um zunächst einen vorübergehenden Nachteil gegenüber der herkömmlichen Stahlproduktion auszugleichen, solange es noch keine Leitmärkte für emissionsarme Stähle gibt, da höhere Aufwendungen nicht vollständig durch höhere Preise für emissionsarmen Stahl kompensiert werden. Weiterhin werden Förderungen als Anschubfinanzierung für die Transformation benötigt.

Primärstahlindustrie: Transformationsszenarien

- Auf Basis des Alters der Hochöfen sowie der freien Zuteilung von CO₂-Zertifikaten lassen sich drei Wellen der Transformation des Upstream-Bereiches identifizieren.
- Das Basisszenario bildet einen Bau von DRI-Kapazitäten korrespondierend zum Umfang der Hochofenkapazitäten ab, die Alternativszenarien 2 und 3 stellen eine Transformation von rund 66% (Szenario

2) und rund 50% (Szenario 3) der Roheisenproduktion dar. Die erste Welle ist von den Stahlunternehmen bereits angestoßen. Abbildung 2 veranschaulicht die Wellen exemplarisch am Basisszenario.

Abbildung 2: Szenarien im Überblick: Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute in Deutschland 2030 und 2045 (in Mio. Tonnen pro Jahr, links) Bandbreite Beschäftigungseffekte in den Alternativszenarien 2 und 3 (Anzahl Beschäftigte, rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

- In der Primärstahlindustrie sind rund 64.000 Menschen direkt beschäftigt, davon arbeiten rund 5.000 Menschen in den unmittelbar durch die grüne Transformation betroffenen Aggregaten im Upstream (Kokereien, Sinteranlagen und Hochöfen). Im Basisszenario, in dem Direktreduktionsanlagen korrespondierend zu den gesamten Produktionskapazitäten der Primärroute gebaut werden, kann man von einer nahezu beschäftigungs- und wertschöpfungsneutralen Transformation ausgehen.
- Anders sind die Auswirkungen auf Beschäftigung in den Alternativszenarien 2 und 3 zu bewerten. Durch den Entfall von Produktionskapazitäten für die Roheisenerzeugung ergeben sich auf den ersten Blick „überschaubare unmittelbare negative Effekte“ von rund -2.000 bis -3.000 Beschäftigten. Allerdings sind Implikationen auf Zulieferer (indirekte Effekte) sowie einkommensinduzierte Effekte zu berücksichtigen, so dass der Beschäftigungsverlust auf -12.000 bis -17.000 Beschäftigten ansteigt.
- Ein anteiliges „Herauslösen der Roheisenproduktion“ aus der unternehmerischen Wertschöpfung dürfte aber aller Wahrscheinlichkeit nach auch mit Beschäftigungseffekten in anderen Bereichen wie bspw. dem Overhead einhergehen. Darüber hinaus bestünde die

deutlich erhöhte Gefahr, dass weitere beschäftigungsintensivere Teile der Wertschöpfung in der Stahlproduktion in Drittländer abwandern. Es erscheint somit wahrscheinlich, dass ein „Upstream-Verlust“ in der Praxis mit einem „Downstream-Teilverlust“ einhergehen könnte. An dieser Stelle ergibt sich aber eine Grauzone, so dass Beschäftigungseffekte nur grob abgeschätzt werden können.

- Bei partieller Transformation der Primärstahlindustrie in Deutschland (anteiliger Entfall der Roheisenproduktion und HBI-Importe sowie partielle Downstream-Verluste) werden Beschäftigungsverluste zwischen 57.000 (Szenario 2) und 97.000 (Szenario 3) sowie Wertschöpfungsverluste (auf Basis von Löhnen und Gehältern) in Höhe von 3,2 Mrd. Euro pro Jahr (Szenario 2) und 5,4 Mrd. Euro pro Jahr (Szenario 3) abgeschätzt.

Vorgelagerter Bereich Wasserstoff

- Grüner Wasserstoff ist ein essenzieller Baustein auf dem Weg in eine CO₂-freie Stahlerzeugung. Umgekehrt ist die Stahlindustrie ein zentraler Treiber für den Aufbau von Wasserstoffclustern in Deutschland. Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffwirtschaft sind politische Maßnahmen wie Garantien für langfristige Abnahmeverträge (PPA) sowie ein temporärer Industriestrompreis.
- Für das Basisszenario einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie ergibt sich im Jahr 2030 eine benötigte Produktionskapazität für grünen Wasserstoff von 3,7 GW. Bis 2045 steigt diese nochmals um knapp 30 Prozent auf 4,8 GW. Die Bundesregierung will die inländischen Elektrolysekapazitäten bis 2030 um 10 GW im industriellen Maßstab ausbauen. Die vollständige Transformation der Stahlindustrie ließe die Nachfrage nach Wasserstoff enorm ansteigen und könnte einen großen Beitrag zum Aufbau einer Elektrolyseindustrie in Deutschland leisten.
- Trotzdem wird ein großer Anteil des zukünftigen Wasserstoffbedarfs voraussichtlich durch Importe gedeckt werden müssen. Hierfür ist der Abschluss von diversifizierten internationalen Wasserstoffpartnerschaften von großer Bedeutung. Für Deutschland bieten sich als potenzielle Kooperationspartner nahegelegene Standorte (in Europa bzw. Nordafrika) an, die über eine hohe Verfügbarkeit von kostengünstigem Strom aus erneuerbaren Energien verfügen und über Pipelines angebunden werden können. Langfristige internationale Wasserstoffpartnerschaften wie die Anfang 2023 verkündete Partnerschaft mit Norwegen sind wichtig.
- Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff und Wasserstoffkraftwerke werden auf Wasserstoffspeicher angewiesen sein. Den Langfristszenarien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima-

schutz (BMWK) zufolge bräuchte man zur Umsetzung der Energiewende bis 2045 Wasserstoffspeicher mit einer Kapazität von 72 bis 74 TWh. Aus dem heutigen Bestand an Gasspeichern könnte dem Branchenverband Initiative Energien Speichern zufolge eine Wasserstoffspeicherkapazität in Höhe von 32 TWh bereitgestellt werden. Um die Lücke in Zukunft zu schließen, müssten im großen Umfang Gasspeicher umgewidmet oder Wasserstoffspeicher neu gebaut werden.

- Generell ist das Verhältnis zwischen heimischer Produktion und Import von Wasserstoff nicht nur eine wirtschaftliche, sondern auch eine strategische Frage. Neben den Aspekten der ausreichenden Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und des Einkaufs- bzw. Erzeugungspreises steht auch die Autonomie und Innovationsfähigkeit der heimischen Wasserstoffindustrie im Vordergrund.
- Zurzeit gibt es auf dem deutschen Arbeitsmarkt nur wenige Fachkräfte im Bereich Wasserstofftechnologie. Diese werden vom Markt problemlos aufgenommen, viele offene Stellen bleiben jedoch unbesetzt. Die Situation wird dadurch verschärft, dass sich die gesamte Wirtschaft in einem Umbruch befindet und neue elektrische Verfahren und Prozesse zum Einsatz kommen. Hier steht die Wasserstoffindustrie in Konkurrenz mit verwandten Branchen u.a. der chemischen Industrie oder der Energiewirtschaft/Energiesystemtechnik.

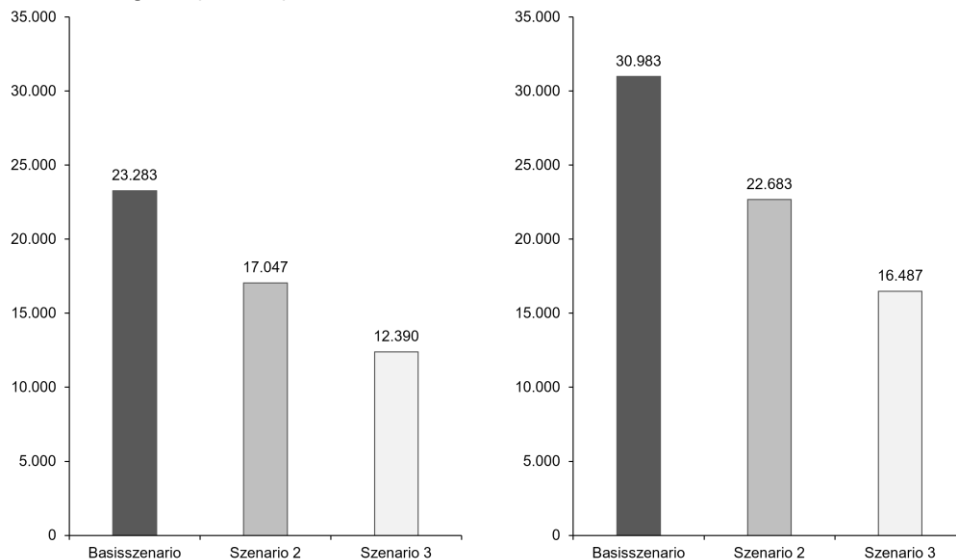
Vorgelagerter Bereich erneuerbare Energien

- In den letzten Jahren durchlief die deutsche Windkraftindustrie eine Konsolidierungsphase, die v.a. auf veränderte Förderbedingungen, starken internationalen Wettbewerb und hohen Preisdruck zurückzuführen ist.
- Nach Angaben des BMWK ist die Bruttobeschäftigung in der Windkraftindustrie zwischen 2016 und 2021 von ca. 167.000 auf ca. 130.000 Beschäftigte gesunken. Angesichts des zu beobachtenden Rückgangs des Zubaus war insbesondere der Produktionsbereich mit Beschäftigungsverlusten konfrontiert.
- Mit der Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes im Jahr 2022 und dem Windenergie-auf-See-Gesetz hat die aktuelle Bundesregierung ambitionierte Ausbauziele verabschiedet. Bei momentan typischen Nennleistungen von 6 MW im Bereich Onshore und 15 MW im Bereich Offshore müssen bis 2030 jährlich ca. 1.750 Anlagen an Land und 185 Anlagen auf See neu hinzukommen. Der Ausbau hat demzufolge das Potenzial, die in den letzten Jahren abgebauten Arbeitsplätze wiederzugewinnen.
- Zu den Hemmnissen, die den Aus- und Zubau von Windkraftanlagen verzögern und damit eine ausreichende Verfügbarkeit von grünem Strom (zu wettbewerbsfähigen Preisen) gefährden können, gehören

insbesondere die Komplexität und die Dauer der Planungs- und Genehmigungsprozesse, die fehlende Ausweisung von Flächen, die in Teilen unzureichende Infrastruktur (Stromnetz, Speicher, Häfen etc.) sowie fehlende inländische Produktionskapazitäten.

- Deutsche Solarzellenhersteller zählten Anfang der 2000er Jahre zu den weltweit führenden in der Entwicklung und Produktion von PV-Modulen, Wechselrichtern, Speichersystemen und anderen Komponenten für erneuerbare Energien. Im Zuge einer umfassenden Novelle des EEG 2011/2012 brach der deutsche Markt ein, es kam zu zahlreichen Insolvenzen deutscher Hersteller. Gestützt durch staatliche Subventionierung drängten zur gleichen Zeit chinesische Produzenten auf den Markt.
- Bis 2017 sank die Zahl der Beschäftigten im Photovoltaikbereich in Deutschland nach Angaben des BMWK auf 39.900, in wenigen Jahren wurde die Zahl der Arbeitsplätze damit fast halbiert. Seitdem nimmt die Beschäftigtenzahl wieder zu, bis 2021 stieg sie auf 58.500 Beschäftigte. Ausschlaggebend für die erneute Zunahme sind steigende Investitionen in die Errichtung von PV-Anlagen in Verbindung mit einem wieder kontinuierlich steigenden jährlichen Zubau der Kapazitäten.
- Perspektivisch dürften die Personalbedarfe aufgrund der zu erwartenden und zur Erreichung der beschlossenen Klimaziele erforderlichen „Renaissance“ der Branchen deutlich ansteigen. Aufgrund des allgemeinen Fachkräftemangels ist dies mit großen Herausforderungen verbunden.
- Eine gelungene (produktionsneutrale) Transformation der Primärstahlindustrie sorgt allein in den vorgelagerten Branchen Wasserstoff, Windkraft und Photovoltaik im Jahr 2045 für Beschäftigungseffekte in einer Größenordnung von insgesamt mehr als 54.000 Arbeitsplätzen in Deutschland (Abbildung 3). Die damit verbundenen Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt belaufen sich im Jahr 2045 auf über 3,2 Mrd. Euro.

Abbildung 3: Auswirkung der Primärstahlszenarien auf die Anzahl der Beschäftigten in den vorgelagerten Branchen Wasserstoff (links) und erneuerbare Energien (rechts) 2045



Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Hier sind nur die Erneuerbare Energien-Bereiche Windkraft und Photovoltaik dargestellt.

Nachgelagerte Bereiche Wind und Automobil

- Die Windkraftbranche ist nicht nur Energieerzeuger für die Elektrolyse von grünem Wasserstoff zur Transformation der Stahlindustrie, sie ist gleichzeitig wichtiger Abnehmer von Stahlprodukten (Prognose: über 1 Mio. Tonnen pro Jahr, wenn der Stahl zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung steht).
- Nach Schätzungen von Agora Energiewende (2021a) könnte der Preis für grünen Stahl zwischen 250 und 300 Euro pro Tonne höher liegen als der für grauen Stahl. Bei einer Offshore-Anlage würden sich dadurch Mehrkosten in Höhe von 500.000 Euro ergeben, für eine Onshore-Anlage in Höhe von 162.500 Euro. Diese Mehrkosten müssten für die Anlagenhersteller an anderer Stelle kompensiert werden, um grünen Stahl wettbewerbsfähig zu machen.
- Weiterer wichtiger Abnehmer von Stahlprodukten ist die Automobilindustrie. Bei einer langfristigen Rückkehr auf das Produktionsniveau der Vor-Corona-Jahre würden in Zukunft hierzulande im Schnitt 5,4 Mio. Pkw pro Jahr hergestellt. Bei einem durchschnittlichen Stahlbedarf von 0,8 Tonnen pro Pkw ergibt sich daraus ein Gesamtbedarf von 4,3 Mio. Tonnen Stahl pro Jahr.
- Mit Blick auf einen durchschnittlichen Pkw würde die Umstellung deutscher Stahlwerke auf die Produktion von grünem Stahl zu zusätzlichen Kosten in Höhe von etwas weniger als 500 Euro pro Pkw

führen. Das entspräche einer Kostensteigerung von weniger als 1,5% bei dem Durchschnitts-Pkw. Diese geringfügigen Mehrkosten dürften keinen wesentlichen Einfluss auf die Nachfrage nach grünem Stahl durch die in Deutschland ansässige Automobilindustrie haben, die den Großteil des Stahls lokal bzw. regional sourct.

- Wir gehen nicht davon aus, dass Mehrkosten in dieser Höhe die Wettbewerbsfähigkeit der Automobilhersteller einschränken. Damit verbundene Auswirkungen auf die Beschäftigung werden daher nicht unterstellt. Wesentliche Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Primärstahlindustrie in Deutschland im Hinblick auf die Kapazitäten zur Versorgung der Automobilindustrie vollständig transformiert wird und deutsche Stahlstandorte erhalten bleiben.
- Wenn allerdings die deutsche Automobilindustrie selbst ihre Transformationsziele verfehlt und dauerhaft Marktanteile verliert, droht eine globale Verlagerung von Teilen der Autoindustrie – das würde auch die Nachfrage für hiesige Stahlstandorte gefährden.

Handlungsempfehlungen

Die folgenden Handlungsempfehlungen werden im Wesentlichen nicht nach Branchen, sondern nach inhaltlichen Ansatzpunkten gegliedert. Viele der Handlungsempfehlungen haben bereits Eingang in den wissenschaftlichen, politischen und somit auch gesellschaftlichen Diskurs gefunden. Die Handlungsempfehlungen bekommen aber im Lichte der Kernaussagen ein besonderes Gewicht.

Beschleunigung von Genehmigungsverfahren und Bürokratieabbau

- Ein wesentliches Hindernis für den transformativen Ausbau der in dieser Studie betrachteten vorgelagerten Branchen Wasserstoff und erneuerbare Energien (inkl. der Windenergiebranche) sowie der Stahlindustrie besteht in der Dauer von Planungs- und Genehmigungsverfahren. Um die umweltpolitischen Ziele zu erreichen, müssen die Verfahren vereinfacht und verkürzt werden. Zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren plant die Bundesregierung u.a. ein Wasserstoffbeschleunigungsgesetz, das noch im Jahr 2023 in Kraft treten soll (BMWK 2023a). Auch der „Net Zero Industry Act“ der EU-Kommission (2023), der Anfang des Jahres 2023 veröffentlicht wurde, zielt auf Verfahrenseffizienz ab. Danach soll ein vereinfachter Rahmen für Investitionen in nachhaltige Energieinfrastruktur in der EU geschaffen werden (u.a. vereinfachte Antragstellung, schnellere Genehmigungsverfahren).
- Die Nutzung digitaler Lösungen sollte vorangetrieben werden. Potenziale bestehen nicht nur bei Genehmigungen, sondern auch bei der

Erfassung und Bereitstellung von Geodaten (z.B. mit Blick auf Natur- und Artenschutz).

- Die Sicherstellung ausreichender Flächen ist ein entscheidender Faktor für den Ausbau von Windkraft (insbesondere Onshore) und Photovoltaik. Dafür ist eine zügige Umsetzung der spezifischen Zielwerte der Bundesländer für die Nutzung erneuerbarer Energien und eine entsprechende Ausweisung in den Raumordnungsplänen zwingend notwendig. Die Erschließung von Offshore-Flächen ist zeitlich besser mit anderen Planungen (wie Flächen- und Netzentwicklungsplänen) abzustimmen.

Reformierung von Ausschreibungsverfahren

- Bei Ausschreibungen für Anlagen, Netzprojekte etc. sollten neben dem Preis und technischen Kriterien stärker qualitative Kriterien (wie nachhaltige Produktion, Beitrag zur Dekarbonisierung/CO₂-Intensität des Herstellungsprozesses, Recyclbarkeit der Anlagenkomponenten, Vereinbarkeit mit Naturschutz, soziale Aktivitäten der Unternehmen, Ausbildungsengagement etc.) berücksichtigt werden. Der Preis als prioritäres Kriterium für den Zuschlag setzt einseitig falsche, weil nur an kurzfristiger Kostenoptimierung orientierte Prioritäten.
- Der administrative Aufwand für die Angebotserstellung (Nachweisführung, Bewertung der Angebote) sollte möglichst gering gehalten werden. Hilfreich ist ein Kriterienkatalog, der idealerweise auf europäischer Ebene entwickelt werden sollte, um möglichst einheitliche Regelungen in allen EU-Ländern zu schaffen.

Beschleunigter Ausbau von Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien und Wasserstoff sowie entsprechender Infrastruktur

- Stabile politische Rahmenbedingungen und langfristige Planungssicherheit für Anlagenbetreiber sind erforderlich, um Investitionen in erneuerbare Energien attraktiv zu machen.
- Angesichts massiver Förderprogramme für die Investition in Fertigungskapazitäten u.a. in Indien und den USA („Inflation Reduction Act“) sollten in Deutschland und Europa Bedingungen geschaffen werden, die dafür sorgen, dass das Management der Betriebskosten (Opex) und der Zugang zu Kapital in der Investitionsphase (Capex) international vergleichbar sind. Anderenfalls würden deutsche und europäische Standort im globalen Wettbewerb massiv benachteiligt.
- Es sollte über industriepolitische Instrumente nachgedacht werden, die den Bau bzw. die Wiederansiedlung von Produktionsstätten forcieren könnten. Dies gilt sowohl für die Windenergie als auch die Photovoltaikbranche. Nur durch den Ausbau der Fertigungskapazitä-

ten können im internationalen Wettbewerb entsprechende Skaleneffekte erzielt werden, um wettbewerbsfähige Kosten zu erreichen.

- Vor allem der Offshore-Bereich der Windenergiebranche braucht eine gute Infrastruktur. Dies gilt in besonderer Weise für die Verfügbarkeit und den Zuschnitt von Hafentflächen, die für die Anlagenproduktion, aber auch für Servicearbeiten oder die Herstellung von grünem Wasserstoff genutzt werden. Zudem bedarf es einer ausreichenden Anbindung an das Hinterland (Logistik, Weitertransport von Wasserstoff und Strommengen etc.). Daher müssen der Auf- und Ausbau von Hafeninfrastruktur und der Netz- bzw. Pipelineausbau intensiviert werden.

Anreizkompatible, einfache regulatorische Rahmenbedingungen für grünen Stahl

- Die Definition und Einführung eines einheitlichen Standards für grünen Stahl ist ein wesentliches Querschnittsthema. Dieser Standard sollte klare Kriterien und Leitlinien für die Produktion von Stahl mit geringen CO₂-Emissionen festlegen. Dieser gemeinsame Rahmen kann dazu beitragen, eine Vergleichbarkeit und Glaubwürdigkeit in Bezug auf umweltfreundlichen Stahl sicherzustellen und ist auch aus „Marketing-Sicht“ (bspw. Labeling für grünen Stahl) essenzielle Grundlage. Bei der Definition von grünem Stahl ist größte Sorgfalt geboten, da hieran auch industrie- und handelspolitische Instrumente anknüpfen können, die die Zukunftsfähigkeit der deutschen und europäischen Stahlindustrie bestimmen werden.
- Die Rolle von CCS-Technologien („Carbon Capture and Storage“, d.h. die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid) muss klar definiert werden. Insbesondere für die im Vergleich zur Roheisenerzeugung weniger CO₂-intensiven Downstream-Aktivitäten ist weiterhin zu prüfen, ob der Einsatz von Wasserstoff technisch/metallurgisch möglich ist. Darüber hinaus wird auch der Upstream-Einsatz von CCS-Technologien in anderen Ländern verfolgt.
- Die Entwicklung einer Quote für grüne Stahlprodukte in den Leitmärkten Windenergie, Automobilindustrie und öffentliche Beschaffung könnte eine planbare Nachfrage für die grünen Stahlprodukte erzeugen und Investitionssicherheit für die Unternehmen schaffen.

Handelspolitische Maßnahmen zum Schutz des Stahlmarktes

- Europa ist auf dem Weg zu einem grünen und hochpreisigen Stahlmarkt bei gleichzeitig anhaltenden globalen Stahlproduktionsüberkapazitäten. Es erscheint ratsam, bereits heute geeignete handelspolitische Maßnahmen zu entwickeln, um den Stahlmarkt vor unfairem

Wettbewerb zu schützen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit mit Handelspartnern wie den USA. Solche internationalen Kooperationen könnten den Austausch bewährter Verfahren, den Technologietransfer und die gemeinsame Forschung und Entwicklung beinhalten, um die Transformation in Regionen zu beschleunigen, die bisher weniger Fortschritte gemacht haben. Daher wäre es ratsam, die Gespräche zu einem „Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminium“ zwischen der EU und den USA zügig voranzutreiben.

Industriepolitik zur Begleitung der Transformation für den Erhalt von Wertschöpfung und Beschäftigung

- Klimaschutzverträge müssen „intelligent“ ausgestaltet werden. Die Finanzierungswirkung ist dabei von besonderer Bedeutung, da im Unterschied zu den IPCEI/KUEBLL keine „Upfront-Förderung“ erfolgt. Antragsteller müssten somit erhebliche Beträge vorfinanzieren. Es erscheint selbst bei einem abgeschlossenen Klimaschutzvertrag sehr unwahrscheinlich, dass Banken auf dieser Basis Darlehen in der notwendigen Größenordnung vergeben. Es empfiehlt sich daher, eine Upfront-Förderung nach dem Vorbild der IPCEI/KUEBLL oder ggf. weitreichende staatliche Garantien zu prüfen.
- Mit Blick auf die Stahlindustrie müssen Förderungen wie Klimaschutzverträge oder IPCEI/KUEBLL-Förderungen auch in Bezug auf die „Fahrweise der Anlagen“ Flexibilität bieten, da mit Antragstellung weitreichende Zukunftsprojektionen erforderlich sind, die oftmals nicht unmittelbar von den Unternehmen beeinflusst werden können. Beispiele hierfür sind die Verfügbarkeit und der Preis von Energieträgern wie Erdgas und Wasserstoff.
- Langfristig ist davon auszugehen, dass die Stromkosten für Elektrolyseure durch den Ausbau der erneuerbaren Energien sinken werden. Doch die Hersteller und Betreiber von Elektrolyseuren werden nur dann bereit sein zu investieren, wenn es genügend Aufträge gibt und die Kosten auf einem wettbewerbsfähigen Niveau liegen. Daher können in der Hochlaufphase Fördermittel (staatliche Subventionen) für Wasserstoff-Projekte einen wichtigen An Schub leisten.
- Für den Betrieb von Wasserstoffelektrolyseanlagen in Deutschland sollten staatliche Garantien/Bürgschaften für Power Purchase Agreements (PPA) zwischen erneuerbaren Energieerzeugern, Betreibern und Abnehmern geprüft werden, da aufgrund der hohen erforderlichen Investitionen diese ansonsten nicht zustande kommen könnten oder Abnahmeverträge hohe Risikozuschläge beinhalten dürften.
- Angesichts der zentralen Rolle energieintensiver Unternehmen in der deutschen Wirtschaft und im Bestreben, deren internationale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten, sollte die Einführung eines temporären

Industriestrompreises geprüft werden, insbesondere auch für die grüne Wasserstoffproduktion. Der Vorschlag des BMWK (6 Cent pro kWh) erscheint angemessen und sollte zügig beihilferechtlich geprüft und implementiert werden.

Aufbau und Intensivierung von internationalen H₂-Partnerschaften

- Standortbedingt wird Deutschland auch zukünftig Energieimporteur bleiben. Kooperationen mit Drittländern spielen als „Enabler“ für Investitionsvorhaben für die Wasserstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle. Aufgrund der hohen Wasserstoffbedarfe kommt der Primärstahlindustrie an dieser Stelle eine hervorgehobene Bedeutung zu.
- Wissenschaft und Industrie haben weltweit geeignete Standorte für die Wasserstofferzeugung (insbesondere gekennzeichnet durch eine hohe Verfügbarkeit von kostengünstiger Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien) analysiert und identifiziert. Nun kommt es darauf an, zügig Partnerschaften zu schließen und die notwendige Infrastruktur aufzubauen. Bei der Importstrategie sollten Abhängigkeiten von bestimmten Ländern vermieden werden. Des Weiteren ist bei der Auswahl von potenziellen Importländern die politische Stabilität der betroffenen Länder zu berücksichtigen. Vor allem der beschleunigte Ausbau des innereuropäischen Wasserstoff-Pipelinesystems (bspw. Anbindung von Deutschland an Nord- und Südeuropa) sowie eine Pipeline-Anbindung an nordafrikanische Standorte müssen vorangetrieben werden.
- In Europa bzw. Deutschland ist die heimische Bereitstellung von Wasserstoff und daraus produzierten Derivaten zu gleichen Kosten wie beispielweise in der MENA-Region¹ grundsätzlich möglich, wenn in der Gesamtbetrachtung alle Produktions-, Infrastruktur- und Transportkosten berücksichtigt werden (Merten et al. 2020). Der Fokus auf ein europäisches Importszenario würde große Teile der Wertschöpfungsketten und der Investitionsvolumina und die damit verbundenen Arbeitsplätze der Zukunft in Europa halten und sogar neue schaffen. Der intensive Handel von grünem Wasserstoff mit verlässlichen europäischen Partnerstaaten würde diese enger an Deutschland binden und insgesamt die EU als leistungsstarken Wasserstoff-Akteur im globalen Wettstreit mit den USA und China platzieren. So kann eine europäisch ausgerichtete Wasserstoffimportstrategie zur Stärkung des inneren Zusammenhalts in Europa beitragen und den europäischen Binnenmarkt fördern.

¹ MENA steht für „Middle East and North Africa“, d.h. Nahost und Nordafrika

- Um den im Vergleich größten ökologischen Hebel bestmöglich zu nutzen, sollte eine Priorisierung der (Primär-)Stahlindustrie als Großabnehmer für Wasserstoff in Betracht gezogen werden.

Maßnahmen zur Bewältigung des vorherrschenden Fachkräftemangels und des demografischen Wandels in Deutschland

- Eine zentrale Herausforderung zum Gelingen der Transformation der Primärstahlindustrie und der Energiewende ist die Verfügbarkeit von Fachkräften. Heute herrscht bereits vielfach Mangel an qualifizierten Fachkräften. Durch den demografischen Wandel und den von der Politik angestrebten massiven Ausbau erneuerbarer Energien wird sich die Situation zukünftig verschärfen. Employer Branding, Ausbildungsmarketing und betriebliche Weiterbildung müssen auf Unternehmensebene eine tragende Rolle einnehmen.
- Der Gewinnung von Fachkräften aus dem Ausland muss eine erhöhte Bedeutung zukommen. Hierfür ist eine einfachere Anerkennung beruflicher Qualifikationen wesentliche Grundvoraussetzung. Bestehende Initiativen von Bund, Ländern, Verbänden, Gewerkschaften sowie Agenturen und Unternehmen sind zu stärken.
- Im Rahmen der Berufsorientierung sollte die Attraktivität von handwerklichen und MINT-Berufen für junge Menschen besser dargestellt werden, um mehr Interesse für solche Berufe zu wecken. Bestehende Informationskampagnen sollten intensiviert werden, um das Bewusstsein für die vielfältigen Betätigungs- und Karrieremöglichkeiten im Stahlbereich und im Bereich erneuerbarer Energien zu schärfen. Hierbei sind Kooperationen zwischen Schulen, Bildungseinrichtungen und Unternehmen von besonderer Bedeutung.
- Die grüne Transformation führt zu veränderten Anforderungen an Auszubildende und Fachkräfte. Der Erwerb von Wissen und Fertigkeiten im Bereich erneuerbarer Energien/Technologien, Zusatzqualifikationen und Spezialisierungen spielt eine wichtige Rolle. Ausbildungsgänge und Weiterbildungsangebote sind daran anzupassen. Dabei sind transversale Kompetenzen (insbesondere digitale-, methodische-, individuelle und grüne Kompetenzen) von hoher Bedeutung und müssen verstärkt in die Bildungsinhalte von Schulen, Hochschulen und Universitäten einfließen, aber auch in der Berufsausbildung vermittelt werden. Dafür müssen die Inhalte zukünftiger technischer Ausbildungsberufe schnellstmöglich mit Partnern wie der IHK entwickelt und zertifiziert werden. In den Unternehmen spielt der Wissenstransfer der Baby-Boomer-Generation an jüngere Kollegen eine zentrale Rolle.
- Weitere personalwirtschaftliche Herausforderungen sind mit der fortschreitenden Digitalisierung und der zunehmenden Implementierung

von künstlicher Intelligenz verbunden. Dies wird u.a. zur Veränderung von Arbeitsabläufen, Qualifikationsbedarfen und der Art der Zusammenarbeit führen. Arbeitskulturen entwickeln sich weiter. Die Belegschaften sind frühzeitig in die Gestaltung dieses Transformationsprozesses einzubinden.

1. Kontext, Auftrag und Ziele der Studie

1.1. Kontext

Die Europäische Union hat einen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umbau eingeleitet, der bis 2050 zur Klimaneutralität führen soll. Deutschland will dieses Ziel bereits 2045 erreichen. Dazu muss sich auch die Industrie als bedeutender Emittent von Treibhausgasen transformieren. Die Stahlindustrie verursacht ca. ein Drittel der industriellen CO₂-Emissionen.

Mit den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsschritten nimmt die Stahlindustrie in der Volkswirtschaft und gesellschaftlich eine wichtige Rolle im Hinblick auf Beschäftigung und Wertschöpfung ein. Die Umstellung zu einer klimaneutralen Stahlproduktion ist somit auch eine große Herausforderung hinsichtlich des Erhalts von Wertschöpfung, Beschäftigung und nicht zuletzt des Industriestandortes Deutschland.

Die Stahlerzeugung kann grundsätzlich über zwei Routen erfolgen: die Primär- und die Sekundärroute. In der Primärstahlindustrie (Hochofenroute) wird Roheisen unter Nutzung von in Hochofen aus Rohstoffen aufbereitetem Eisen und Eisenerz sowie in Kokereien aufbereiteter Kohle (Koks) hergestellt. Anschließend erfolgt die Verarbeitung zu Stahl häufig in Brammenform in Stahlwerken. Diese Produktionsschritte werden als Upstream bezeichnet. Weitere Schritte wie Walzen oder Beschichten werden als Downstream bezeichnet.

Durch Verwendung von Koks als Reduktionsmittel gehen insbesondere Upstream-Prozessschritte mit hohen, prozessbedingten Treibhausgasemissionen einher. Als technische Lösung zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen zeichnet sich in der deutschen Primärstahlindustrie die erdgas-/wasserstoffbasierte Direktreduktion (DRI) in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen (EAF) oder Schmelz-Reduktionsöfen („Einschmelzer“, SAF) ab.

Die Sekundärstahlindustrie, die sogenannte Elektroroute (Elektrostahl), umfasst das Recycling und die Wiederverwertung von Stahlprodukten durch das Einschmelzen in Elektroöfen. Die vorliegende Studie betrachtet die Primärroute.

1.2. Gegenstand des Auftrags

Die Fachkommission HySteel des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbandes (DWV) e.V. ist ein branchenübergreifender Zusammenschluss von Unternehmen und Organisationen aus Wirtschaft und Wissenschaft und wurde ursprünglich vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gefördert. Die Verantwortung ist mit der neuen Legislaturperiode in das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) übergegangen. Die Fachkommission verfolgt das Ziel,

eine zukunftsweisende Strategie für eine emissionsarme, wasserstoffbasierte Stahlproduktion im Jahr 2045 für Deutschland zu erarbeiten.

Im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspaketes „Wissenstransfer und Innovation“ der Fachkommission HySteel sollen die Auswirkungen der Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff auf den Arbeitsmarkt analysiert werden. Die vorliegende Studie soll insbesondere die nachfolgenden Themen bearbeiten („Terms of Reference“ der Fachkommission HySteel):

1. Analyse der aktuellen Situation des deutschen Arbeitsmarktes in der deutschen Stahlindustrie und in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff sowie den nachgelagerten Stufen Automobil und Windkraft
2. Szenarien-basierte Analyse der Auswirkungen der Transformation der deutschen Primärstahlindustrie in den Zeithorizonten 2030 und 2045 auf die Entwicklung von Beschäftigung und Wertschöpfung im Stahlsektor und in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff sowie den nachgelagerten Stufen Automobil und Windkraft
3. Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zum Erhalt und zum Ausbau deutscher Industriearbeitsplätze und heimischer Wertschöpfung in den oben beschriebenen Bereichen

1.3. Leitfragen der Studie

Für die Transformation der Stahlindustrie ist eine Umstellung der Produktionsprozesse auf klimaneutrale Technologien erforderlich. Dies umfasst insbesondere die Umstellung des Upstream-Bereiches der Hochofenroute auf die Direktreduktion von Eisenerz mit grünem Wasserstoff, die übergangsweise auch mit Erdgas oder emissionsarmem Wasserstoff erfolgen kann.

Die Stahlindustrie mit ihren rund 117.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten ist für den Industriestandort Deutschland von herausragender Bedeutung, da sie am Beginn zahlreicher Wertschöpfungsketten steht und bis zu 5 Mio. Beschäftigte an diesen Wertschöpfungsketten hängen. An der Stahlindustrie wird sich erweisen, ob die Transformation ohne (signifikanten) Verlust von Beschäftigung und Wertschöpfung gelingt und somit Ökonomie und Ökologie sowie soziale Aspekte positiv zusammenwirken können.

Die vorliegende Studie nutzt Ergebnisse der Untersuchung „H₂-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus“ (Küster Simic/Schönfeldt 2022), die eine erste Einschätzung zur Frage der Arbeitsplatzefekte der Transformation der Stahlindustrie beinhaltet. Aus dem Auftragsgegenstand lassen sich folgende Leitfragen für die Studie herleiten:

Wie ist die aktuelle Situation auf dem deutschen Arbeitsmarkt in der Stahlindustrie und den vor- und nachgelagerten Wirtschaftszweigen?

- Anzahl und Struktur der Beschäftigten in der Stahlindustrie?
- Anzahl und Struktur der Beschäftigten in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff?
- Anzahl und Struktur der Beschäftigten in den nachgelagerten Wertschöpfungsstufen Automobilbranche und Windenergiebranche?

Wie könnten sich Beschäftigung und Wertschöpfung in der Stahlindustrie und in den vor- und nachgelagerten Wirtschaftszweigen unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien zur Transformation der deutschen Primärstahlindustrie bis 2030 und 2045 entwickeln?

- Wie entwickelt sich die Beschäftigung und Wertschöpfung im Stahlsektor in den verschiedenen Transformationsszenarien? Hierbei steht neben der quantitativen Entwicklung ebenso die qualitative Abschätzung (Bedarf an qualifizierten Fachkräften, Qualifikationsbedarfe in der Transformationsphase) im Fokus.
- Wie entwickelt sich Beschäftigung und Wertschöpfung in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoff?

Wie könnte sich die Stahlnachfrage in den nachgelagerten Bereichen der deutschen Primärstahlindustrie bis 2045 entwickeln?

- Wie entwickelt sich die Nachfrage nach Stahl in den nachgelagerten Wertschöpfungsstufen der Windenergie- und der Automobilbranche?
- Was würden Preissteigerungen bei (grünem) Stahl für die Sourcing-Strategien in der Windenergie- und Automobilbranche bedeuten?

Welche Handlungsempfehlungen zum Erhalt und zum Ausbau der deutschen Industriearbeitsplätze und der heimischen Wertschöpfung in den betrachteten Wirtschaftszweigen lassen sich ableiten?

Die Ergebnisse der Untersuchung werden branchenbezogen dargestellt. Im Anschluss an Erläuterungen zur Methodik (Kapitel 2) folgen zunächst Ausführungen zur Stahlindustrie (Kapitel 3), danach zur Wasserstoffbranche (Kapitel 4), dann zu den Kernbranchen der erneuerbaren Energien, unterteilt in Windenergie (Kapitel 5) und Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse (Kapitel 6), und schließlich zur Automobilindustrie (Kapitel 7).

Dabei werden für jeden Bereich jeweils Branchen- und Arbeitsmarktdaten skizziert (u.a. Abgrenzung der Branche, Umsatz, Beschäftigung, Fachkräftesituation). Anschließend werden die Szenarien für eine wasserstoffbasierte Transformation der Primärstahlproduktion in Deutschland in den Jahren 2030 und 2045 (Stahlindustrie) bzw. die jeweiligen Auswirkungen der Szenarien (vorgelagerte Branchen) beschrieben.

2. Methodische Vorgehensweise

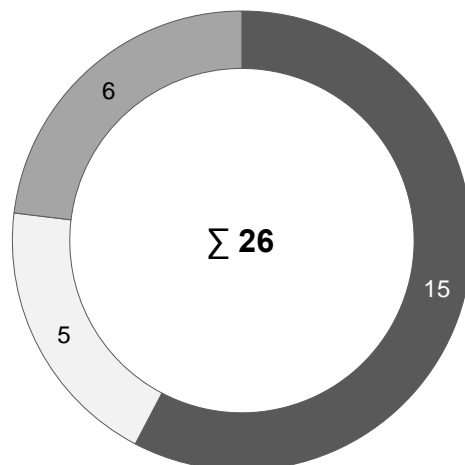
2.1. Überblick

Für die Studie wurde auf mehrere Methoden zurückgegriffen. In einem ersten Arbeitsschritt wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Aufbauend auf dem Review wurden Interviews mit 26 Experten² aus unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt (Abbildung 4).

Als Interviewform wurde ein strukturierter Ansatz mithilfe eines Leitfadens gewählt. Demnach wurden im Vorfeld Fragen definiert, die Reihenfolge der gestellten Fragen blieb im Interview flexibel. Wesentliche Ergebnisse der Studie wurden im Anschluss durch weitere Experteninterviews validiert. Bei der Auswahl der Interviewten wurde darauf geachtet, dass verschiedene Perspektiven, Wahrnehmungen und Interessenspositionen vertreten sind.

Abbildung 4: Anzahl der Befragte Experten nach Fachbereichen

■ Stahl □ Wasserstoff ■ Erneuerbare Energien (inkl. Wind)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Interviews wurden im Zeitraum von April bis August 2023 durchgeführt. Die Informationen und Einschätzungen der Experten und die Ergebnisse der Literaturanalyse dienen als Input für die Ableitung von Transformationsszenarien der Primärstahlindustrie und für das Simulationsmodell zur Abschätzung der Entwicklung von Beschäftigung und Wertschöpfung in den betrachteten vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Zudem wurden sie für die Ab-

² Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie bei Personenbezeichnungen oder personenbezogenen Hauptwörtern das generische Maskulinum verwendet. Die verkürzte Sprachform hat nur sprachliche Gründe und beinhaltet keine Wertung. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichberechtigung für alle Geschlechter.

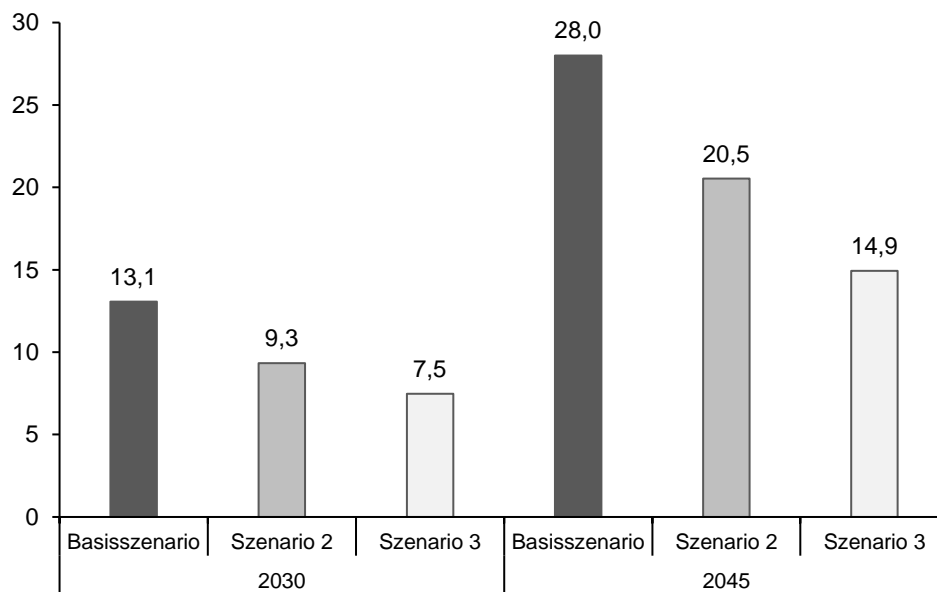
schätzung der zukünftigen Stahlnachfrage in den Abnehmerbranchen Windkraft und Automobil sowie abschließend zur Validierung wesentlicher Befunde herangezogen.

2.2. Szenarien für die Primärstahlerzeugung als Ausgangsbasis

Als Ausgangsbasis wurden drei Szenarien für die Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute für die Jahre 2030 und 2045 entwickelt. Aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren und der langen Zeitachse besteht eine hohe Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung. Es sei ausdrücklich betont, dass die Szenarien keine Prognose abbilden.

Ein Überblick zur Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute im Szenario 1 (nachfolgend als „Basisszenario“ bezeichnet) sowie in den Szenarien 2 und 3 (nachfolgend gemeinsam auch als „Alternativszenarien“ bezeichnet) kann Abbildung 5 entnommen werden. Die Darstellung knüpft an die Aufsatzjahre 2030 („Zwischenziel“) und 2045 („vollständige Klimaneutralität in Deutschland“) an.

Abbildung 5: Zusammenfassung: Roheisenproduktion über die Direktreduktionsroute in Deutschland 2030 und 2045 entlang der Szenarien (in Mio. Tonnen pro Jahr)



Quelle: Eigene Darstellung

Das Basisszenario bildet eine vollständige Transformation der Primärstahlindustrie im Hinblick auf sämtliche Wertschöpfungsstufen und Produktionsmengen in Höhe von jährlich 28 Mio. Tonnen ab. Dabei sind vor allem für die erste Transformationswelle bis Mitte der 2020er Jahre (soweit vorhanden) konkrete Transformationspläne der Primärstahlunternehmen und Aufträgen von Anlagenbauern in den dargestellten Hochlauf eingeflossen. Da

diese konkreten Pläne zum Zeitpunkt der Studienfertigstellung im August 2023 allerdings nur einen Teil der zu transformierenden Hochöfen betreffen, wird die Transformation der weiteren Hochöfen auf Basis von Annahmen simuliert, die auf dem Alter der Hochöfen sowie dem Auslauf der freien Zuteilung von Zertifikaten beruhen.

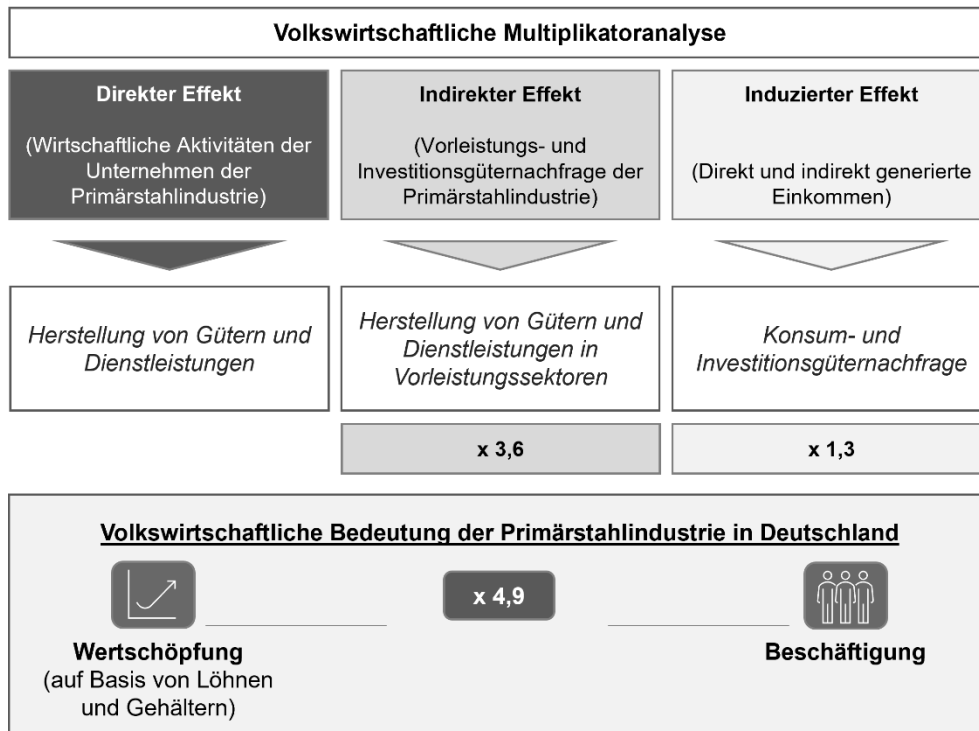
Vereinfacht bildet Szenario 2 eine Transformation von rund zwei Dritteln („Welle 1“ und „Welle 2“) und Szenario 3 von rund der Hälfte („Welle 1 plus“) der Primärstahlindustrie ab. Es ist zu beachten, dass es sich zunächst nur um die Roheisenproduktion handelt, so dass in diesem Schritt noch keine Aussagen über die weiteren Produktionsschritte ab dem Stahlwerk getroffen werden. Die Herstellung von Roheisen in Deutschland hat aber wesentlichen Einfluss auf die vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Wasserstoffproduktion.

2.3. Analyse von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten in der Primärstahlindustrie

Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte durch die Transformation lassen sich in drei Wirkungsbereiche unterscheiden: „direkte“, „indirekte“ und „induzierte“ Effekte (Abbildung 6). Aus den Investitionen in den Bau von Anlagen für die Primärstahlerzeugung sowie aus deren Montage und Betrieb ergibt sich ein direkter (positiver) Beschäftigungseffekt bei den Herstellern und Betreibern der Anlagen. Demgegenüber steht ein negativer direkter Beschäftigungseffekt, da einige Anlagen (Hochöfen, Sinter und Kokereien) nicht weiterbetrieben werden.

Die direkte Beschäftigung bezieht sich also auf Arbeitsplätze, die unmittelbar im Zusammenhang mit der Primärstahlerzeugung stehen. Da die Hersteller und Betreiber ihrerseits Güter und Dienstleistungen bei Vorleistungs- und Zulieferunternehmen nachfragen, tragen sie auch zur Schaffung indirekter Beschäftigung in anderen Branchen bei (DIW Econ 2015; Prognos 2019a).

Abbildung 6: Analyse von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten der Primärstahlindustrie (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung nach DIW Econ (2022)

Multiplikatoreffekte

Neben den direkten und indirekten Wertschöpfungsstufen werden für die Projektion Multiplikatoreffekte berücksichtigt, die durch die im Laufe des Wertschöpfungsprozesses entstandenen Einkommen und die damit verbundenen Ausgaben für Konsum (Lebensmittel, Möbel etc.) und Investitionen ausgelöst werden. Dadurch wird wiederum Wertschöpfung angestoßen, die zu Beschäftigung führt (DIW Econ 2017; Gehrke et al. 2017).

Solche einkommensinduzierten Effekte ergeben sich sowohl in Verbindung mit den Konsumausgaben der Beschäftigten als auch im Zusammenhang mit den Konsumausgaben der in den Vorleistungs- und Zulieferunternehmen beschäftigten Arbeitskräfte. Durch die zusätzliche Berücksichtigung von induzierten Effekten fallen die errechneten Beschäftigtenzahlen im Ergebnis höher aus (Prognos 2019c).

Die Ableitung dieser Effekte mit Blick auf die Transformationsszenarien für die Stahlindustrie und die vor- und nachgelagerten Bereiche ist nicht einfach. Einerseits lassen sich die betrachteten Branchen anhand der amtlichen Statistik zum Großteil nicht trennscharf abgrenzen (Primärstahl, Wasserstoff, erneuerbare Energien, Windkraft). Andererseits sind weitere Implikationen auf Wertschöpfungsketten zu berücksichtigen, die nicht notwendigerweise über eine klassische „Input-Output-Analyse“ (siehe z.B. Statistisches Bundesamt 2021) abgebildet werden können, da sich zukünftige Zusammenhän-

ge nicht unmittelbar aus Vergangenheitsdaten ableiten lassen. Dies betrifft z.B. den technologischen Wandel von der Hochofen- hin zur Direktreduktionsroute, die signifikante Integration von Wasserstoff in Wertschöpfungsketten oder auch den Verlauf der Energiewende in Deutschland. Zu bedenken ist auch der lange Analyse- bzw. Prognosezeitraum von über zwei Jahrzehnten.

Indikativer Ansatz

In Anbetracht der Unschärfen wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Input-Output-Analyse zur Abschätzung indirekter Effekte verzichtet. Es wird stattdessen ein indikativer Multiplikator-Ansatz gewählt, dessen Faktoren sich aus der Literatur ableiten lassen. Hierzu wurden Studien von BMWi (2012, 2021), DIW Econ (2021, 2022) und Gehrke et al. (2017) herangezogen.

Zur Ermittlung der direkten Beschäftigung in der Primärstahlindustrie wurde auf öffentlich zugängliche Unternehmensdaten wie Jahresabschlüsse, Investor-Relations-Präsentationen o.ä. zurückgegriffen. Mithilfe der Experteninterviews wurden Informationen validiert und Effekte der Transformation auf Beschäftigung in Hochöfen, Sinteranlagen und Kokeereien sowie in Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen/Einschmelzern analysiert.

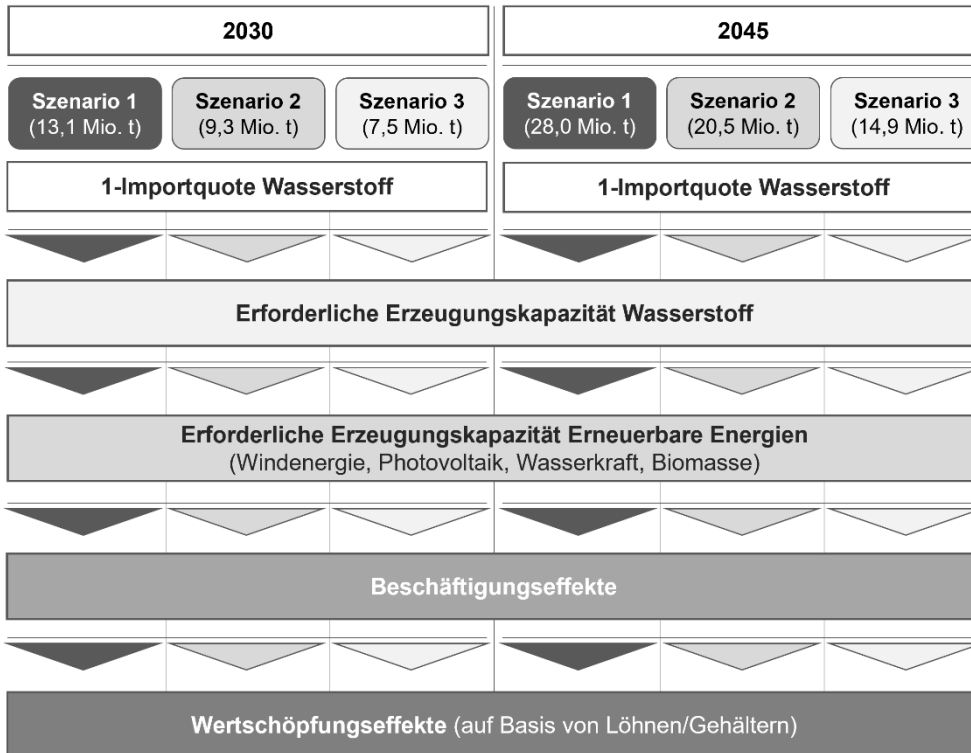
Neben einer Detailanalyse zu etwaigen durch den technologischen Wandel ausgelösten Beschäftigungseffekten und Qualifikationsanforderungen im Basisszenario wurden Beschäftigungseffekte in den Szenarien 2 und 3 abgeleitet.

2.4. Simulationsmodell zur Abschätzung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten für die betrachteten vorgelagerten Wertschöpfungsstufen

Zur Abschätzung der Auswirkungen der Transformationsszenarien der Primärstahlindustrie auf notwendige Erzeugungskapazitäten in den vorgelagerten Stufen Wasserstoff und erneuerbare Energien sowie daran anknüpfend auf direkte, indirekte sowie induzierte Beschäftigung und indikativer Wertschöpfung auf Basis von Löhnen und Gehältern in den Jahren 2030 und 2045 wurde ein excelbasiertes Simulationsmodell entwickelt (Abbildung 7). Die Inputfaktoren wurden anhand vorliegender Studien und auf Basis der geführten Expertengespräche ermittelt bzw. plausibilisiert.

Die grundlegende Methodik wird nachfolgend erläutert, branchenspezifische Detailannahmen werden aus Gründen der Übersichtlichkeit in den jeweiligen Kapiteln eingehend erörtert.

Abbildung 7: Ableitung von Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekten entlang der Szenarien (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung

2.4.1. Ermittlung der notwendigen Erzeugungskapazitäten

Auf Basis der Annahmen für die Roheisenproduktion mittels Direktreduktion wurden für die vorgelagerten Stufen (Wasserstoff, Erneuerbare Energien mit Schwerpunkten auf Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse sowie Windenergie als separater Bereich) zunächst die für die Transformation erforderlichen Kapazitäten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff in den Jahren 2030 und 2045 ermittelt. Der überwiegende Teil an Strom (ca. 75%) und Wasserstoff wird für den Produktionsschritt Direktreduktion zur Erzeugung von Roheisen sowie vorgelagert die Elektrolyse von Wasserstoff benötigt. Daher ist es sachgerecht, zunächst den inländischen Kapazitätsaufbau auf die Roheisenherstellung und Elektrolyse in Deutschland zu beziehen.

Wasserstoffbedarf

In einem ersten Schritt wurde berechnet, welcher Wasserstoffbedarf und – darauf basierend – welche notwendigen Elektrolysekapazitäten sich entlang der Szenarien für die Roheisenproduktion über die wasserstoffbasierte Direktreduktionsroute ergeben.

Die Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022a) kommt zu der Einschätzung, dass allein für die Primärstahlerzeugung mittels wasserstoffbasierter Direktreduktion rund 2 Mio. Tonnen Wasserstoff pro Jahr erforderlich wären. Rech-

nerisch ergibt sich auf Basis einer Produktionsmenge von 28 Mio. Tonnen Primärstahl ein überschlägiger Bedarf von 0,07 Tonnen Wasserstoff pro Tonne Primärstahl. Dieser Wert basiert auf der Annahme, dass die Primärstahlerzeugung ausschließlich auf Grundlage von Eisenschwamm (DRI) erfolgt. In der Praxis wird, zumindest in einem begrenzten Umfang, auch Schrott im Einschmelzprozess verwendet.

Da es auch gegenläufige Effekte wie die begrenzte Menge an qualitativ hochwertigem Schrott und weitere Wasserstoffbedarfe in den folgenden Produktionsprozessschritten (z.B. für Hilfsbrenner im Stahlwerk) gibt, wurde als Referenzwert zur Ermittlung der Elektrolysekapazitäten der Wert von 0,07 Tonnen Wasserstoff pro Tonne Primärstahl zugrunde gelegt. Darüber hinaus wurden für die Jahre 2030 und 2045 unterschiedliche Wasserstoffimportquoten angenommen.

Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien

Für die nicht importierten, also in Deutschland produzierten Wasserstoffmengen wurde angenommen, dass der benötigte Strom für die Elektrolyse ausschließlich aus Stromquellen für erneuerbare Energien bezogen wird, die sich in Deutschland befinden. Daher wurde in einem zweiten Schritt ermittelt, welcher Strombedarf und welche installierte Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für die Elektrolyse in Deutschland je nach Szenario und Zeithorizont erforderlich ist.

Wie hoch die Beiträge einzelner Energiequellen im Strommix sind, um den Strombedarf für die Elektrolyse in den Jahren 2030 und 2045 zu decken, ergibt sich in Anlehnung an den prognostizierten Entwicklungspfad der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Agora Energiewende 2021b). In der Studie wird die für die Energiewende in Deutschland zukünftig erforderliche Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach unterschiedlichen Energiequellen abgeschätzt.

Strompreise werden im Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Somit wird auch nicht berücksichtigt, ob Elektrolysekapazitäten z.B. vorrangig an küstennahen Standorten aufgebaut werden, weil dort aufgrund der günstigen Verhältnisse für die Stromerzeugung aus Windenergie an Land (Onshore) und auf See (Offshore) ggf. günstigere Strompreise zu erwarten wären.

In Abgrenzung dazu liegen dem Simulationsmodell die notwendigen Stromerzeugungskapazitäten für die Wasserstoffelektrolyse zugrunde.

2.4.2. Auswirkung der Szenarien auf Beschäftigung und Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern

Grüner Wasserstoff nimmt im Rahmen der Transformation eine zentrale Rolle ein. Da sich die Branche noch am Beginn des Hochlaufs befindet und bisher weitestgehend grauer Wasserstoff/Ammoniak bzw. Pilotprojekte/Testanlagen für grünen Wasserstoff die Branche in Deutschland prägen, scheint

die aktuelle Beschäftigungssituation der Branche keine geeignete Ausgangsbasis für eine Zukunftsprojektion zu sein.

Der zukünftig erwartete Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland spielt im wissenschaftlichen Diskurs indessen eine besondere Rolle. Daher wurde im Simulationsmodell für den Bereich Wasserstoff das Aufsatzjahr 2030 zur Ableitung von Effekten für die Bruttobeschäftigung (d.h. direkte und indirekte Beschäftigung) gewählt.

Beschäftigungseffekte im Bereich Wasserstoff

In einem ersten Schritt wurden auf Basis bestehender Analysen (DWV 2019; Fuel Cells/Hydrogen 2 Joint Undertaking 2019; UM BW 2020) ermittelte Beschäftigungsbandbreiten auf einen gewählten Referenzwert der installierten Leistung von 100 MW vereinheitlicht und darauf basierend ein durchschnittlicher Beschäftigungswert ermittelt.

Für die Projektionen von 2030 bis 2045 wurden Produktivitätsfortschritte berücksichtigt. Dafür wurde die Entwicklung der Arbeitsproduktivität als Kenngröße herangezogen. Laut Statistischem Bundesamt hat sich die Arbeitsproduktivität (bzw. die Bruttowertschöpfung) je Beschäftigten in Deutschland über alle Branchen hinweg zwischen 2012 und 2021 jährlich im Durchschnitt um 0,24% erhöht. Für das Modell wird vereinfacht angenommen, dass die Arbeitsproduktivität je Beschäftigten im Zeitraum von 2030 bis 2045 für den Bereich Wasserstoff jährlich um 0,5% zunimmt.

Beschäftigungseffekte im Bereich erneuerbarer Energien

Zur Abschätzung der künftig durch die Transformation der Stahlindustrie ausgelösten Entwicklung der Beschäftigung in den Bereichen Windkraft an Land (Onshore), Windkraft auf See (Offshore), Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse wurde im ersten Schritt überprüft, wie sich im ex-post-Zeitraum der Zubau bzw. die Höhe der installierten Leistung auf die Zahl der Beschäftigten ausgewirkt hat (siehe ausführlich Prognos 2019c).

Dabei interessiert die Frage, wie viele Beschäftigte für die Herstellung, Projektentwicklung und -planung/FuE und Montage/Installation von 1 GW Windkraftanlagen, Solaranlagen oder Generatoren sowie für deren Betrieb (inkl. Service/Wartung) mit 1 GW installierter Leistung benötigt werden. Hierfür wurde auf Zeitreihen des BMWK (2022) (Beschäftigung) und des Umweltbundesamtes (2023a) (installierte Leistung) zurückgegriffen. Zu beachten ist, dass das BMWK (2022) für die einzelnen Bereiche erneuerbarer Energien im Rahmen eines Schätzmodells die Bruttobeschäftigung erfasst.

Üblicherweise werden die über den ex-post-Zeitraum (bspw. 10 Jahre) ermittelten Durchschnittswerte als zentrale Schätzgrundlage zur Projektion der künftigen Beschäftigtenzahl herangezogen (Prognos 2019c). Aufgrund stark von den anderen betrachteten Branchen abweichender und wenig realistisch erscheinender Durchschnittswerte für die Zahl der Beschäftigten pro 1 GW Leistung im Bereich Wind Offshore über die letzten 10 Jahre wurde

das Jahr 2021 als Basisjahr für die Abschätzung der Beschäftigungseffekte pro 1 GW Leistung für das Jahr 2030 gewählt. Basisjahr für die Abschätzung der Beschäftigungseffekte bis 2045 ist das Jahr 2030.

Für das Modell wurde vereinfacht angenommen, dass die Arbeitsproduktivität je Beschäftigten in den Zeiträumen bis 2030 und 2045 in allen Bereichen erneuerbarer Energien jährlich um 0,5% zunimmt. Bei Wind Onshore und Offshore wurde zusätzlich angenommen, dass sich die Anlageneffizienz bis 2030 um 1 bzw. 3% pro Jahr steigert. Produktivitätsfortschritte bzw. Effizienzgewinne vermindern den Beschäftigungsaufbau (bzw. tragen zum Rückgang von Beschäftigung bei).

Auf dieser Grundlage (Beschäftigte in FTE pro 1 GW installierte Leistung für die Projektionszeitpunkte 2030 und 2045) wurde für die einzelnen Teilbereiche erneuerbarer Energien im Simulationsmodell die für die Realisierung der erforderlichen installierten Leistung (in GW) notwendige Beschäftigung (in FTE) abgeleitet.

Anders ausgedrückt: Durch die Multiplikation der für 2030 und 2045 abgeschätzten Zahl der Beschäftigten pro 1 GW installierter Leistung mit dem erwarteten Leistungsbedarf lässt sich der durch die Transformation der Stahlindustrie ausgelöste direkte und indirekte Beschäftigungseffekt in den Teilbereichen erneuerbarer Energien ermitteln.

Wertschöpfungseffekte

Die damit verbundenen anteiligen Wertschöpfungseffekte (d.h. ohne Berücksichtigung von Abschreibungen/Gewinnen) wurden jeweils abgeschätzt, indem die für die vorgelagerten Bereiche errechnete Gesamtbeschäftigtenzahl mit dem durchschnittlichen Bruttoeinkommen je nach Bereich multipliziert wurde. Annahmen in Bezug auf das durchschnittliche Einkommen wurden vor dem Hintergrund mitunter stark abweichender Einkommensstrukturen in den betrachteten Vorleistungsbranchen separat getroffen. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt in den jeweiligen Einzelabschnitten.

2.5. Mögliche Veränderungen der Stahlnachfrage und Transformationseffekte in ausgewählten nachgelagerten Branchen

Für die Automobil- und die Windenergiebranche als nachgelagerte Wirtschaftsbereiche der Primärstahlindustrie wurde jeweils abgeschätzt, wie sich die Stahlnachfrage in Zukunft entwickeln könnte. Dafür wurden zunächst die Stahlbedarfe für eine durchschnittliche Windkraftanlage und für einen durchschnittlichen Pkw ermittelt. Der jeweilige Gesamt- und der jährliche Stahlbedarf bis 2045 ergibt sich durch Multiplikation der entsprechenden Werte mit dem ermittelten zukünftigen Bedarf an Anlagenkapazitäten (Windenergie) bzw. der angenommenen zukünftigen Zahl an produzierten Pkw (Automobilindustrie).

Aus Vereinfachungsgründen wurde nur der Stahlbedarf für die Pkw-Produktion und nicht für die Fahrzeugproduktion insgesamt abgeschätzt. Weitergehende Erläuterungen zur Vorgehensweise bei der Berechnung sind in den jeweiligen Einzelabschnitten zu finden. Mögliche Auswirkungen von Preissteigerungen bei (grünem) Stahl wurden qualitativ beleuchtet, d.h. ohne quantifizierte Beschäftigungseffekte abzuleiten.

3. Stahlindustrie

3.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation

3.1.1. Die Branche im Überblick

Als einer der größten Stahlproduzenten der Welt spielt Deutschland eine wichtige Rolle auf dem globalen Stahlmarkt (Worldsteel Association 2014-2023). Innerhalb Deutschlands hat der Stahlsektor eine herausragende Bedeutung für die Wirtschaft, auch da der Stahlindustrie eine bedeutsame strategische Rolle als Vorleistungsindustrie zukommt.

Schlüsselbranchen für die deutsche Wirtschaft wie die Metallerzeugung, der Maschinenbau und die Automobilindustrie nutzen jährlich Stahl im Wert von etwa 12 Mrd. Euro. Diese stahlintensiven Branchen sind von großer Bedeutung für die deutsche Industrie, da sie 67% der Bruttowertschöpfung erwirtschaften und mehr als 60% des Produktionswertes im verarbeitenden Gewerbe ausmachen. Die Stahlindustrie spielt zudem eine wichtige Rolle als Technologiegeber und ist eng in die Wissensnetze der deutschen Industrie eingebunden (IW Consult GmbH 2017).

Die Stahlindustrie ist durch hochwertige Arbeitsplätze gekennzeichnet und trägt als Industrie, die am Anfang zahlreicher Wertschöpfungsketten steht, zur Stärkung des Exports bei. Sie ist eng mit anderen Wirtschaftszweigen verbunden und spielt eine wesentliche Rolle in der Umsetzung von Infrastrukturprojekten (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2022a, 2022b).

Die Stahlindustrie in Deutschland kann vereinfacht in zwei Kategorien unterteilt werden: die Primärstahl- und die Sekundärstahlindustrie. Die Sekundärstahlindustrie, die sogenannte Elektroroute (Elektrostahl), konzentriert sich auf das Recycling und die Wiederverwertung von Stahlprodukten durch das Einschmelzen in Elektroöfen, um neue Produkte herzustellen. Dieser Prozess kann bei Nutzung von grünem Strom (und möglicherweise partieller Nutzung von grünem Wasserstoff) vollständig klimaneutral erfolgen. Ein wesentliches Hemmnis für den Ausbau der Sekundärstahlindustrie ist allerdings die nicht ausreichende Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Schrott, so dass die Primärstahlindustrie auch in Zukunft eine bedeutsame Rolle einnehmen wird.

In der Primärstahlindustrie, der sogenannten Hochofenroute, die einen Anteil von etwa 70% an der Stahlproduktion in Deutschland ausmacht, wird Stahl (Oxygenstahl) in Hochöfen aus Rohstoffen wie Eisen- und Eisenerz sowie Kohle hergestellt. Letztere wird zunächst in der Kokerei durch Hitze bearbeitet, um flüchtige Bestandteile (wie bspw. Rohgas) freizusetzen, es entsteht das im späteren Produktionsprozess genutzte Reduktionsmittel Koks. Das Eisenerz wird in Sinteranlagen aufbereitet, da größere Verbundstücke für ausreichend Hohlräume zwischen den Rohstoffen im Hochofen benötigt werden (Enargus 2022).

Im weiteren Verfahren wird das gesinterte Eisenerz unter Hinzugabe von Koks und weiteren Chemikalien im Hochofen zunächst zu flüssigem Roheisen verarbeitet. Dieses wird in einem zweiten Verfahrensschritt unter Zugabe von Sauerstoff und Stahlschrott im Konverter zu Rohstahl weiterverarbeitet. Die Hochofenroute zeichnet sich durch eine kostengünstige Produktion und qualitativ hochwertige Produkte aus. Allerdings gehen mit der Verwendung von Koks als Reduktionsmittel Treibhausgasemissionen einher.

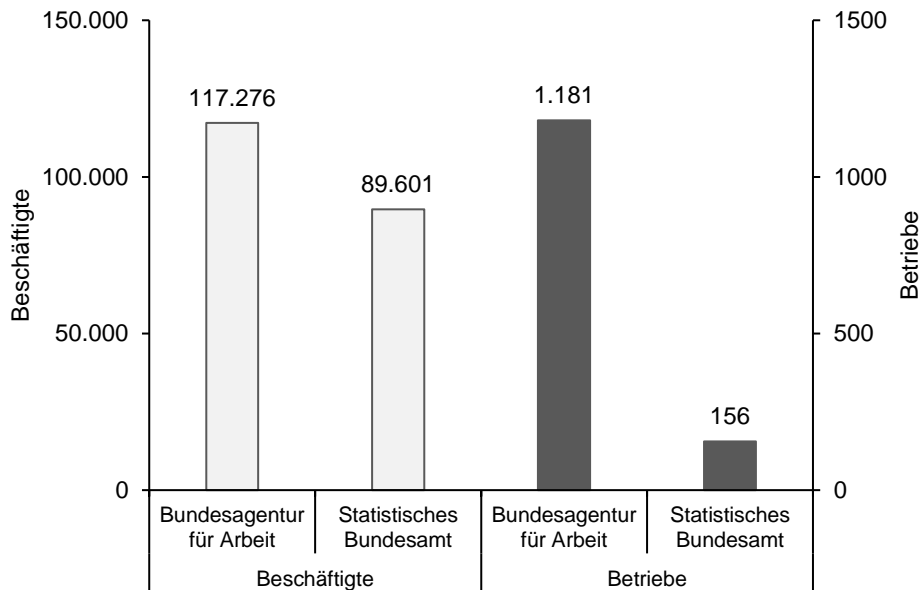
3.1.2. Statistische Abgrenzung

Die Wirtschaftsvereinigung Stahl klassifiziert die Stahlindustrie entlang der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes unter den Wirtschaftszeigen „Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegerungen“ (WZ 24.1) sowie „Herstellung von Stahlrohren u. Rohrstücken aus Stahl“ (WZ 24.2). Eine Abgrenzung zwischen der Primär- und Sekundärstahlindustrie erfolgt in der amtlichen Statistik hingegen nicht.

Es sei darauf hingewiesen, dass in diesem Abschnitt sowohl Daten des Statistischen Bundesamtes (insbesondere Umsatz und Anzahl der Betriebe) als auch Daten der Bundesagentur für Arbeit im Hinblick auf die Beschäftigung verwendet werden. Der wesentliche Unterschied zwischen den Datensätzen besteht darin, dass die Daten des Statistischen Bundesamtes lediglich Betriebe mit 50 oder mehr Beschäftigten erfassen. Die Daten der Bundesagentur weisen hingegen alle Betriebe mit mindestens einem Beschäftigten aus.

In Abbildung 8 wird der Unterschied für die aggregierten Wirtschaftszweige 24.1 und 24.2 am Beispiel der Anzahl der Beschäftigten und der Betriebe im Jahr 2022 veranschaulicht. In Summe ergibt sich eine Differenz von knapp 28.000 Beschäftigten. Diese verteilen sich auf rund 1.000 Betriebe, die zusätzlich im Datensatz der Bundesagentur für Arbeit erfasst werden (im Durchschnitt Betriebe mit rund 27 Beschäftigten).

Abbildung 8: Gegenüberstellung der Anzahl der Beschäftigten und der Betriebe der Wirtschaftszweige 24.1 und 24.2 nach Abgrenzung der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamtes 2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur, Beschäftigungsstatistik, Stichtag 30.06.; Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, August 2023
Hinweis: WZ 24.1: Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegerungen;
WZ 24.2: Herstellung von Stahlrohren u. Rohrstücken aus Stahl

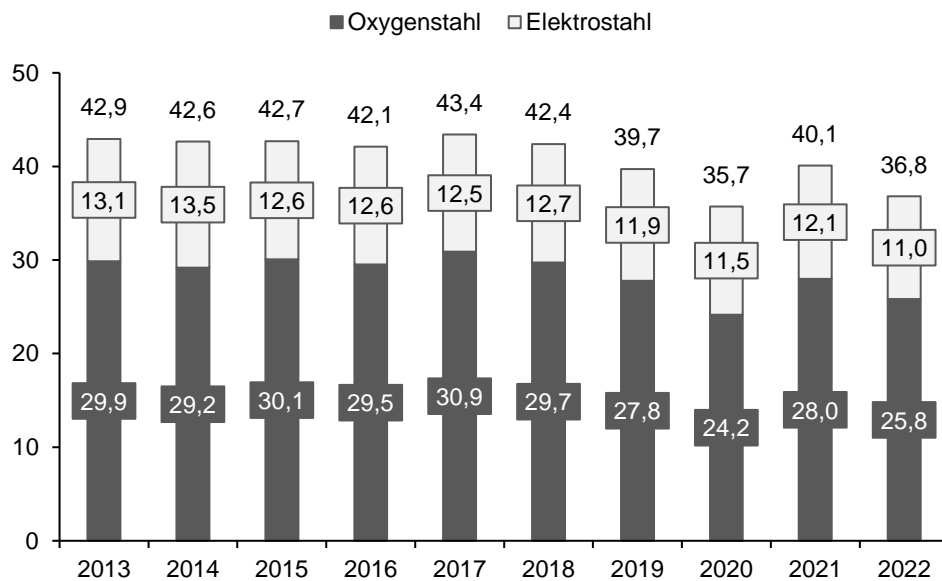
3.1.3. Umsatz, Produktion und Betriebe

In den vergangenen zehn Jahren ist der prozentuale Anteil an der Produktionsmenge der Primärstahlindustrie (Oxygenstahl) und Sekundärstahlindustrie (Elektrostahl) konstant geblieben (Abbildung 9). Er lag im gesamten Zeitraum bei rund 70% Primär- und 30% Sekundärstahl. Zwischen 2013 und 2018 lag die jährliche Produktionsmenge bei durchschnittlich 42,7 Mio. Tonnen mit nur geringen Abweichungen im Vergleich der Jahre.

Seit 2019 sind hingegen Schwankungen festzustellen, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind. So ist der Rückgang auf 39,7 Mio. Tonnen im Jahr 2019 u.a. bedingt durch Faktoren wie den Handelskonflikt zwischen den USA und China. Lockdowns in Folge der COVID-19-Pandemie und globale Lieferkettenengpässe hatten insbesondere 2020 erheblich negativen Einfluss auf die Stahlproduktion. Im Jahr 2021 zeigte die Rohstahlproduktion mit 40,1 Mio. Tonnen (auch geprägt durch Nachholeffekte) eine Erholungstendenz, während 2022 stark vom Krieg in der Ukraine beeinflusst war.

Nach konservativer Einschätzung kann als Faustformel festgehalten werden, dass „in normalen Jahren“ rund 40 Mio. Tonnen Stahl in Deutschland produziert werden, davon rund 28 Mio. Tonnen Primär- und 12 Mio. Tonnen Sekundärstahl.

Abbildung 9: Rohstahlproduktion in Deutschland nach Produktionsverfahren 2013-2022 (in Mio. Tonnen)



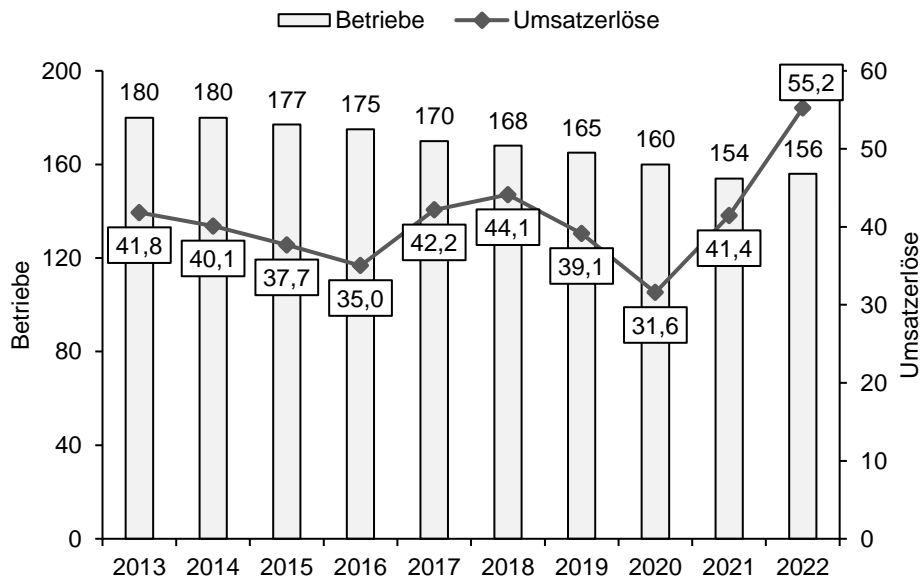
Quelle: World Steel Association (2014-2023)

Abbildung 10 stellt die Entwicklung der Betriebe und Umsatzerlöse für die Stahlindustrie in Deutschland, aggregiert für die Wirtschaftszweige 24.1 („Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen“) und 24.2 („Herstellung von Stahlrohren u. Rohrstücken aus Stahl“), dar.

Bei der Entwicklung der Betriebe zeigt sich ein anderes Bild als bei der zuvor dargestellten Entwicklung der Produktionsmenge. So ist von 2014 bis 2021 jeweils ein Rückgang der Anzahl der Betriebe im Vergleich zum Vorjahr festzustellen. Ein Anstieg erfolgt im gesamten Betrachtungszeitraum lediglich im Jahr 2022.

Die Umsatzerlöse unterlagen vor allem preisbedingten Schwankungen. Im Jahr 2020 wurden mit 31,6 Mrd. Euro die geringsten Umsatzerlöse im dargestellten Zeitraum erzielt. In diesem Jahr wurde mit 35,7 Mio. Tonnen aber auch weitaus weniger produziert als in den vorangegangenen Jahren. Auffällig ist insbesondere der erhebliche preisbedingte Anstieg im Jahr 2022. So wurden im Vergleich zu 2020 bei annähernd gleicher Produktionsmenge rund 75% höhere Umsatzerlöse erzielt.

Abbildung 10: Anzahl der Betriebe und Umsatzerlöse der Stahlindustrie in Deutschland 2013-2022 (in Mrd. €)



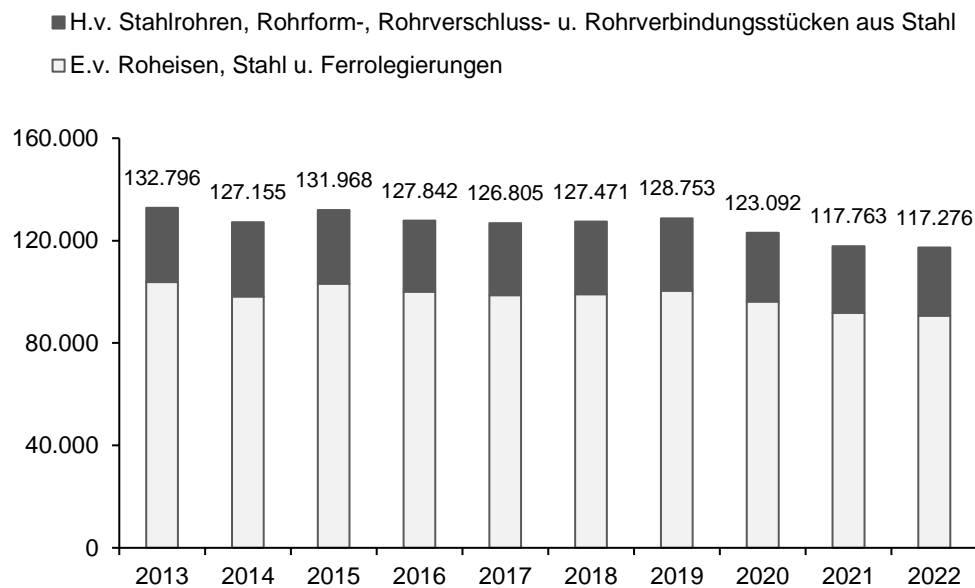
Quelle: Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, August 2023
Hinweis: Betriebe mit 50 und mehr tätigen Personen

3.1.4. Beschäftigung

Nach Angaben der Bundesagentur für Arbeit waren zwischen 2013 und 2019 im Durchschnitt 129.000 Menschen in der Stahlindustrie beschäftigt (Abbildung 11). Auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes bzw. der Wirtschaftsvereinigung Stahl waren es rund 89.000 Menschen. In diesem Zeitraum kam es nur zu geringfügigen Schwankungen bei der Anzahl der Beschäftigten.

Ebenso hat sich die Verteilung der Beschäftigten auf die beiden Wirtschaftszweige kaum verändert. 78% der Beschäftigten arbeiten im Bereich der Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen und 22% in der Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl.

Abbildung 11: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie 2013-2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.

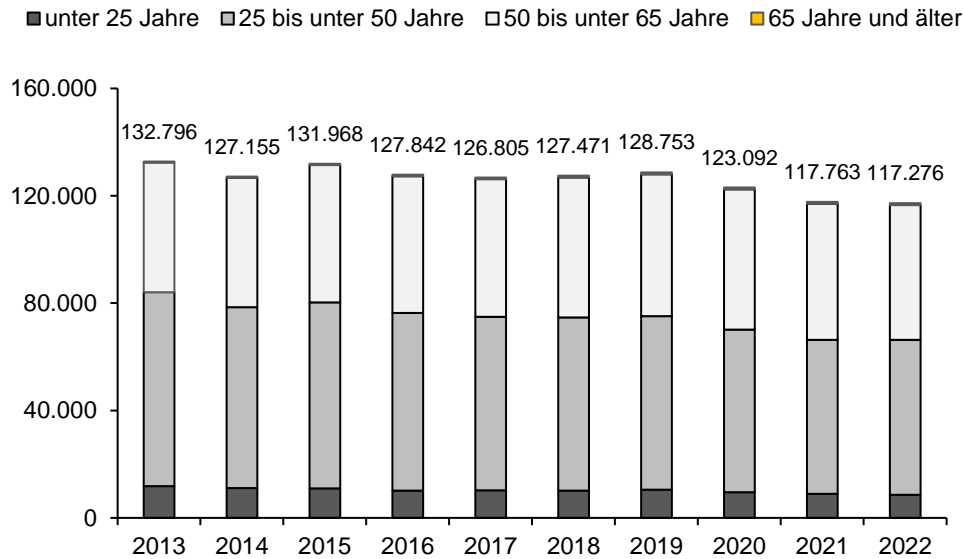
Eine deutliche Abnahme der Beschäftigung ist in den Jahren 2020 und 2021 festzustellen, so dass 2022 im Vergleich zu 2019 9% weniger Menschen in der Stahlindustrie beschäftigt waren; im Vergleich zu 2013 sind es sogar 12% weniger. Wesentlicher Treiber dieser Entwicklung war die Entwicklung im Wirtschaftszweig der Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen, in dem es im Vergleich zu 2019 zu einer Beschäftigungsabnahme in Höhe von 10% (rund 9.700 Beschäftigte) kam. Mit einem Rückgang von 6% (rund 1.700 Beschäftigte) war die Entwicklung im Wirtschaftszweig Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl ebenfalls rückläufig.

Abbildung 12 zeigt die Verschiebung der Altersstruktur der Beschäftigten in der Stahlindustrie. Mit einem Anteil von 49% 2022 ist die Altersgruppe „25 bis unter 50 Jahre“ in der Stahlindustrie weiterhin diejenige mit den meisten Beschäftigten, allerdings waren es 2013 noch 55%. Ursächlich für diese Entwicklung ist der deutliche Anstieg von Beschäftigten im Alter von 50 Jahren oder älter. Während diese Altersgruppe im Jahr 2013 noch einen Anteil von 37% an der Gesamtbeschäftigung der Stahlindustrie ausgemacht hat, waren es im Jahr 2022 bereits 43%.

Obwohl die Gesamtbeschäftigung von 2013 bis 2022 um 10% zurückgegangen ist, ist diese Altersgruppe relativ um 6% und absolut um rund 3.400 Beschäftigte gestiegen. Folglich sind zunehmend weniger junge Menschen unter 25 Jahren in der Stahlindustrie beschäftigt. Im Jahr 2022 umfasste diese Altersgruppe mit rund 9.800 Beschäftigten 25% weniger Personen als

noch im Jahr 2013 (rund 13.000 Beschäftigte). Die Zahl der Auszubildenden in den Wirtschaftszeigen „Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen“ (WZ 24.1) und „Herstellung von Stahlrohren u. Rohrstücken aus Stahl“ (WZ 24.2) lag im Jahr 2022 nach Angaben der Bundesagentur für Arbeit bei ca. 4.300 – das sind mehr als 1.000 Auszubildende weniger als 2013.

Abbildung 12: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie nach Altersgruppen 2013-2022

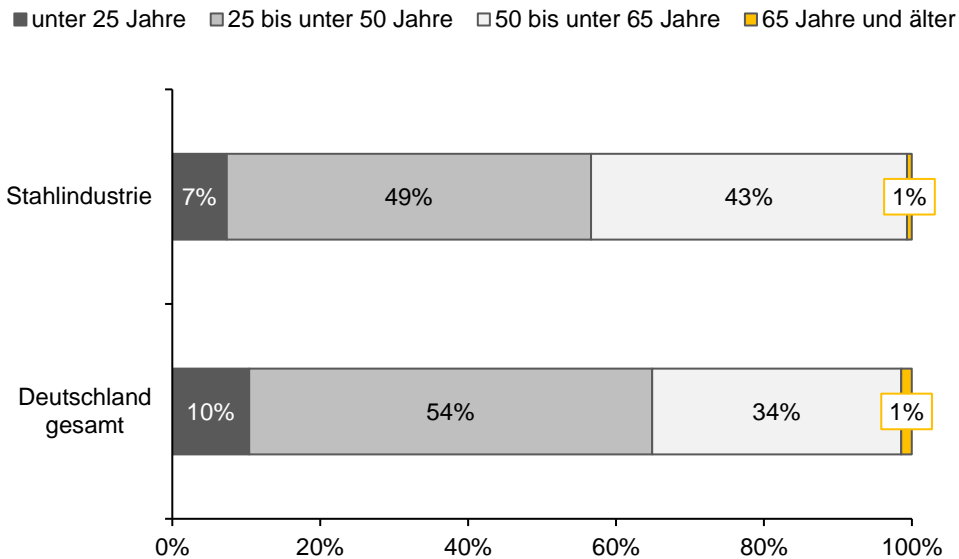


Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.

Um die Daten besser einordnen zu können, wird die Altersstruktur der Beschäftigten in der Stahlindustrie der Altersverteilung der Gesamtbeschäftigung in Deutschland für das Jahr 2022 gegenübergestellt (Abbildung 13). Der Vergleich zeigt, dass in der Stahlindustrie anteilig weniger junge Menschen beschäftigt sind (7% im Vergleich zu 10%).

Der größte relative Unterschied ist in der Altersgruppe von 50 bis unter 65 Jahren festzustellen. Während diese Altersgruppe in der Stahlindustrie 43% der Beschäftigung ausmacht, sind es unter allen Beschäftigten in Deutschland mit 34% deutlich weniger. Danach ist die Stahlindustrie von einer signifikant älteren Belegschaftsstruktur bei gleichzeitig sinkendem Nachwuchsanteil geprägt.

Abbildung 13: Altersstruktur der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie im Vergleich zur Altersstruktur aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland 2022 (Anteile in %)

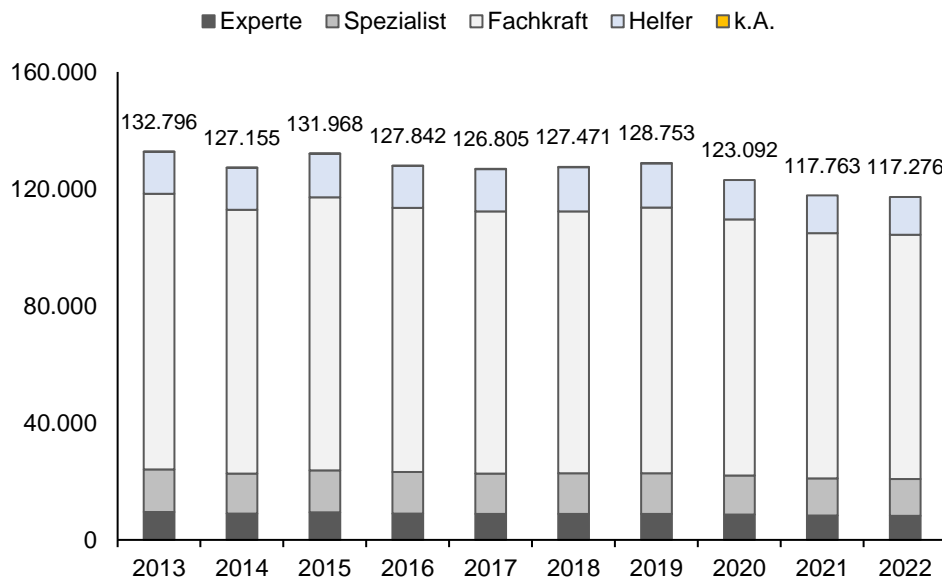


Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.

3.1.5. Fachkräftesituation

Die Beschäftigung in der Stahlindustrie nach Anforderungsniveau (Abbildung 14) hat sich in den vergangenen 10 Jahren kaum verändert. Wie schon im Jahr 2013 waren im Jahr 2022 71% der Beschäftigten als Fachkräfte klassifiziert. Weitere Beschäftigte arbeiten als Experten (7%), Spezialisten (11%) und Helfer (11%).

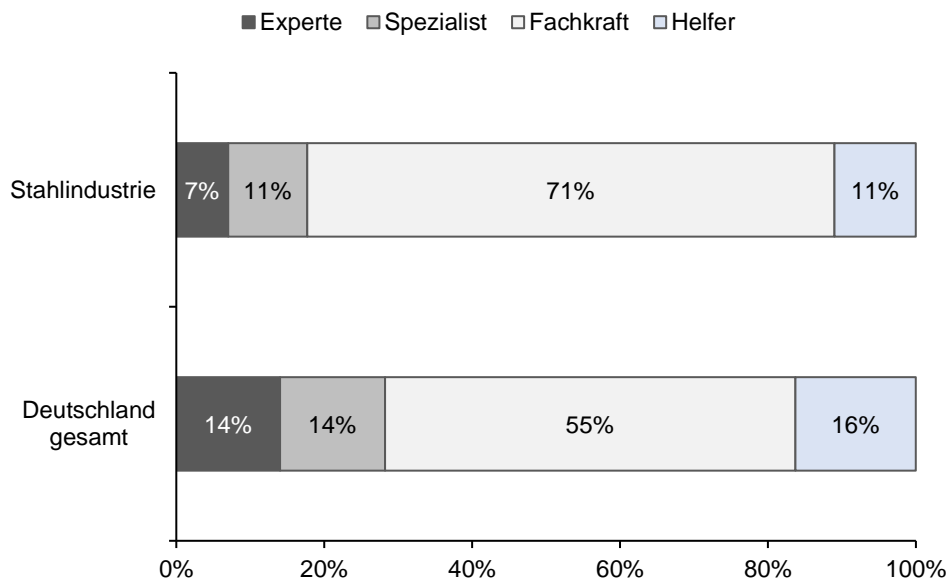
Abbildung 14: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Anforderungsniveau 2013-2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.

Vergleicht man das Anforderungsniveau der Beschäftigten der Stahlindustrie mit dem Anforderungsprofil aller Beschäftigten in Deutschland, wird deutlich, dass der Fachkräfteanteil der Stahlindustrie mit 71% weitaus höher ist als der Fachkräfteanteil in Deutschland insgesamt, der im Durchschnitt bei 51% liegt (Abbildung 15). Weiterhin ist der verhältnismäßig geringe Anteil an Spezialisten und Experten in der Stahlindustrie hervorzuheben (in Summe 18% in der Stahlindustrie vs. 28% in Deutschland insgesamt).

Abbildung 15: Anforderungsniveau der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stahlindustrie im Vergleich zum Anforderungsniveau aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland 2022 (Anteile in %)



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Stahlindustrie auch durch vielfältige geopolitische und konjunkturelle Einflüsse in den vergangenen Jahren Einbußen in der jährlichen Rohstahlproduktion zu verzeichnen hatte. Wesentliche Veränderungen im Hinblick auf die Beschäftigung sind mit einem Rückgang von knapp 9% im Zeitraum zwischen 2022 zu 2019 vor allem in den Jahren 2020 und 2021 festzustellen.

Strukturell hat sich die Beschäftigung entlang der Wirtschaftszweige und des Anforderungsniveaus im vergangenen Jahrzehnt nicht verändert. Hervorzuheben sind die im bundesweiten Schnitt ältere Belegschaft der Stahlindustrie, der absolut und prozentual gesunkene Anteil von jungen Menschen sowie der überproportionale Anteil von Fachkräften in der Stahlindustrie.

3.2. Treibhausgasemissionen, Technologiewechsel sowie regulatorische Rahmenbedingungen

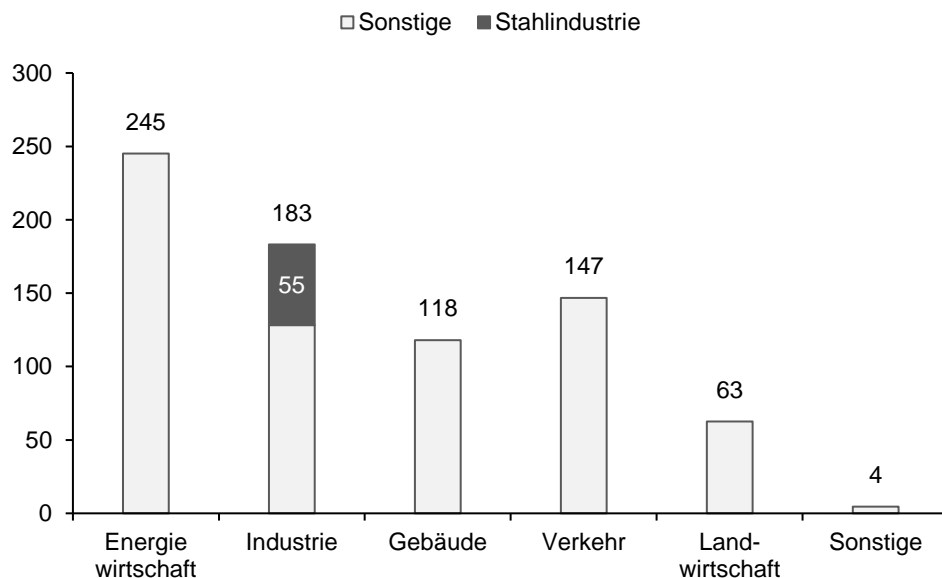
3.2.1. Treibhausgasemissionen

Mit einem Anteil von 30% an den Treibhausgasemissionen im Industriesektor und knapp 8% an den gesamten im Jahr 2020 verursachten Treibhausgasemissionen in Deutschland ist die Stahlindustrie ein bedeutender Emittent. Die Emissionen beliefen sich im Jahr 2020 auf 55 Mio. Tonnen CO₂ (Abbildung 16). Davon sind wiederum über 90% der Primärstahlindustrie zu-

zuordnen (BMWi 2019). Im Gegensatz zur Sekundärstahlindustrie sind dies, durch Nutzung von Koks als Reduktionsmittel, vor allem direkte Emissionen („Scope 1“).

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurde das etablierte Verfahren für die Primärstahlerzeugung („Hochofen-Konverter-Route“ oder „Hochofenroute“) fortlaufend optimiert, so dass nunmehr weitestgehend prozessbedingte Emissionen verbleiben. Zur Erreichung nationaler und internationaler Klimaschutzvorgaben ist ein Technologiewechsel zwingend erforderlich.

Abbildung 16: Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland 2020 (in Mio. Tonnen CO₂)



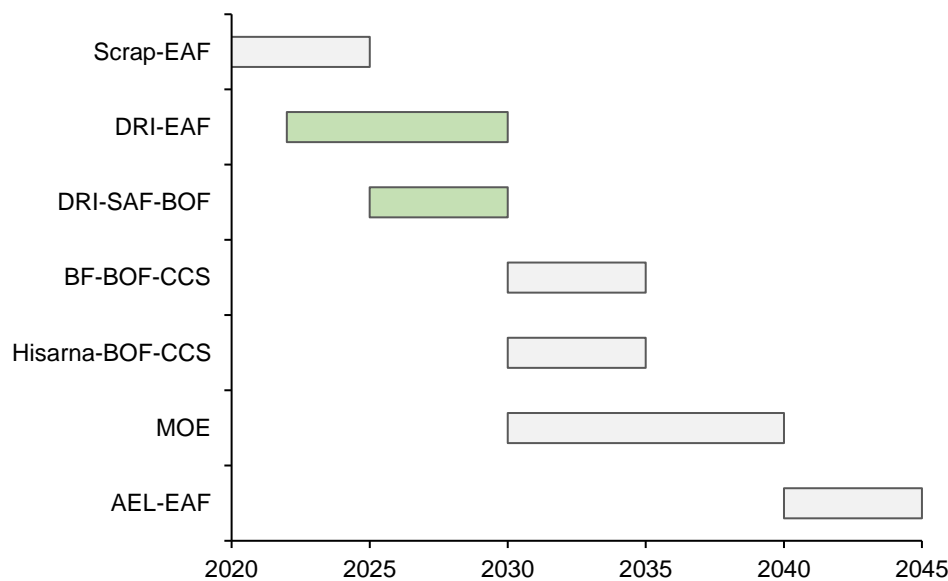
Quelle: Umweltbundesamt (2023b), Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022a)

3.2.2. Technologiewechsel

Für den Technologiewechsel kommen nach heutigem Stand der Technik insbesondere zwei „technologisch nahe beieinanderliegende Optionen“ in Frage: Die wasserstoff-/erdgasbasierte Direktreduktion mit Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen (DRI-EAF, bspw. Salzgitter AG) und die wasserstoff-/erdgasbasierte Direktreduktion mit Einschmelzen im Schmelz-Reduktionsofen (DRI-SAF-BOF, bspw. thyssenkrupp AG).

Eine weitere, bereits heute verfügbare und potenziell emissionsfreie Option ist die Sekundärstahlproduktion durch Einschmelzen von Schrott im Elektrolichtbogenofen (Scrap-EAF; Abbildung 17). Eine Verschiebung von der Primärstahlindustrie hin zu der Sekundärstahlindustrie ist durch die nicht ausreichende Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Schrott aller Wahrscheinlichkeit nach jedoch nur in begrenztem Ausmaß möglich.

Abbildung 17: Prognostizierte Marktreife verschiedener Stahlerzeugungstechnologien 2020-2045



Quelle: Roland Berger (2020a)

Die sonstigen (nachrichtlich) aufgeführten Technologien sind hingegen erst in den kommenden Jahren und Jahrzehnten „potenzielle marktreife Optionen“. Insbesondere die Kombination von Hochöfen mit „Carbon Capture and Storage“-Systemen (BF-BOF-CCS sowie Hisarna-BOF-CCS) stieß in der Vergangenheit oftmals eine kritische Debatte an, da CO₂-Emissionen nicht vermieden, sondern abgefangen und gespeichert oder weiterverarbeitet werden. Insgesamt ist somit der Transformationspfad im Upstream-Bereich klar vorgezeichnet.

Die hier dargestellten Technologien betreffen die sogenannte „Upstream“-Produktion von Stahl, die im Produktionsprozess mit schätzungsweise 93% den weitaus größten Anteil an den CO₂-Emissionen der Primärstahlindustrie hat (BMW 2019). Darüber hinaus entstehen weitere Emissionen durch „Downstream“-Aktivitäten wie bspw. im Warmwalzprozess.

Diese Aktivitäten sind im Vergleich zur Rohstahlproduktion mit wesentlich geringeren CO₂-Emissionen verbunden, langfristig müssen aber auch diese Prozesse (wie bspw. erdgasbasierte Brenner) dekarbonisiert werden. Der technologische Pfad ist an dieser Stelle noch nicht vollständig ersichtlich. Grundsätzlich kann Wasserstoff als Ersatzmittel für Erdgas dienen, allerdings ist noch nicht absehbar, ob dies aus metallurgischer Sicht vollständig möglich ist. Alternative Technologien ergeben sich aus heutiger Sicht möglicherweise aus dem Einsatz von synthetischem Gas oder Biogas.

3.2.3. Regulatorische Rahmenbedingungen

Der Weg zur Dekarbonisierung der deutschen und europäischen Wirtschaft wurde in den vergangenen Jahren politisch eingeleitet. Den Rahmen bildet das im Oktober 2016 von der EU offiziell ratifizierte „Übereinkommen von Paris“ mit dem Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius und möglichst unter 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu beschränken.

European Green Deal

Die Europäische Union konkretisierte im Rahmen des 2019 verabschiedeten Klimaabkommens („Green Deal“) die Zielvorgaben für die EU. Ziel ist es, die Netto-Treibhausgasemissionen innerhalb der EU bis 2050 auf null zu senken. Als Zwischenziel wird bis 2030 eine Reduktion von 55% im Vergleich zum Referenzjahr 1990 angestrebt.

Innerhalb Deutschlands bildet das Bundes-Klimaschutzgesetz den Rahmen für die klimapolitischen Bestrebungen Deutschlands mit, im Vergleich zu den Zielsetzungen der EU, ambitionierteren Zielen. So sollen bis 2030 65% der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 vermieden und (Netto-)Klimaneutralität im Jahr 2045 erreicht werden.

Als größter Emittent im Industriesektor besteht in der Stahlindustrie ein großer Hebel zur Erreichung der Klimaziele. Das Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU-ETS) stellt den wesentlichen ökonomischen Transformationsanreiz für die Stahlindustrie dar. Dieses System wird zukünftig durch den sogenannten „Carbon Border Adjustment Mechanism“ (CBAM) ergänzt.

Wesentliche Voraussetzung ist, dass die freien Zuteilungen von Emissionszertifikaten für die Primärstahlunternehmen von 2026 bis 2034 im Rahmen eines „Phase-Outs“ sukzessive und letztlich vollständig abschmelzen werden. Im Gegenzug müssen EU-Stahl-Importeure CBAM-Zertifikate kaufen, die dem CO₂-Preis entsprechen, der gezahlt worden wäre, wenn der Stahl oder bestimmte Warengruppen³ nach den EU-Regeln für die Bepreisung von CO₂-Emissionen hergestellt worden wären.

Temporär gilt diese Regelung also ausschließlich für den Anteil an den Emissionen, für den auch im Rahmen des EU-ETS keine kostenlosen Zertifikate vergeben werden. Ein theoretisch vollständig funktionsfähiger CBAM würde zumindest für den Binnenmarkt zu einem „Level-Playing Field“ führen und könnte somit maßgeblich zur Wettbewerbsfähigkeit von grünem Stahl beitragen.

³ Eisen, Stahl, Zement, Aluminium, Elektrizität, Düngemittel, Wasserstoff sowie einige vor- und nachgelagerte Produkte, insbesondere Eisen- und Stahlprodukte (IHK Rhein-Neckar 2023).

Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminium

Die EU befindet sich in Verhandlungen mit den USA über ein „Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminium“ (GSSA), dessen Regelungsinhalte auch als „Klimaklub“ bezeichnet werden könnten. Dieses setzt auf der im Rahmen der Handelsstreitigkeit im Jahr 2021 über Sonderzölle von Stahl und Aluminium getroffenen Vereinbarung auf, dass Verhandlungen über zukünftige Regelungen für den Handel im Stahl- und Aluminiumsektor geführt werden, die sowohl der globalen nicht marktbestimmten Überkapazität als auch der Kohlenstoffintensität dieser Industrien Rechnung tragen (S&P Global 2023).

Einheitliche Definition von grünem Stahl

Die Zusammenarbeit zwischen den USA und der EU zielt darauf ab, den fairen Handel von Stahl und Aluminium zu fördern, der mit geringeren CO₂-Emissionen und im Einklang mit marktorientierten Politiken hergestellt wird. Voraussetzung für den „Beitritt zum Klimaklub“ wäre, dass keine Überkapazitäten und keine zusätzlichen Kapazitäten für grauen Stahl errichtet werden und sowie eine einheitliche Definition von grünem Stahl.

Da sich das Endprodukt Stahl einzig im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen während des Produktionsprozesses unterscheidet, müssen aus wirtschaftlicher Sicht auch für die Abnehmer und letztlich für Verbraucher Anreize geschaffen werden, einen höheren Preis zu bezahlen („grüne Leitmärkte“). Eine einheitliche Definition von grünem Stahl (bspw. ein entsprechendes „Labeling“) ist also eine essenzielle Voraussetzung für die Nachfragestimulierung. In Deutschland wurde von der Wirtschaftsvereinigung Stahl ein Konzept ausgearbeitet, das auch vom BMWK akzeptiert wurde (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2022c).

Auf europäischer Ebene gibt es hingegen noch keine einheitliche Definition für grünen Stahl. Dies ist ein erheblicher Unsicherheitsfaktor, da die Ausgestaltung der Definition von grünem Stahl wesentlichen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Stahlindustrie haben kann.

Wechsel zu wasserstoffbasierter Direktreduktion

Grundlage für die Produktion von grünem Stahl ist der technologische Wechsel von der Hochofenroute hin zu wasserstoffbasierter Direktreduktion, der mit geschätzten Capex von 1,0 Mrd. Euro pro 1,0 Mio. Tonnen Primärstahl verbunden ist (Roland Berger 2020a). Vor dem Hintergrund der Ertragskraft der Primärstahlunternehmen in Deutschland sind staatliche Anschubfinanzierungen erforderlich, diese sind – wie bei der Salzgitter AG – teilweise bereits bewilligt (Salzgitter AG 2023a).

Relativierend wirkt sich eine Betrachtung über die Lebensdauer der Anlagen aus. Bei einer Produktionsmenge von 1 Mio. Tonnen pro Jahr, einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren und einem Förderanteil von 60% ergäben

sich bspw. „geförderte Abschreibungen“ in Höhe von 30 Euro pro Tonne. Bei der Capex-Förderung ist somit der Finanzierungs- und nicht der GuV-Effekt entscheidend.

Die Gesamtkosten (ohne Capex) für die Primärstahlproduktion mittels wasserstoffbasierter Direktreduktion lagen nach einer Schätzung von Agora Energiewende (2021a) für das Jahr 2021 bei 650 Euro pro Tonne und damit 75% höher als bei der konventionellen Hochofenroute. Die weitaus größere „Aufwandsdifferenz pro Tonne“ ergibt sich demnach nicht aus den notwendigen Investitionskosten für die Direktreduktionstechnologie, sondern aus den laufenden Betriebskosten (Opex) der Anlagen, die zukünftig wiederum zu einem wesentlichen Anteil auf Energiekosten zurückzuführen sein werden.

Geopolitische Einflussfaktoren

Die parallel stattfindende Energiewende in Deutschland (bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Atomenergie) und weitere geopolitische Einflussfaktoren (wie der Krieg in der Ukraine) haben zu einem drastischen Anstieg des Industriestrompreises in Deutschland geführt. Auch vor diesem Hintergrund erscheint eine (temporäre) Opex-Förderung unumgänglich. Eine detaillierte Betrachtung hierzu erfolgt weiter unten.

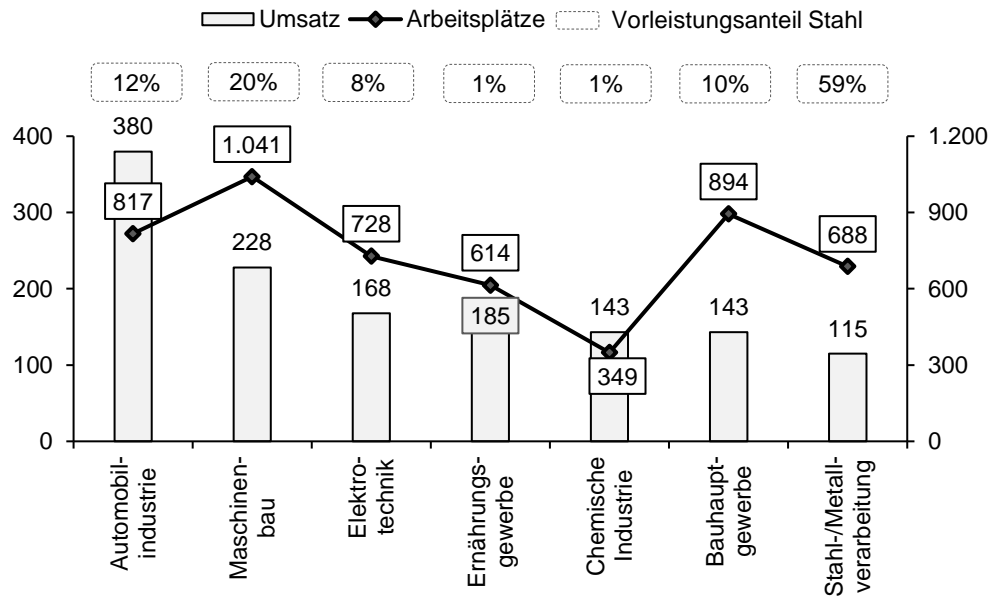
Da sich in der Praxis projektbasierte Förderungen der „Finanzierungslücke“ bzw. der „Barwertlücke“ abzeichnen (BMWK 2023b), die aus finanztheoretischer Sicht sowohl Capex als auch Opex beinhalten, wird nachfolgend der übergreifende Begriff „Projektfinanzierung“ genutzt.

3.3. Volkswirtschaftliche und regionale Bedeutung der Primärstahlindustrie

Die Stahlindustrie ist mit über 117.000 direkt Beschäftigten (nach Angaben der Bundesagentur für Arbeit) eine wichtige Branche im Industriesektor. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Branche als Zulieferer geht aber weit darüber hinaus. Nach Angabe der Wirtschaftsvereinigung Stahl waren im Jahr 2020 über 5 Mio. Menschen in stahlintensiven Branchen oder bei Zulieferern bzw. Dienstleistern von Stahlunternehmen beschäftigt (Abbildung 18).

Die stahlintensiven Unternehmen mit Umsatzerlösen von über 1,3 Billionen Euro im Jahr 2021 sind direkt oder indirekt von der Stahlindustrie abhängig. Die Abhängigkeit ist aber unterschiedlich ausgeprägt. So ist der Stahlanteil an den Vorleistungen der Automobilbranche (12%), dem Maschinenbau (20%), der Elektrotechnik (8%) und dem Bauhauptgewerbe (10%) weitaus höher als im Ernährungsgewerbe und der chemischen Industrie (jeweils 1%). Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Primärstahlindustrie in den vergangenen 10 Jahren 70% der Rohstahlproduktion in Deutschland ausmachte, die übrigen 30% entfallen auf die Sekundärstahlindustrie.

Abbildung 18: Stahlintensive Branchen: Umsatz 2021 (in Mrd. €), Arbeitsplätze 2020 (in Tsd.) sowie Stahlanteil an Vorleistungen (in %)

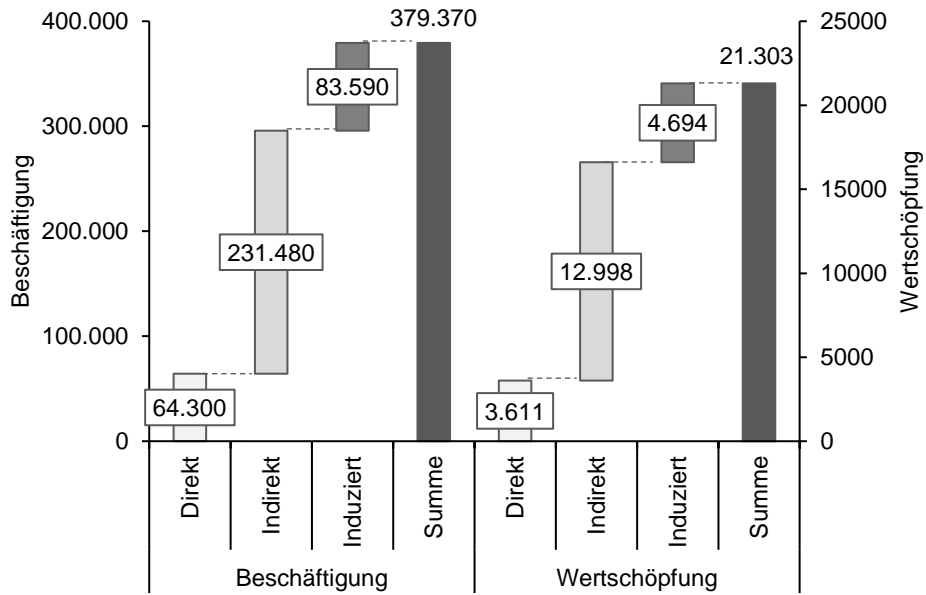


Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022a)

Präziser lässt sich die volkswirtschaftliche Bedeutung der Primärstahlindustrie über direkte, indirekte sowie induzierte Beschäftigung und Wertschöpfung quantifizieren (Abbildung 19). In Summe hängen knapp 380.000 Arbeitsplätze sowie über 21 Mrd. Euro jährlicher Wertschöpfung auf Basis von Löhnen und Gehältern direkt, indirekt (über Vorleistungen aus anderen Branchen) und induziert (über die Konsumnachfrage durch generierte Einkommen) an der Primärstahlindustrie.

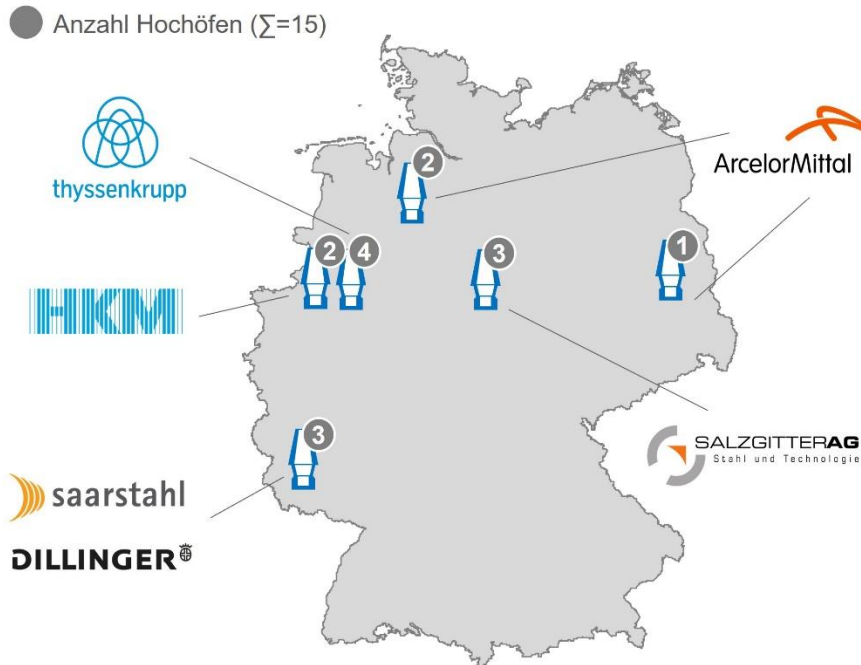
In Abbildung 20 wird die geografische Lage der 15 zu transformierenden integrierten Hüttenwerke der Primärstahlproduktion in Deutschland nach Unternehmensgruppen dargestellt. Regional verteilen sich die Standorte auf die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Saarland, Niedersachsen, Bremen und Brandenburg.

Abbildung 19: Anzahl der Beschäftigten und Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern (Mio. €) der Primärstahlindustrie



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 20: Standorte der Hochöfen für die Primärstahlerzeugung (integrierte Hüttenwerke in Deutschland)

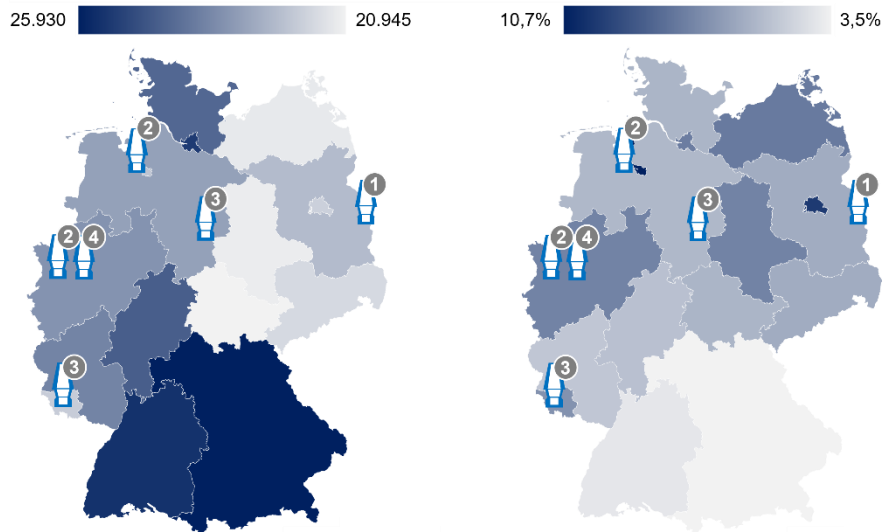


Quelle: Eigene Darstellung

Hervorzuheben ist die regionale Bedeutung der Stahlstandorte. Exemplarisch hierfür zeigt Abbildung 21 das verfügbare Einkommen privater Haushalte sowie die Arbeitslosenquoten ziviler Erwerbspersonen entlang der Bundesländer. Das durchschnittliche Einkommen von Nordrhein-Westfalen, Saarland, Niedersachsen, Bremen und Brandenburg liegt 2,4% unter dem bundesweiten Durchschnitt. Auch die Arbeitslosenquote ist in diesen Bundesländern mit durchschnittlich 7,2% höher als in Deutschland insgesamt (6,4%).

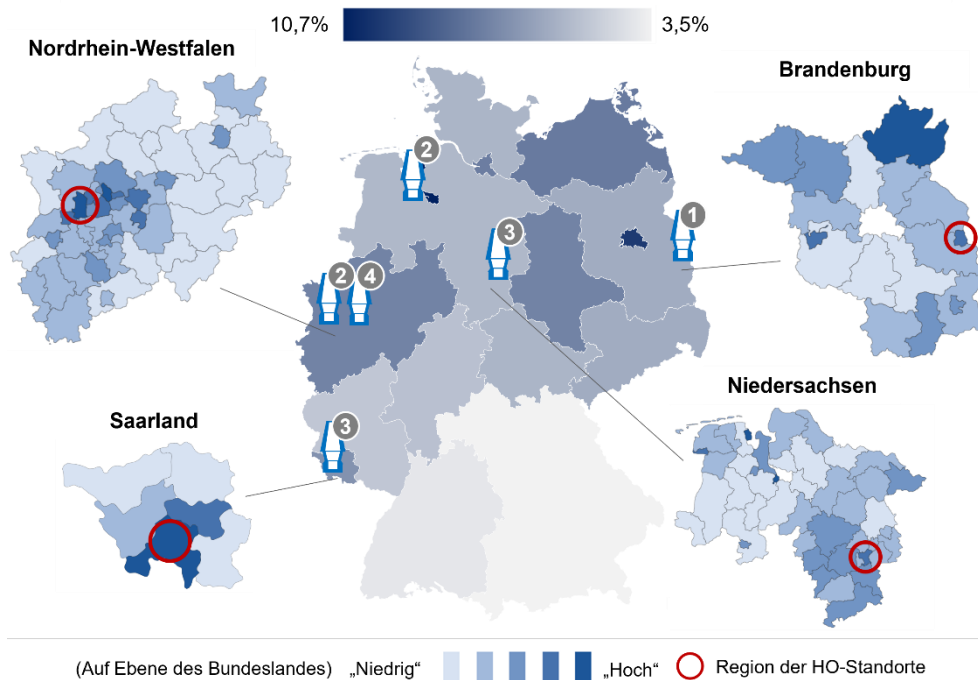
Noch deutlicher wird das Bild auf Ebene der Landkreise (Abbildung 22). Am Beispiel der Arbeitslosenquote zeigt sich, dass die Landkreise der Primärstahlstandorte von durchgängig hoher Arbeitslosigkeit geprägt sind.

Abbildung 21: Hochofenstandorte der Primärstahlindustrie sowie verfügbares Einkommen privater Haushalte (in € je Einwohner, links) und Arbeitslosenquote ziviler Erwerbspersonen (in %, rechts)



Quelle: Bundesagentur für Arbeit (2023); Stichtag jeweils 31.12.2021

Abbildung 22: Hochofenstandorte der Primärstahlindustrie sowie Arbeitslosenquote ziviler Erwerbspersonen auf regionaler Ebene (in %)



Quelle: Bundesagentur für Arbeit (2023); Arbeitslosenquote der Bundesländer: Stichtag 31.12.2021; Arbeitslosenquote auf regionaler Ebene: Stand Mai 2023

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass der Primärstahlindustrie nicht nur eine hervorgehobene Bedeutung entlang von Wertschöpfungsketten mit knapp 380.000 Beschäftigten und einer jährlichen Bruttowertschöpfung von über 21 Mrd. Euro zukommt, sie ist vor allem in strukturschwachen Regionen von essenzieller Bedeutung. Die Stahlhütten sorgen in wirtschaftlich schwachen Regionen für Beschäftigung mit gut bezahlten tariflichen Arbeitsplätzen.

Umso bedeutsamer erscheint eine erfolgreiche Transformation für den Erhalt qualitativ hochwertiger Arbeitsplätze. Aus Sicht der Unternehmen ergeben sich verschiedene Transformationsoptionen, die nachfolgend eingehender beleuchtet werden sollen.

3.4. Analyse unternehmerischer Transformationsoptionen

Erweiterte Strombedarfe für die Transformation

Die Produktion von grünem Stahl in Deutschland auf der Primärroute wird zukünftig über die wasserstoffbasierte Direktreduktion mit anschließendem Einschmelzen im EAF/SAF erfolgen. Vor allem für die Produktion von Was-

serstoff, aber auch für den Betrieb von Anlagen zur Stahlerzeugung werden erhebliche Mengen Strom aus erneuerbaren Energien benötigt.

Während die Hochofenroute durch Nutzung von Hüttengasen einen Energieüberschuss erzielt, ergeben sich transformationsbedingt erweiterbare Strombedarfe für den Betrieb von Elektrolichtbogenöfen bzw. Schmelz-Reduktionsöfen. Nach Auskunft der befragten Experten ergeben sich anhand aktueller Abschätzungen zukünftig Strombedarfe im Verhältnis von 1 zu 3 im Vergleich zum Strombedarf für die Wasserstoffelektrolyse. Anders ausgedrückt: der Strombedarf für die Primärstahlerzeugung über die wasserstoffbasierte Direktreduktionsroute entfällt zu ca. 75% auf die Wasserstoffelektrolyse und zu ca. 25% auf den Strombedarf der Hütte.

Industriestrompreis und Abnahmegarantien

Eine wettbewerbsfähige Primärstahlindustrie ist aufgrund der hohen Strombedarfe stark an den regionalen Industriestrompreis geknüpft. In Deutschland lag der Industriestrompreis 2024 auch nach Maßnahmen wie der Abschaffung der EEG-Umlage bei durchschnittlich 19 Cent/KWh und war somit fast doppelt so hoch wie in Frankreich und Schweden (11 Cent/KWh; Statista 2023a) und mehr als doppelt so hoch wie bei den großen Stahlproduzenten China und Indien (9 Cent pro kWh⁵; GlobalPetrolPrices 2023).

Vor diesem Hintergrund hat Bundeswirtschafts- und Klimaschutzminister Robert Habeck im Mai 2023 ein Arbeitspapier zum Industriestrompreis mit dem Titel „Wettbewerbsfähige Strompreise für die energieintensiven Unternehmen in Deutschland und Europa sicherstellen“ vorgelegt. In diesem heißt es:

„Um die Zwischenphase bis 2030 mit einer intakten Grundstoffindustrie und neuen Zukunftsunternehmen zu erreichen, braucht es zusätzlich einen Brückenstrompreis von 6 Cent pro Kilowattstunde [zzgl. Steuern und Umlagen für 80% des Verbrauchs] für einen klar definierten Empfängerkreis [energieintensive Industrien], der aus öffentlichen Mitteln finanziert werden muss.“ Zudem wird angestrebt, den Abschluss von Power Purchase Agreements (PPA) zwischen erneuerbaren Energieerzeugern und Industriepartnern durch Bürgschaften abzusichern, um die Risikoprämien dieser Verträge zu reduzieren (BMWK 2023c).

Von Seiten der Industrie wurde das vorgelegte Konzept kritisiert. So kommentierte Peter Adrian, Präsident der Deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK): „Ein Industriestrompreis, wie ihn das Bundeswirtschaftsministerium vorgeschlagen hat, ist ein ‚selektives Gestaltungsmoment‘. Für welche Firmen gilt es, welche Bedingungen gibt es? Es könnte wieder einen Wust von Regelwerk geben“ (DIHK 2023).

⁴ Für einen Jahresverbrauch von 20.000-70.000 MWh.

⁵ China und Indien (Stand Juli 2022)

Ein wettbewerblicher Industriestrompreis (für energieintensive Unternehmen) muss das Fundament der Transformation sein. Marktwirtschaftlich kann das nur gelingen, wenn perspektivisch durch ein ausreichendes günstiges Stromangebot niedrige Preise gewährleistet werden können. Ein subventionierter Brückenstrompreis kann nur eine temporäre, aber durchaus sinnvolle Lösung sein.

Für den Betrieb von Wasserstoffelektrolyseanlagen in Deutschland sind staatliche Garantien/Bürgschaften für PPA zu begrüßen. Eine Erweiterung des Scopes auf erneuerbare Energieerzeuger, Betreiber und Abnehmer sollte aber geprüft werden, um Investitionssicherheit zu schaffen und hohe Risikozuschläge zu vermeiden.

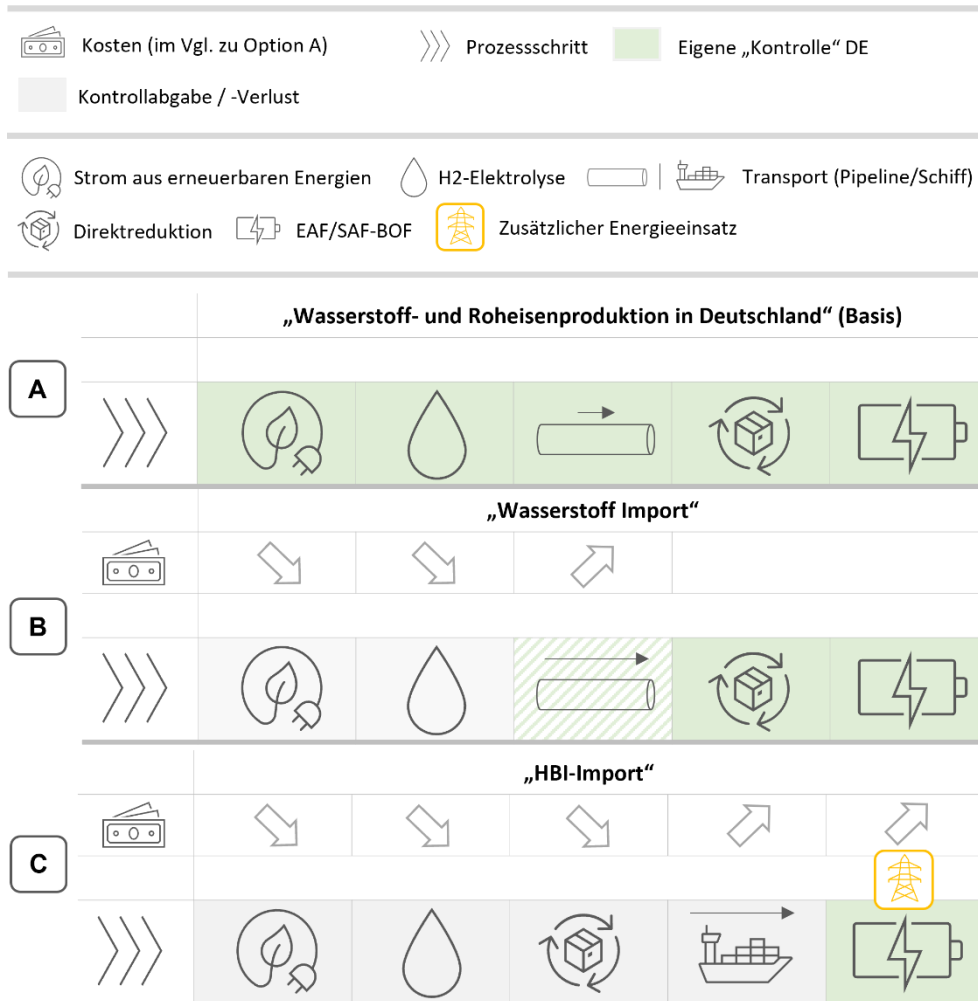
Import von Wasserstoff

Ein günstiger Industriestrompreis ist essenziell für das Entstehen eines Wasserstoffclusters in Deutschland. Ungeachtet dessen muss Deutschland zukünftig Wasserstoff importieren. So sollen gemäß Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie durch den inländischen Aufbau von 10 GW Elektrolysekapazität bis 2030 30% bis 50% des deutschen Wasserstoffbedarfs gedeckt werden, der übrige Bedarf soll importiert werden. Langfristigen internationalen Wasserstoffpartnerschaften (wie die Anfang 2023 verkündete Partnerschaft mit Norwegen) kommen also eine hohe Bedeutung zu.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich für die Primärstahlindustrie verschiedene unternehmerische Transformationsoptionen (Abbildung 23). Entlang der (vereinfachten) Wertschöpfungskette von der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien über die Wasserstoffproduktion und den Transport bis hin zur Direktreduktion mit anschließendem Einschmelzen ist der „Import von Energie“ grundsätzlich an verschiedenen Stellen denkbar:

Option A stellt den Bezug von Wasserstoff aus Deutschland bspw. durch Eigenproduktion (z.B. Inselfösung) oder Produktion von Dritten mit günstigen Produktionsstandorten dar. Dieser Weg hätte den Vorteil, unabhängig von Drittländern agieren zu können („eigene Kontrolle“, in der Abbildung grün unterlegt). In der Praxis wird Option A aufgrund des hohen Wasserstoffbedarfs der Primärstahlindustrie vermutlich in Kombination mit Option B oder C erfolgen müssen.

Abbildung 23: Unternehmerische Transformationsoptionen und indikative Einordnung von Kosten im Vergleich zur Wasserstoffproduktion in Deutschland (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung

Option B (Import von Wasserstoff) würde aus heutiger Sicht einen Kostenvorteil bei der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien mit sich bringen, sofern der Wasserstoff an entsprechenden Standorten mit günstigen Strompreisen erzeugt wird. Demgegenüber stehen höhere Transportkosten, der notwendige Aufbau einer entsprechenden (Pipeline-)Infrastruktur sowie partiell Abhängigkeiten von Drittstaaten. Ein Schifftransport von Wasserstoff (in Form von Ammoniak oder flüssig) kommt grundsätzlich auch in Frage, dürfte aber nach aktuellen Einschätzungen zumindest kurz- und mit-

telfristig für große Mengen teuer sein. Daher kommt auch der Import von Hot-Briquetted-Iron (HBI)⁶ in Frage (Option C).

Der Import von grünen Brammen wurde an dieser Stelle nicht als weitere Option aufgenommen, da dabei viele entscheidende Produktspezifikationen (u.a. Güten, Legierungen und Abmessungen) nicht mehr im unmittelbaren Einflussbereich der europäischen und deutschen Stahlhersteller liegen. Dies stellt somit keinen realistischen Entkopplungspunkt dar. Man würde wesentliche Teile von F&E-Potenzialen aus der Hand geben, hinzu kämen logistische Herausforderungen.

Kosten für Wasserstoffproduktion und -import

Die Wasserstoffkosten hängen stark von der jährlichen Betriebszeit der Direktreduktionsanlagen ab, diese wiederum von den Wegen der Stromerzeugung und der Speicherung. Schätzungen gehen davon aus, dass die Bereitstellungskosten für Wasserstoff bei Importen aus der MENA-Region (Mittlerer Osten und Nordafrika) im Jahr 2030 zu ca. 50 bis 60% aus Stromkosten bestehen (Prognos AG 2019c). Dieser Annahme liegen bereits verhältnismäßig günstige Strompreise im Bereich von 5,4 bis 7,5 Cent/kWh zugrunde.

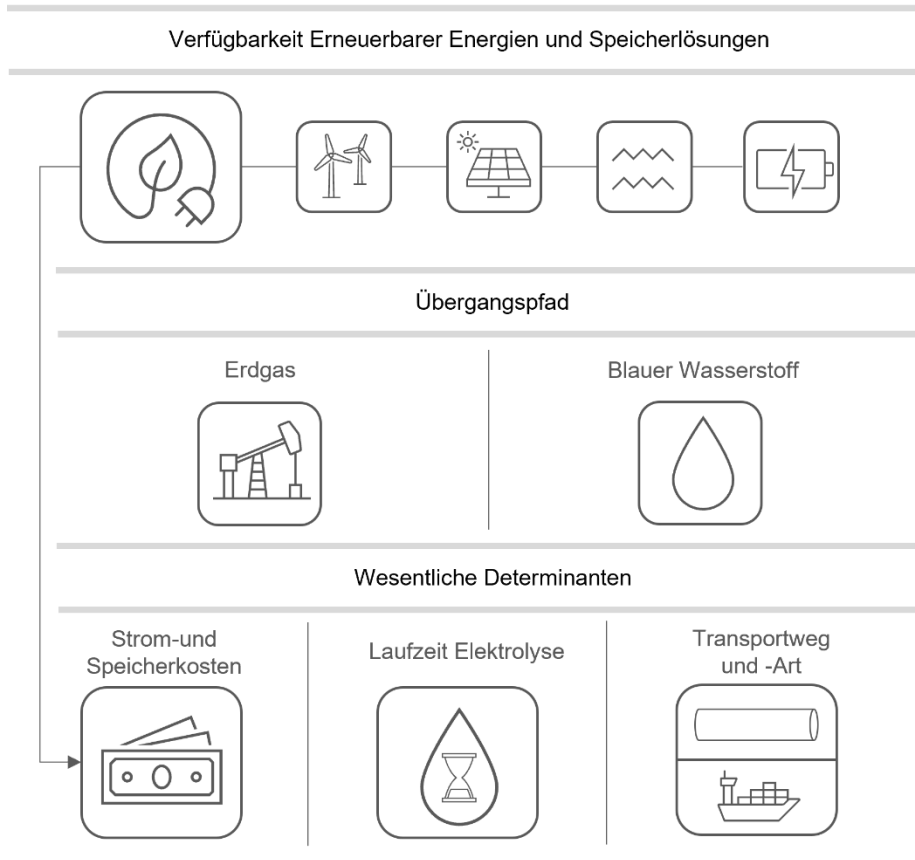
Der Kostenvergleich einer DRI-Produktion in Deutschland mit (importiertem oder in Deutschland erzeugtem) Wasserstoff im Vergleich zu HBI-Importen ist äußerst komplex. Er hängt von vielfältigen Faktoren wie der Existenz einer Pipelineinfrastruktur für Wasserstoff, der Annahme, woher, aus welchen Stromquellen und zu welchen Preisen der Wasserstoff für die DRI in Deutschland bezogen wird, sowie der Vergleichsregion für die HBI-Herstellung ab (Abbildung 24).

Für die reinen Stromerzeugungskosten kommen in guten Lagen Bandbreiten von 1,0 Cent/kWh für Photovoltaik-Anlagen in Saudi-Arabien über 3,1 Cent/kWh für Windkraft Onshore bis zu 5,4 Cent/kWh für Windkraft Offshore in Frage (Fraunhofer ISE 2021; WirtschaftsWoche 2023). Insbesondere bei Solaranlagen, aber auch bei Windkraft müssen für den Dauerbetrieb der Elektrolyseanlagen entsprechende Speicherkapazitäten vorhanden sein.

Bei Wasserstoffbezug in Deutschland müssen zusätzlich Transportkosten (im Idealfall über Pipelines) berücksichtigt werden. Weiterhin ist zu beachten, dass die Direktreduktionsanlagen nicht sofort mit grünem Wasserstoff betrieben werden, sondern zunächst mit Erdgas und dann ggf. in einem weiteren Übergangsschritt mit blauem Wasserstoff.

⁶ HBI ist eine verdichtete Form von Direktreduziertem Eisen (DRI). HBI wurde als Produkt entwickelt, um die Probleme beim Versand und der Handhabung von DRI zu überwinden. Aufgrund des Verdichtungsprozesses ist es deutlich weniger porös und daher auch weniger reaktiv als DRI.

Abbildung 24: Wesentliche Determinanten für Wasserstoffimporte (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung

Potenzielle Entwicklung des internationalen Wasserstoffmarktes

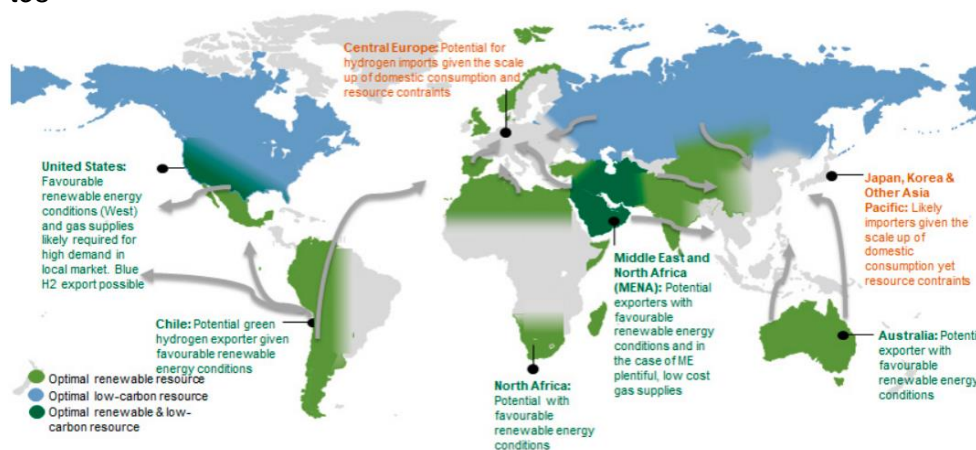
Abbildung 25 stellt eine Illustration der potenziellen Entwicklung des globalen Wasserstoff-Marktes von Goldman Sachs aus dem Jahr 2022 dar. Als Exporteur von grünem oder blauem Wasserstoff kommen Regionen in Frage, die einerseits eine hohe Verfügbarkeit von kostengünstigen erneuerbaren Energieressourcen und/oder Erdgas (in Kombination mit CCS-Technologien) aufweisen und andererseits in der Lage sind, Wasserstoff über den heimischen Bedarf hinaus zu produzieren.

Die Regionen, die diese Kriterien zu erfüllen scheinen, sind der Nahe Osten, Nordafrika, Australien sowie Chile und andere lateinamerikanische Länder. Australien, Chile und Nordafrika verfügen über umfangreiche und kostengünstige erneuerbare Energiequellen, während der Nahe Osten sowohl auf kostengünstige Solarenergie als auch auf Erdgasvorräte in Verbindung mit CCS-Technologien bauen kann.

Die USA erfüllen das erstgenannte Kriterium, allerdings ist aufgrund des hohen heimischen Bedarfs wohl nicht davon auszugehen, dass signifikante Mengen aus den USA in andere Länder exportiert werden. In Europa ergeben sich in den nördlichen Ländern durch guten Zugang zu Wasser- und

Windkraft sowie in den südlichen Regionen (insbesondere Spanien) durch guten Zugang zu Solarkraft potenzielle Exportländer.

Abbildung 25: Potenzielle Entwicklung des internationalen Wasserstoffmarktes



Quelle: Goldman Sachs (2022)

Wettbewerbsfähiger Bau und Betrieb von Direktreduktionsanlagen

Für den Bau und Betrieb von Direktreduktionsanlagen in Deutschland und damit gegen den Bezug von HBI sprechen einige qualitative Kriterien und die Möglichkeit, Risiken abzuschwächen. Resilienz und Technologieinnovationen sind hierbei aus industriepolitischer Sicht entscheidende Faktoren zugunsten einer (umfangreichen) Eigenproduktion von Wasserstoff und DRI. Weiterhin sprechen die verstärkte Ausrichtung auf eine Kreislaufwirtschaft (Schrotteinsatz in Einschmelzer oder Elektroöfen) und energetische Ressourceneffizienz sowie ökologische Aspekte (bspw. Entsorgung von Schlacke) für eine eigene DRI-Produktion.

Der Bau und Betrieb von Direktreduktionsanlagen in Deutschland, also die Transformation des gesamten Herstellungsprozesses der gesamten Primärroute (inkl. Roheisenproduktion), kann auch zukünftig bei kluger Gestaltung der Rahmenbedingungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht wettbewerbsfähig und profitabel sein. Hierbei kommt es unter anderem auf den Vergleich der Kostennachteile und -vorteile einer DRI-Produktion in Deutschland im Vergleich zum HBI-Bezug an.

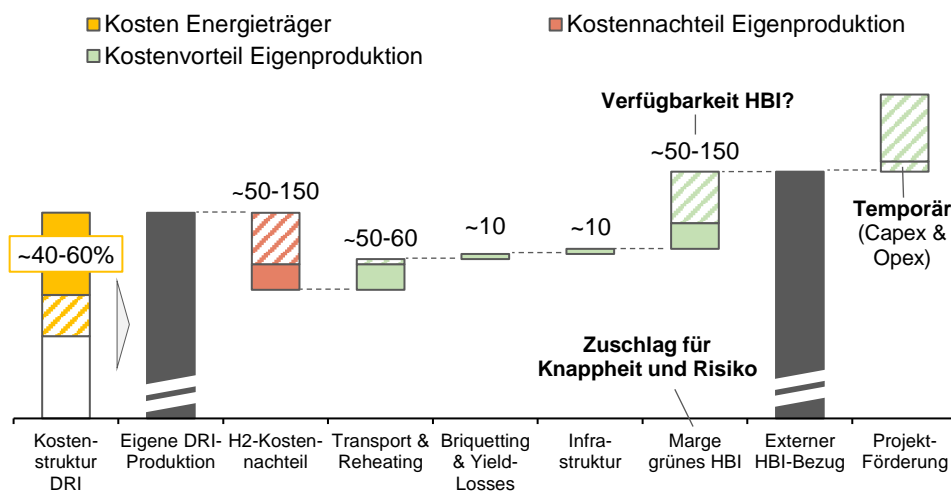
Kostenvergleich

Nach Einschätzung der Interviewten und auf Basis eigener Berechnungen im Rahmen der Studie ergibt sich aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren eine größere Bandbreite bei der Quantifizierung des Kostennachteils von grünem Wasserstoff in Deutschland im Vergleich zu Regionen mit kostengünstiger erneuerbarer Energieversorgung. Die Bandbreite liegt überschlägig zwischen 0,7 Euro/kg und 2 Euro/kg Wasserstoff am Verwendungsstandort in Deutschland.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich um einen mittel- bis langfristigen Kostennachteil handelt, der hier aufgrund der vielen Einflussfaktoren nur in Form einer Bandbreite angegeben wird. Für die Ermittlung der Bandbreite wurde auf unterschiedliche Ansätze (Wasserstoffbereitstellungskosten und Stromgestehungskosten) und Quellen zurückgegriffen (Hydrogen Council/McKinsey & Company 2022; Prognos 2022).

Abbildung 26 stellt indikativ und stark vereinfacht die zukünftige Kostenstruktur für die DRI-Produktion bei vollständiger Verwendung von grünem Wasserstoff sowie einen Kostenvergleich der heimischen DRI-Produktion mit deutschem oder importiertem Wasserstoff im Vergleich zum HBI-Bezug aus Drittländern (und Drittunternehmen) mit kostengünstigem Strom aus erneuerbaren Energien dar.

Abbildung 26: Kostenstruktur der DRI-Produktion bei 100% H₂-Einsatz (in %) sowie Vergleich der Roheisenkosten bei eigener DRI-Produktion vs. HBI-Bezug aus Drittländern (in Euro pro Tonne) (schematisch und indikativ)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an McKinsey (2022a) und Agora Energiewende (2021b)

Die Produktionskosten für DRI sind schätzungsweise zu 40 bis 60% auf Wasserstoff- und Stromstoffkosten zurückzuführen. Der Kostennachteil am Standort Deutschland ist, wie oben erläutert, auf höhere Strompreise und entsprechend höhere Wasserstoffkosten oder auf entsprechende Transportkosten aus Exportländern zurückzuführen. Neben diesem Kostennachteil der heimischen DRI-Produktion im Vergleich zum HBI-Import gibt es aber auch Kostenvorteile einer Produktion in Deutschland.

In diesem Zusammenhang sind vor allem die Kosten für den Transport aus Exportländern zu betrachten, die sich nach Angaben von Interviewten mit 10 bis 20 Euro pro Tonne quantifizieren lassen. Noch mehr ins Gewicht fallen könnte die Tatsache, dass bei HBI-Import im Vergleich zur Direktproduktion in Deutschland keine Restwärme genutzt werden kann, oder anders

formuliert, der Einschmelzprozess im EAF/SAF mehr Energie erfordert. Dabei spielen auch erhöhte Tap-to-Tap-Zeiten (die kapazitätserhöhend wirken) eine wesentliche Rolle. Auf Basis der Einschätzung der interviewten Experten werden Kosten in Höhe von 40 Euro pro Tonne unterstellt.

Für die Brikettierung des DRI sind überschaubare Kosten und Ausbringungsverluste in Höhe von rund 10 Euro pro Tonne anzusetzen. Ein schwer quantifizierbarer Umstand ergibt sich im Hinblick auf infrastrukturelle Vorteile in Deutschland und Europa. So müssten an anderen Standorten z.B. zunächst Häfen für den Eisenerztransport errichtet werden. Auf Basis der Interviews wird dieser Umstand mit ebenfalls überschaubaren Kosten für die Exportländer in Höhe von 10 pro Tonne beziffert.

Ein weiterer Kostenvorteil inländischer DRI-Produktion ergibt sich dadurch, dass HBI zumindest mittelfristig ein knappes Gut sein wird. Obgleich über längerfristige Partnerschaften der Zugang zu HBI gesichert werden kann, ist eine Abhängigkeit mit entsprechender Marge auf die Herstellkosten (bei HBI-Bezug von Drittunternehmen) zu erwarten. Neben diesen Knappheitszuschlägen ist auch mit Risikozuschlägen zu rechnen, da für die HBI-Lieferanten der Aufbau solcher Anlagen (mit europäischen und deutschen Stahlunternehmen als wesentliche Abnehmer) mit Risiken verbunden ist. Auch "Take or Pay-Vertragsstrukturen" erscheinen in diesem Zusammenhang wahrscheinlich.

Die Marge auf die Herstellkosten wird in der vorliegenden Untersuchung in einer Bandbreite von 50 bis 150 Euro pro Tonne quantifiziert, so dass sich insgesamt ein Kostenvorteil für den Betrieb einer Direktreduktionsanlage in Deutschland ergäbe. Der Vergleich stützt sich u.a. auf die Annahme, dass Wasserstoff hierzulande zukünftig zu wettbewerblichen Preisen verfügbar ist. Daher könnte bei anderen Einschätzungen der Kostenvergleich anders ausfallen. Energiekosten und Marktmacht werden letztlich die entscheidenden Determinanten sein.

Temporäre Anschubfinanzierung

Als temporäres Mittel zur Anschubfinanzierung und zum temporären Kostenausgleich ist eine staatliche Projektförderung erforderlich. Herausfordernd ist vor allem die Tatsache, dass Förderanträge Prognosen über mehrere Jahre in die Zukunft im Hinblick auf Zusatzerträge und -aufwendungen (CAPEX-Bestandteil) für die Produktion von grünem Stahl im Vergleich zu grauem Stahl erfordern. Der Capex-Bestandteil, also die „Anschubfinanzierung“, lässt sich vermutlich gut abschätzen.

Für den Opex-Bestandteil, also das eigentliche Betreiben der Anlagen, bestehen hingegen erhebliche Unsicherheiten. Hier sind für das Unternehmen schwierig beeinflussbare Faktoren in Betracht zu ziehen, wie die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff, die Frage, ob und bis wann Gas und blauer Wasserstoff eingesetzt werden kann, oder auch die Preise für Strom und Wasserstoff. An dieser Stelle ergeben sich zahlreiche Risiken (geringere

Einzahlungen und/oder höhere Auszahlungen im Vergleich zum Projektförderantrag). Es stellt sich die Frage, wie die Risikoverteilung zwischen Unternehmen und dem Staat ausgestaltet ist.

Insgesamt sind die zu berücksichtigenden Kostenkomponenten aus heutiger Sicht nur schwer abschätzbar, da es eine Vielzahl an Kombinationen von Annahmen gibt. Unter entsprechenden Rahmenbedingungen in Deutschland und Europa scheint auch hierzulande eine Stahlindustrie mit Direktreduktionsanlagen wettbewerbsfähig zu sein. Als umweltpolitisches, ökonomisches und industriepolitisches Argument kommt hinzu: Aufgrund des engen Zeitrahmens für das Abschmelzen der freien Zuteilung, der ambitionierten Klimaziele und der Frage, wie schnell HBI zur Verfügung steht, hat die Investition in Direktreduktionsanlagen zunächst Geschwindigkeitsvorteile.

HBI als „knappes Gut“

HBI ist ein „knappes Gut“. Geplante Anlagen oder Projekte sind zum weitaus größten Teil in Europa und nur sehr partiell in anderen Regionen wie den USA, Australien und Südostasien zu finden (Abbildung 27). In Summe machen die geplanten Anlagen und Projekte schätzungsweise 5% der globalen Produktionskapazitäten aus, ein „Exportmarkt“ für HBI zeichnet sich noch nicht ab.

Abbildung 27: Standorte von geplanten Anlagen oder Projekten zur Stahlerzeugung auf Basis von grünem Wasserstoff



Quelle: McKinsey (2022b)

Momentan ist der DRI-/HBI-Markt von regionaler Produktion für den heimischen Markt geprägt und daher vergleichsweise klein. Für den Aufbau von HBI-Kapazitäten (also „exportfähiger“ DRI-Kapazitäten) kommen grundsätzlich mehrere Player in Frage: zum einen die Stahlunternehmen selbst und zum anderen „aufstrebende Volkswirtschaften“ wie bspw. China, Indien oder partiell auch arabische Länder. Bergbauunternehmen (Eisenerz) kämen zwar grundsätzlich in Frage, allerdings stellt sich die Frage, ob das HBI-Ge-

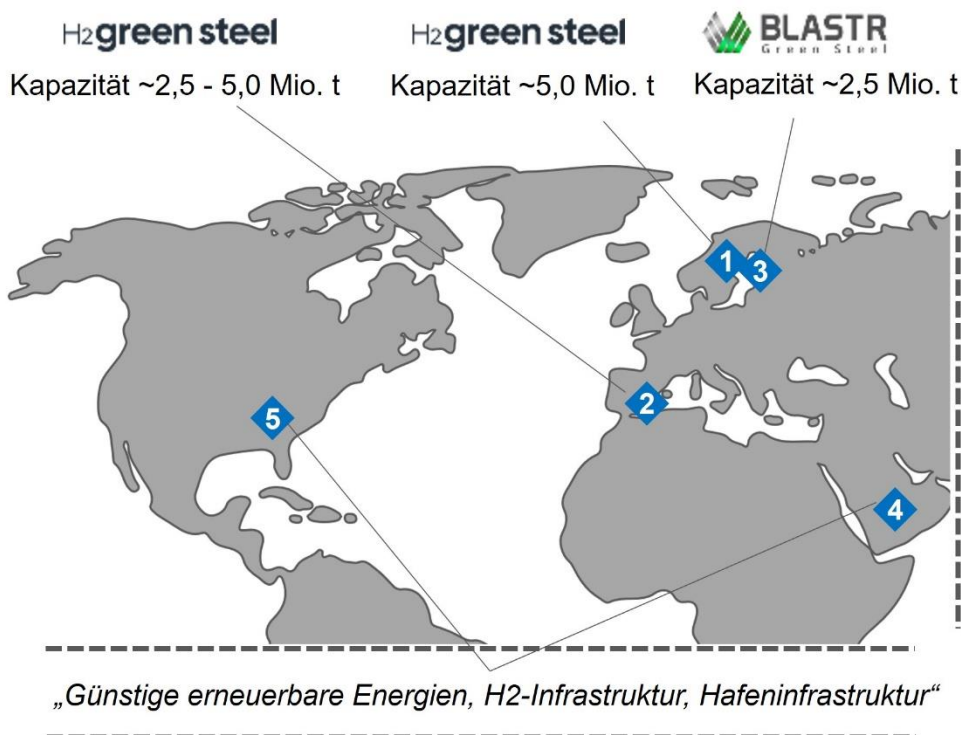
schäft für diese Unternehmen, die sehr hohe Margen gewohnt sind, betriebswirtschaftlich ausreichend interessant ist.

Wesentliche Standortvoraussetzung ist die kostengünstige Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffproduktion. Weitere Voraussetzungen für die HBI-Produktion sind u.a. eine geeignete Hafeninfrastruktur, die Anbindung an den Eisenerzmarkt oder auch das (metallurgische) Know-how der lokalen Arbeitskräfte.

Abbildung 28 zeigt schematisch ausgewählte Standorte, welche die skizzierten Rahmenbedingungen erfüllen. So könnten sich für den HBI-Export insbesondere der Süden der USA und die arabische Region anbieten. Auch in Europa sind in den vergangenen Jahren Grünstahlprojekte angestoßen worden, die keinen Kapazitätsersatz, sondern neue Kapazitäten an besonders gut geeigneten Standorten darstellen (hier exemplarisch H2 Green Steel sowie Blastr Green Steel). Diese Großprojekte bilden jedoch nur einen Bruchteil der europäischen und weltweiten Oxygenstahlproduktion ab (ca. 12% bzw. 1%).

Es scheint also absehbar, dass HBI ein knappes Gut bleiben wird und „HBI-Partnerschaften“ auch in Anbetracht der Kürze der Zeit herausfordernd sind. Der HBI-Markt muss sich perspektivisch entwickeln und wird voraussichtlich lange Zeit nicht so transparent und liquide sein wie Erz- und Kohlemärkte.

Abbildung 28: Überblick ausgewählter H₂-/Stahl-Projekte und -Standorte (Rohstahlkapazität in Mio. Tonnen) (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung

3.5. Szenarien für eine wasserstoffbasierte Transformation der Primärstahlproduktion in Deutschland 2030 und 2045

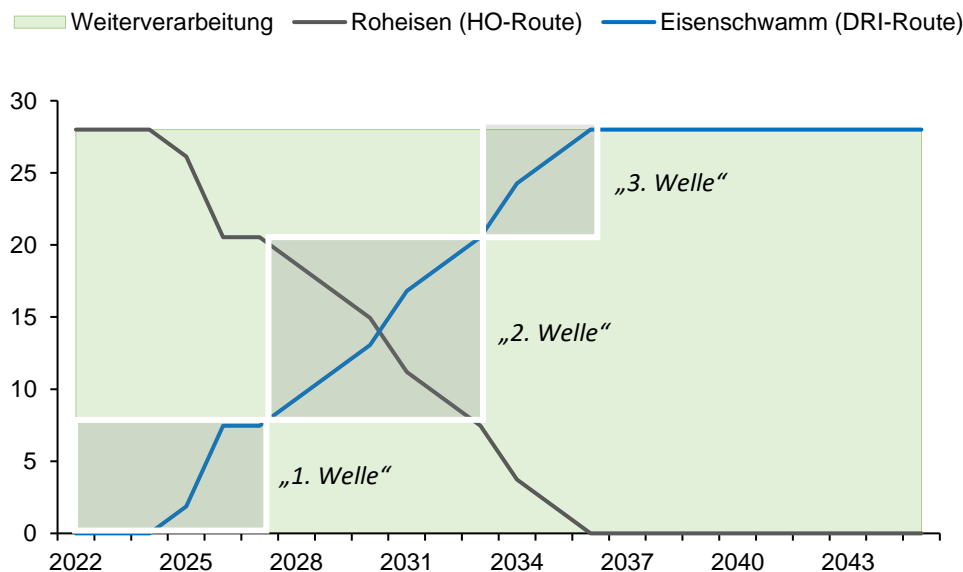
Zur Ableitung transformativer Beschäftigungseffekte wurden drei verschiedene Szenarien entwickelt. Durch die vielfältigen Einflussfaktoren, die in den vorherigen Abschnitten beleuchtet wurden, und die lange Zeitachse bestehen hohe Unsicherheiten. Daher handelt es sich nicht um Prognosedaten.

Basisszenario

Das Basisszenario bildet den Bau von Direktreduktionskapazitäten korrespondierend zum Umfang der gesamten Hochofenkapazitäten ab (Abbildung 29). Dabei sind vor allem für die erste Transformationswelle bis Mitte der 2020er Jahre (soweit vorhanden) konkrete Transformationspläne bzw. Beauftragungen von Anlagenbauern, Standortbekenntnisse und Förderbescheide der Primärstahlunternehmen in den dargestellten Hochlauf eingeflossen (ArcelorMittal Deutschland 2023; Salzgitter AG 2023b; Thyssenkrupp AG 2023; Handelsblatt 2023a; SHS 2023).

Für diesen Anteil der Primärstahlkapazitäten ist anzunehmen, dass die Transformation mit hoher Wahrscheinlichkeit umgesetzt wird. Inmitten dieser „indikativ-minimalen“ und „indikativ-maximalen“ zu transformierenden Roheisenmenge befindet sich eine Grauzone im Hinblick auf Roheisen, aber auch im Hinblick auf weitere Produktionsschritte in der Stahlindustrie, die stark von externen Rahmenbedingungen abhängt.

Abbildung 29: Basisszenario: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr)



Quelle: Eigene Darstellung

Da die konkreten Pläne zum aktuellen Zeitpunkt im Jahr 2023 nur einen Teil der zu transformierenden Hochöfen betreffen, wurde die Transformation entlang der Zeitachse auf Basis von Annahmen simuliert. So werden die kostenlosen Zuteilungen von Emissionszertifikaten aus dem EU-ETS zwischen 2026 und 2034 sukzessive und schließlich vollständig abschmelzen, so dass die Wettbewerbsfähigkeit von grauem im Vergleich zu grünem Stahl abnehmen wird.

Ein weiterer „beschleunigender“ Faktor für die Transformation ist, dass die Primärstahlunternehmen im Wettbewerb stehen und somit parallel transformieren werden. Dabei wird der Ersatz der Hochofenroute (mit einer durchschnittlichen „Lebensdauer“ eines Hochofens von ca. 16 bis 20 Jahren) durch die Direktreduktionsroute auf Unternehmensebene sukzessive erfolgen.

Insgesamt bestehen hohe Unsicherheiten im Hinblick auf den konkreten Transformationspfad. Durch verschiedene Faktoren erscheint es aber wahrscheinlich, dass die Transformation bereits deutlich vor 2045 abgeschlossen sein wird. Insbesondere die zweite und dritte Transformationswelle sind stark an externe Rahmenbedingungen geknüpft.

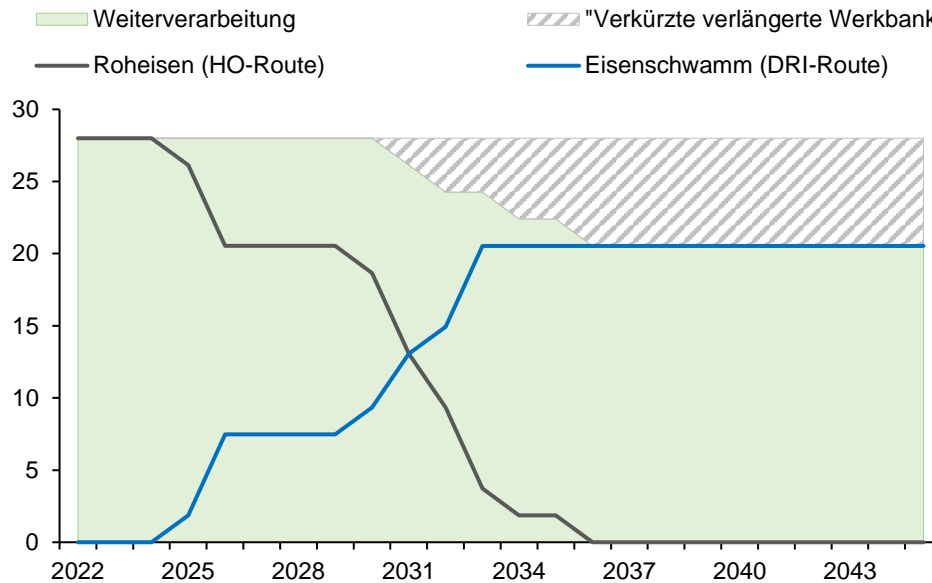
Alternativszenarien

Die simulierte Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung in den Szenarien 2 und 3 kann Abbildung 30 und Abbildung 31 entnommen werden. Vereinfacht bildet Szenario 2 eine Transformation von rund zwei Dritteln der Roheisenproduktion mit Unsicherheiten für weitere Produktionsschritte ab. Szenario 2 geht davon aus, dass auch die zweite Welle der Transformation in Form des Baus von DRI-Anlagen in Deutschland stattfindet. Dieses Szenario beruht auf dem engen zeitlichen Rahmen für den wirtschaftlichen und ökologischen Umbau sowie der Verfügbarkeit und den Preisen von HBI auf den sich erst entwickelnden Märkten.

Die dritte Welle der Transformation bleibt hingegen (weitestgehend) aus. Offen ist dann, inwieweit es kurz- mittel und langfristig auch zur Verlagerung von Weiterverarbeitung (Walzwerke, Beschichtungsanlagen usw.) kommen wird. Dieser Bereich ist in Abbildung 30 und Abbildung 31 schraffiert dargestellt. In Szenario 3 wird lediglich die Hälfte der Roheisenproduktion transformiert mit ebensolchen Unsicherheiten für die weiteren Produktionsschritte der Stahlroute.

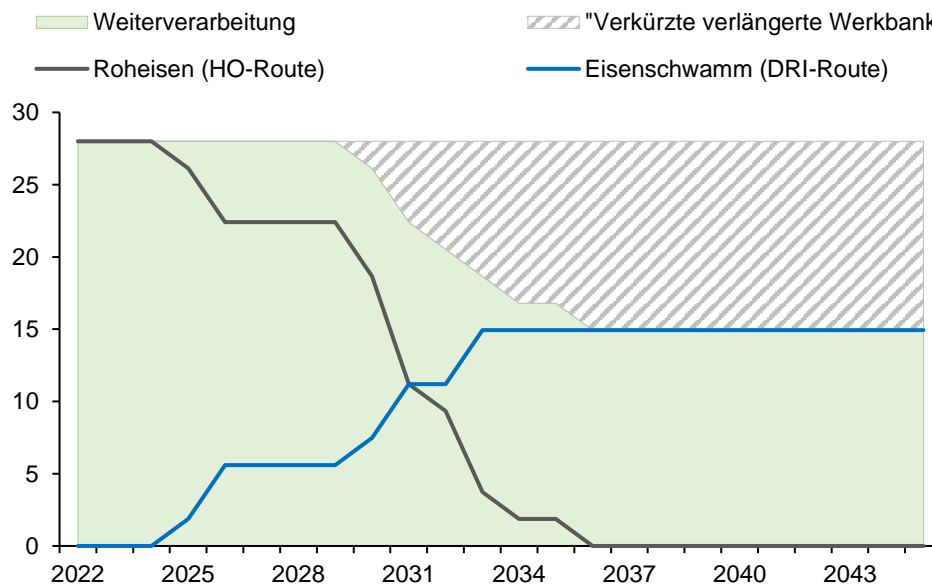
Berücksichtigt man die verhältnismäßig konstante Primärstahlproduktion in der Vergangenheit (Abbildung 9), den Reifegrad der deutschen und europäischen Wirtschaft und die vielfältigen Herausforderungen im Rahmen der Transformation, erscheint es unwahrscheinlich, dass die Primärstahlproduktion in der Zukunft (signifikant) ansteigen wird.

Abbildung 30: Szenario 2: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 31: Szenario 3: Roheisen-/Eisenschwammproduktion und Weiterverarbeitung (in Mio. Tonnen pro Jahr)



Quelle: Eigene Darstellung

Da sich entlang der Szenarien insbesondere für personalwirtschaftliche Aspekte (wie Qualifikationsanforderungen an die Beschäftigten durch den technologischen Wandel) inhaltliche Überschneidungen ergeben, wird nachfolgend zunächst das Basisszenario im Detail beleuchtet. Für die Alternativszenarien wird in einem folgenden Abschnitt der Fokus überwiegend auf volks-

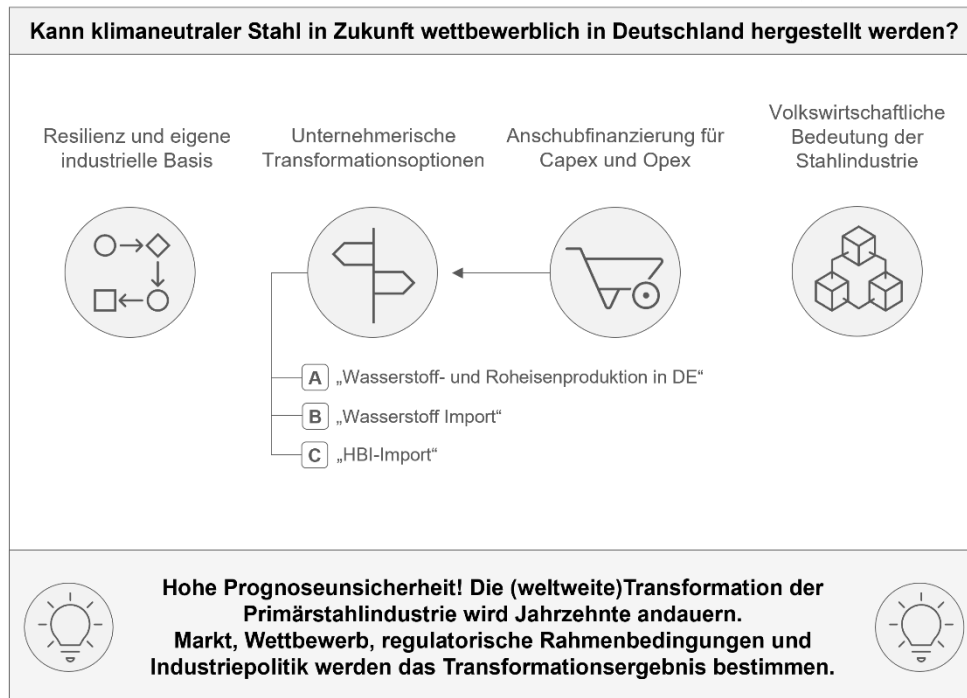
wirtschaftliche Implikationen einer „Teil-Transformation“ der Primärstahlindustrie gerichtet.

3.6. Auswirkungen der Szenarien auf Beschäftigung und Qualifizierung in der Primärstahlindustrie

3.6.1. Basisszenario im Detail: Analyse der Sicherung von primärstahlbedingter Beschäftigung und Wertschöpfung sowie Qualifikationsanforderungen an die Beschäftigten

Das Basisszenario geht von der vollständigen Transformation der Stahlwertschöpfung, also dem Bau von Direktreduktionsanlagen mit Kapazitäten, die vereinfacht der heutigen Kapazität der Hochöfen entsprechen, aus. Abbildung 32 stellt die wesentlichen Faktoren und Rahmenbedingungen für das Gelingen einer vollständigen Transformation schematisch dar.

Abbildung 32: Wesentliche Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen für das Gelingen einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie in Deutschland (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung

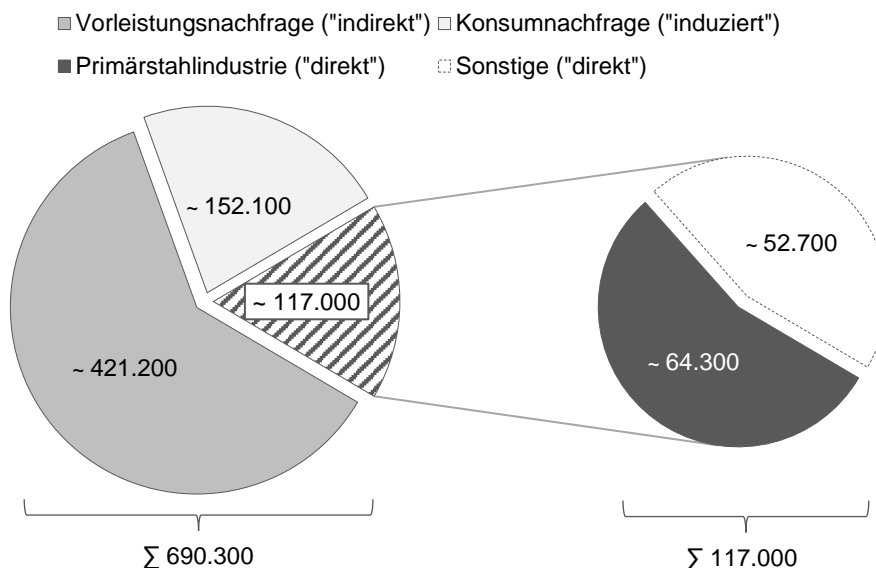
Im Folgenden werden der aktuelle Zustand im Hinblick auf Beschäftigung und Wertschöpfung, der bei einer gelungenen Transformation erhalten bleibt, sowie die sich durch die Transformation ergebenden geringfügigen Beschäftigungseffekte und Qualifikationserfordernisse durch den erforder-

lichen Technologiewechsel beschrieben. Im Endeffekt kommt es im Saldo rechnerisch zum Wegfall der Arbeitsplätze in den Kokereien (knapp 1.100 in 2022). Diese werden jedoch durch gegenläufige Effekte kompensiert (siehe unten).

Um das Szenario nicht zu komplex zu gestalten, werden bei der Simulation – vereinfachend und anderes als in den betrachteten vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erneuerbare Energien und Windkraft – keine Produktivitätsfortschritte berücksichtigt. Folglich wird die Anzahl der Beschäftigten de facto als konstant angenommen.

Im Jahr 2022 waren nach Angaben der Bundesagentur für Arbeit rund 117.000 Menschen direkt in der Stahlindustrie beschäftigt. Darüber ergeben sich indirekte Beschäftigungseffekte von rund 420.000 und induzierte Beschäftigungseffekte von rund 152.000 (Abbildung 33). Da in diesem Abschnitt ausschließlich die Primärstahlindustrie betrachtet wird, für die es keine separate Abgrenzung in der amtlichen Statistik gibt, wurden Unternehmensdaten zur Ableitung der Beschäftigung herangezogen (z.B. Geschäftsberichte oder Investor Relations Präsentationen) und die Beschäftigtenzahl überschlägig geschätzt. Auf dieser Basis lassen sich rund 64.000 Beschäftigte der insgesamt 117.000 direkt Beschäftigten der Primärstahlindustrie zuordnen.

Abbildung 33: Beschäftigungsstruktur in der Stahlindustrie 2022 (Anzahl der Beschäftigten, indikativ)



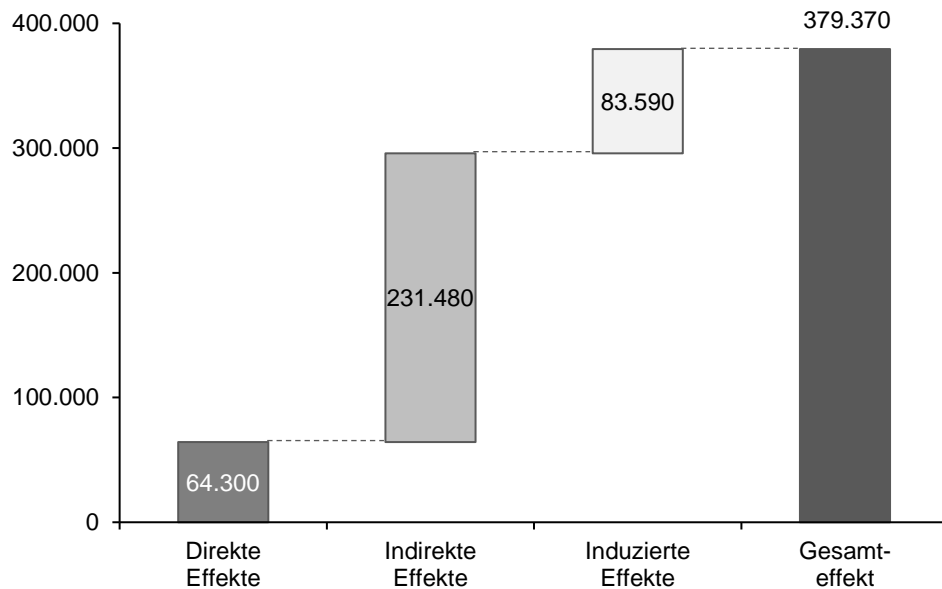
Quelle: Eigene Darstellung

Gesamtbeschäftigung und Wertschöpfung der Primärstahlindustrie

Insgesamt ergibt sich eine abgeleitete Gesamtbeschäftigung in der Primärstahlindustrie von knapp 380.000 Personen (Abbildung 34). Neben den rund 64.000 direkt bei den Primärstahlunternehmen Beschäftigten ergeben sich

über 230.000 Beschäftigte bei Zulieferern und Dienstleistern wie Instandhaltungs-, Schrott- und Recyclingunternehmen oder auch Maschinen- und Anlagenbauern. Der einkommensinduzierte Beschäftigungseffekt beläuft sich auf rund 84.000 Beschäftigte.

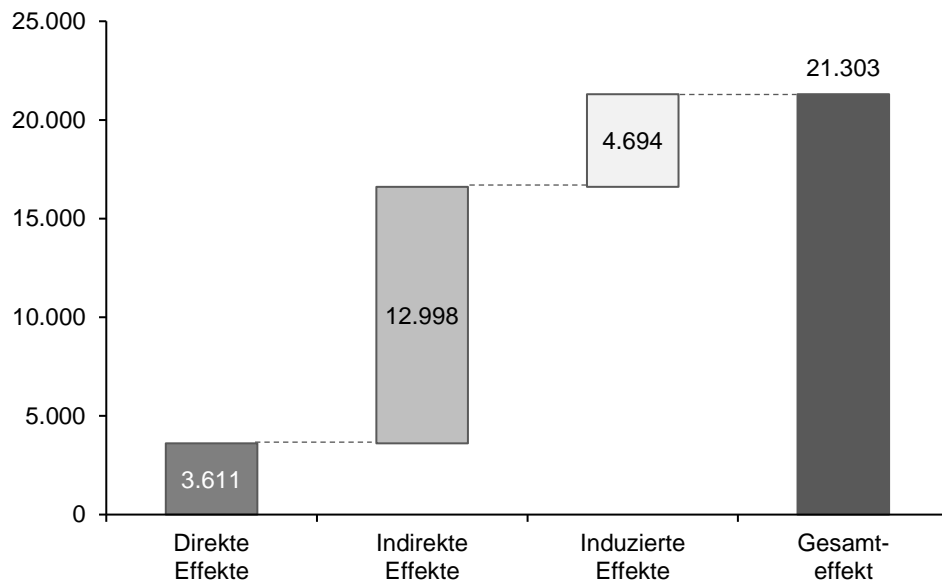
Abbildung 34: Beschäftigung: Gesamteffekt der Primärstahlindustrie in Deutschland 2022 (Anzahl der Beschäftigten)



Quelle: Eigene Darstellung

Mit einer Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern in Höhe von rund 3,6 Mrd. Euro, die jährlich direkt in der Primärstahlindustrie realisiert wird, und weiteren rund 13 Mrd. Euro bei Zulieferern und Dienstleistern sowie rund 4,7 Mrd. Euro induzierter Bruttowertschöpfung leistet die Primärstahlindustrie mit in Summe 21,3 Mrd. Euro einen signifikanten Beitrag zur gesamten Bruttowertschöpfung in Deutschland (Abbildung 35), die 2019 bei 3.000 Mrd. Euro lag. Die dargestellten Werte sind vor allem im Lichte der zuvor diskutierten notwendigen Projektförderungen von Belang.

Abbildung 35: Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern: Gesamteffekt der Primärstahlindustrie in Deutschland 2022 (in Mio. €)

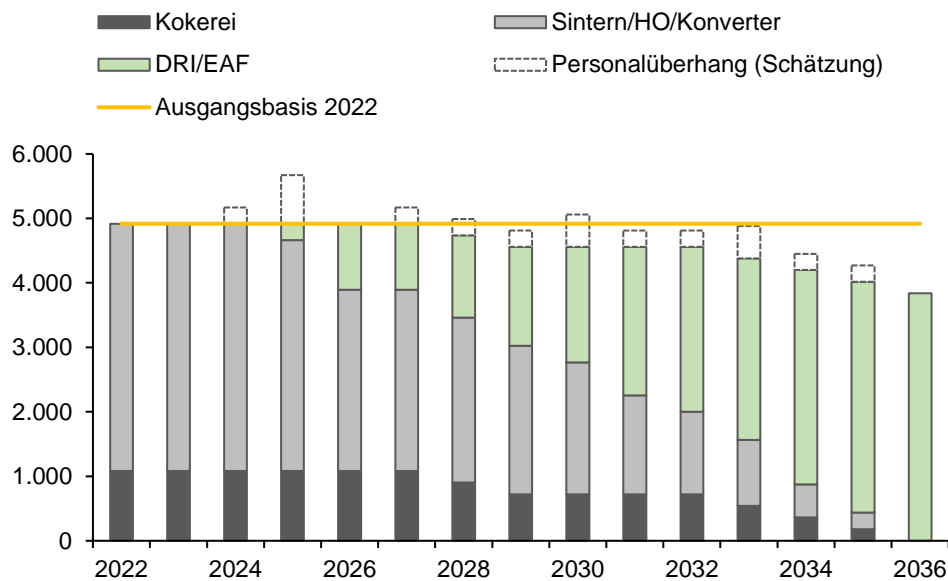


Quelle: Eigene Darstellung

Beschäftigungseffekte in den „Kernbereichen für die Transformation“

Die sich ergebenden Beschäftigungseffekte in den von der technologischen Transformation betroffenen Bereichen werden in Abbildung 36 skizziert. Aufgrund der gleichzeitigen Qualifizierung der Beschäftigten für die neuen Technologien und des fortlaufenden Betriebs der Hochöfen ist es zu Beginn wahrscheinlich, dass ein zusätzlicher Personalbedarf besteht. Das Beschäftigungsniveau wird leicht ansteigen.

Abbildung 36: Basisszenario: Beschäftigungsstruktur entlang der „Kernbereiche für die Transformation“ 2022-2036 (Anzahl der Beschäftigten)



Quelle: Eigene Darstellung

Infolge des Doppelbetriebs zweier Technologien kommt es vorübergehend zum Anstieg der Beschäftigung. Aufgrund technischer Einschränkungen können Kokereien nicht proportional zum Rückgang der Produktionsmenge heruntergefahren werden. So ist trotz des Rückgangs der Produktionsmenge in der Transformationsphase mit zusätzlichen Kostenbelastungen im Verhältnis zur Ausbringungsmenge zu rechnen. Der Betrieb der Kokereien ist grundsätzlich notwendig bis der letzte Hochofen des Unternehmens (oder des Standortes) durch Direktreduktionsanlagen ersetzt wurde.

Im weiteren zeitlichen Verlauf kehrt sich der Beschäftigungstrend um. Für den Betrieb von Direktreduktionsanlagen sowie EAF/SAF werden bei gleicher Produktionsmenge ca. 25% weniger Beschäftigte im Vergleich zu den entsprechenden Anlagen der Hochofenroute benötigt. Der geschätzte Effekt beläuft sich auf 1.080 Arbeitsplätze, was nahezu der Anzahl der Beschäftigten in den Kokereien entspricht, die auch bei der neuen Technologie nicht benötigt werden.

Gegenläufige Effekte zum Entfall der Kokereien ergeben sich aus Insellösungen für die Wasserstoffherzeugung an Standorten der Primärstahlindustrie sowie durch erweiterte Recyclingaktivitäten. Da Prognosen zum Beschäftigungsumfang dieser Aktivitäten aus heutiger Sicht schwerfallen, wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass diese Effekte den Beschäftigungsabbau kompensieren.

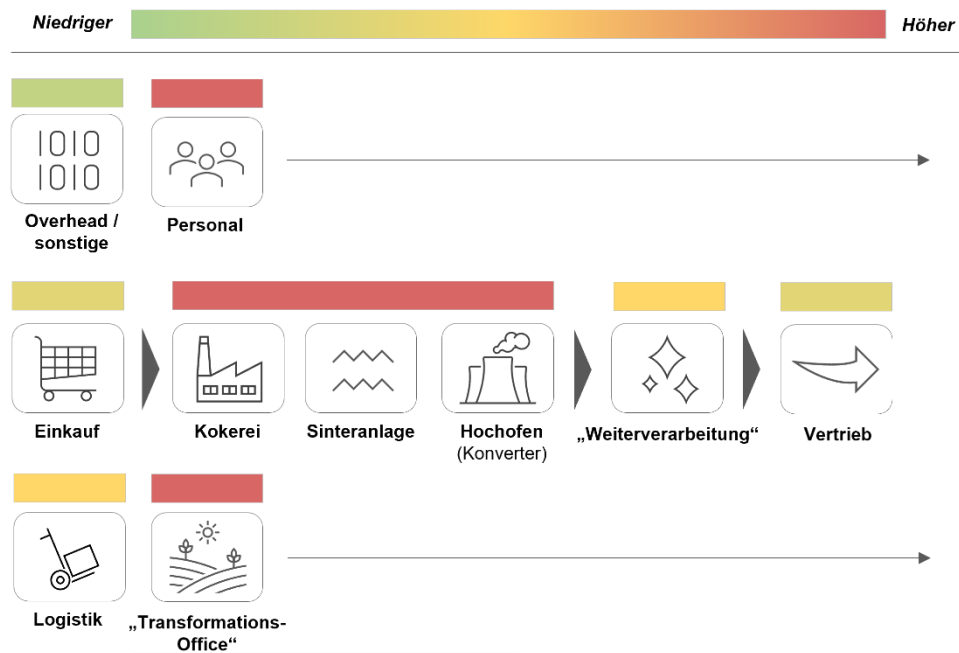
Transformation entlang den Funktionsbereichen

Abbildung 37 stellt einen (vereinfachten) Überblick der Funktionsbereiche in der Primärstahlproduktion dar. Dabei wurde für die jeweiligen Bereiche qua-

litativ die transformative Betroffenheit abgeschätzt. Grundsätzlich ist die gesamte Hütte von der Transformation betroffen, jedoch gibt es Bereiche, die unmittelbarer betroffen sind. Diese Bereiche befinden sich in den Produktionsbereichen, die zukünftig durch die wasserstoffbasierte Direktreduktion von Eisenschwamm und die Rohstahlerzeugung im EAF/SAF ersetzt werden müssen. Zu diesen Kernbereichen zählen insbesondere die Kokerei, die Sinteranlage sowie der Hochofen.

Andere Bereiche wie Einkauf und Logistik sind vor allem von der Umstellung des Reduktionsmittels Kohle/Koks auf Erdgas oder Wasserstoff betroffen. In der Weiterverarbeitung im Stahlwerk steht man vor der Herausforderung, die erdgasbetriebenen Walzwerköfen durch bspw. wasserstoffbasierte Öfen zu ersetzen. Darüber hinaus werden auch andere Abteilungen, wie das Personalmanagement in HR und ein transformationsbegleitendes Transformationsoffice durch die Transformation in besonderem Maße beansprucht.

Abbildung 37: Einfluss der Transformation entlang der Unternehmensbereiche (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung













Personalwirtschaftliche Herausforderungen

Eine bedeutende personalwirtschaftliche Herausforderung besteht darin, Lösungen für alle betroffenen Belegschaftsgruppen (sogenannte Fallgruppen) zu finden (Abbildung 38). Einige Beschäftigte befinden sich in einem Alter, in dem es aus unternehmerischer und möglicherweise auch aus persönlicher Perspektive nur bedingt sinnvoll ist, Qualifizierungsmaßnahmen für die neuen Anlagen zu ergreifen.

Dies betrifft tendenziell einen größeren Teil der Belegschaft, da die Transformationsphase zeitgleich mit dem Eintritt der geburtenstarken Jahrgänge in den Ruhestand erfolgt. Für diese Gruppe scheint es sowohl aus unternehmerischer als auch aus persönlicher Sicht ratsam zu sein, eine sozialverträgliche Lösung für einen geordneten Ausscheidungsprozess zu finden, ähnlich wie sie bspw. im Rahmen des Braunkohleausstiegs durch das "Anpassungsgeld" umgesetzt wurde (Küster Simic/Schönfeldt 2022).

Für die nicht rentennahen Jahrgänge sind Qualifizierungsmaßnahmen erforderlich. Darüber hinaus müssen zusätzliche Mitarbeiter an den neuen Anlagen ausgebildet werden, um einen vorübergehenden parallelen Betrieb der Technologien zu gewährleisten. Um den Betrieb der bestehenden Anlagen der Hochofenroute aufrechtzuerhalten, müssen mögliche personelle Austritte durch neue Mitarbeiter kompensiert werden. Diese Gruppe von Beschäftigten muss sowohl für die Hochofenroute als auch für den Betrieb der neuen Anlagen qualifiziert werden.

Abbildung 38: „Typisierte Clusterung“ (schematisch)

| | | |
|---|---|---|
|  | Bestehende Mitarbeiter, planmäßiger Renteneintritt vor Transformation |  |
|  | Bestehende und „ältere“ Mitarbeiter |  |
|  | Bestehende und „jüngere“ Mitarbeiter |  |
|  | „Neue Mitarbeiter als temporärer Überhang durch Doppelbetrieb“ |  |
|  | „Neue Mitarbeiter an bestehenden Anlagen als Ersatz für Austritte“ |  |
|  | „Neue Mitarbeiter an neuen Anlagen“ |  |

Quelle: Eigene Darstellung

Durch den temporär notwendigen Personalüberhang und den hohen Fachkräftebedarf sowie vor dem Hintergrund der Altersstruktur der Belegschaften muss bereits heute die betriebliche Ausbildung für Verfahrenstechnologen, Industriemechaniker, Elektroniker, Chemielaboranten, Werkstoffprüfer oder auch Fachkräfte für Lagerlogistik intensiviert werden, damit in den kommenden Jahren, in denen die neuen Anlagen in Betrieb gehen, kontinuierliche Übergaben erfolgen können. Parallel dazu müssen auch bereits qualifizierte/

ausgebildete Fachkräfte in höherem Maße akquiriert werden (bspw. Ingenieure).

In diesem Zusammenhang wird das Corporate Branding noch einmal an Bedeutung gewinnen – für Unternehmen, die „an der Spitze der grünen Transformation“ stehen und sichere Arbeitsplätze sowie attraktive tarifliche Arbeitsbedingungen und Entgelte bieten.

Im weiteren Zeitverlauf sollte auch der unternehmensinterne Arbeitsmarkt (bspw. Mitarbeiter aus der Kokerei) durch Teilqualifikationen, Umschulungen und berufliche Weiterbildungen eine besondere Rolle spielen. Für Qualifizierungsmaßnahmen (Umschulungen, Weiterbildungen etc.) ist voraussichtlich ein Zeitrahmen von einigen Wochen bis hin zu einem Jahr vor Inbetriebnahme der neuen Anlagen einzuplanen.

Hier gilt es, kurzfristig die richtigen Voraussetzungen zu schaffen. Darunter fallen Aspekte wie die Definition von Qualifizierungsinhalten in Abstimmung mit Betriebsleitern und Meistern und die Definition von Aus- und Weiterbildungsinhalten (bspw. im Hinblick auf „Wasserstofftechnik“) in enger Zusammenarbeit mit der IHK. Auch zu betrachten sind praxisnahe Aspekte wie die Vorbereitung virtueller Trainings an den neuen Anlagen in Zusammenarbeit mit den Anlagenbauern und ggf. eine Zusammenarbeit mit Sekundärstahlunternehmen im Hinblick auf mögliche Praktika in einem Elektrostahlwerk während der Qualifizierung.

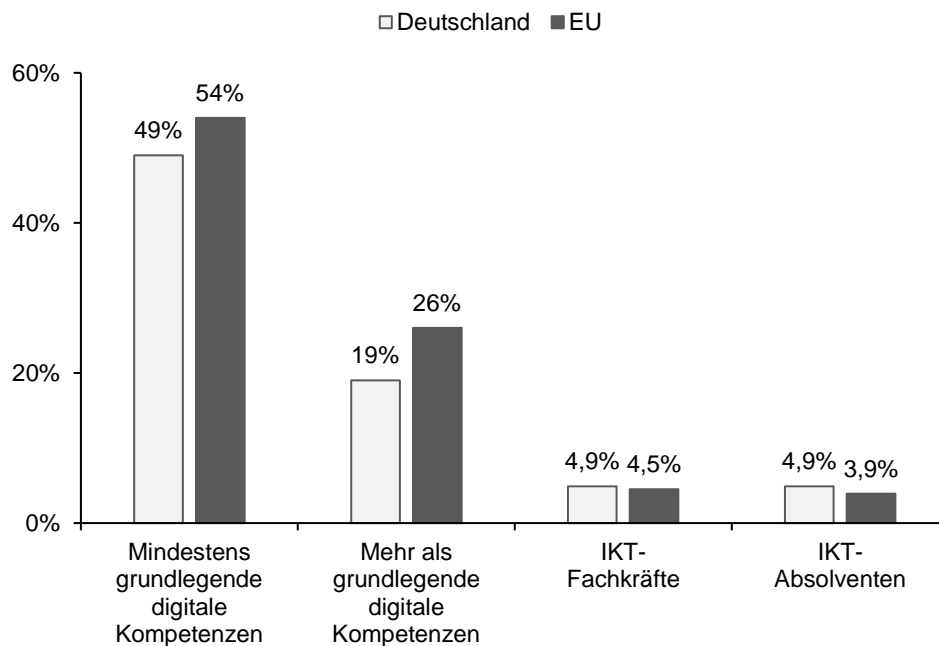
Digitale Transformation

Neben der „grünen“ Transformation sind auch die „digitale“ Transformation und die Einbindung von künstlicher Intelligenz (KI) von besonderer Bedeutung (IW Consult 2017).

Seit 2009 vergleicht die Europäische Kommission den Fortschritt der EU-Mitgliedsstaaten in den Bereichen Konnektivität, Humanressourcen, Internetnutzung, Integration digitaler Technologien und digitale öffentliche Dienste im Rahmen des "Digital Economy and Society Index" (DESI). Deutschland belegt dabei den 13. Platz von insgesamt 27 EU-Mitgliedsländern (Europäische Kommission 2022). Überdurchschnittliche Leistungen wurden von Deutschland einzig in der Kategorie Konnektivität (Rang 4) erzielt, während u.a. die Kategorie „Humankapital“ (Rang 16) unterdurchschnittlich bewertet wurde.

Für diesen Bereich sticht hervor, dass sowohl der Anteil der Einwohner mit „mindestens grundlegende digitale Kompetenzen“ (49% vs. 54% im europäischen Durchschnitt) als auch der Anteil der Einwohner mit „mehr als grundlegende digitale Kompetenzen“ (19% vs. 26% im europäischen Schnitt) im europäischen Vergleich unterdurchschnittlich ausfällt (Abbildung 39). Demgegenüber stehen überdurchschnittliche Anteile an Fachkräften und Absolventen für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT).

Abbildung 39: Digitale Kompetenzen (Anteil der Einwohner in %), IKT-Fachkräfte (Anteil der Erwerbstätigen in %) und IKT-Absolventen (Anteil aller Absolventen in %) 2021



Quelle: Europäische Kommission (2022)

Für die Stahlindustrie könnte sich in diesem Zusammenhang ein wichtiges Handlungsfeld ergeben. So definiert Roland Berger (2021) ein Zielbild für die „digitale Fabrik“ mit fünf Dimensionen technologischer und organisatorischer Anforderungen, darunter auch die digitale Belegschaft:

„Die Einbindung von Management und Mitarbeitern eines Unternehmens in Aufbau und Umsetzung der digitalen Fabrik ist von besonderer Bedeutung. Die Etablierung eines digitalen Mindsets und die Akzeptanz für agile Arbeitsprozesse sind hier ausschlaggebend.“

Die digitale Transformation steht im Grundsatz nicht unmittelbar im Zusammenhang mit der grünen Transformation der Primärstahlindustrie, da Digitalisierungsmaßnahmen ebenso für die Hochofenroute eine zentrale Rolle zur Steigerung der Effizienz einnehmen. Der Technologiewechsel mit „State of the Art“-Anlagen könnte aber ein beschleunigender Faktor sein. Die Digitalisierung von Prozessen ist bereits weit verbreitet und wird zukünftig von den Unternehmen weiter vorangetrieben.

Im Bereich künstlicher Intelligenz waren in jüngster Vergangenheit enorme Fortschritte zu beobachten, eine weitreichende Implementierung in unternehmerische Strukturen und Prozesse ist aber noch nicht festzustellen. Die technischen Fortschritte und Anwendungsmöglichkeiten sind derart vielfältig, dass sich Implikationen auf die Beschäftigung aus heutiger Sicht nur sehr grob skizzieren lassen.

KI-Einsatz in der Primärstahlindustrie

Für die Primärstahlindustrie sind naheliegende KI-Anwendungsgebiete zum einen in der Produktion denkbar, bspw. in Form von Qualitätskontrolle auf Basis von Bildverarbeitungstechniken oder auch im Bereich der Instandhaltung in Bezug auf „Frühwarnsysteme“ für potenzielle Ausfälle oder Wartungsbedarfe. Andererseits bieten sich auch in „Management-Bereichen“ wie der Prozess- und Supply-Chain-Optimierung, der Analyse von Markttrends oder der Erstellung von Nachfrageprognosen zahlreiche Anwendungsfelder.

Ein Beschäftigungsaufbau durch Implementierung von KI-Systemen erscheint unwahrscheinlich, ein Beschäftigungsabbau muss aber keine zwangsläufige Folge sein. So besteht die Möglichkeit, dass manuelle Tätigkeiten und Arbeitsabläufe stärker digitalisiert werden und in diesen Bereichen Beschäftigung abgebaut wird. Demgegenüber stehen veränderte oder neue Anforderungen wie die Implementierung, Wartung und Entwicklung der KI für Techniker, Datenanalytiker, KI-Experten und Informatiker.

Unstrittig ist, dass die Implementierung von KI zu einer erheblichen Veränderung von Arbeitsabläufen und der generellen Arbeitskultur führen kann, die Entwicklung bzw. Implementierung steht aber noch am Anfang. Die Belegschaften sind frühzeitig in die Gestaltung dieses Transformationsprozesses einzubinden.

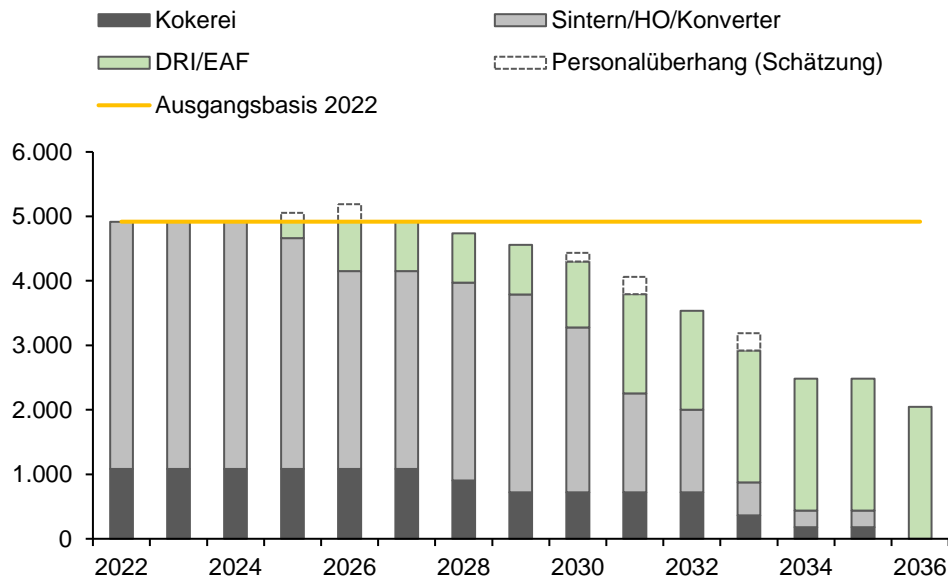
3.6.2. Alternativszenarien: Indikative Analyse möglicher Beschäftigungs- und Bruttowertschöpfungsverluste

Im Basisszenario ergeben sich durch die technologische Transformation keine (signifikanten) Beschäftigungseffekte. Nachfolgend werden die Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte der Alternativszenarien analysiert. Da sowohl das Szenario 2 als auch das Szenario 3 von einem Rückgang der Roheisenproduktion über die Primärstahlroute ausgehen, ergeben sich zwangsläufig inhaltliche Überschneidungen. Aus diesem Grund wird zunächst Szenario 3 mit einem Rückgang um rund 50% der Roheisenproduktion eingehender beleuchtet.

Beschäftigungseffekte in den „Kernbereichen für die Transformation“

Abbildung 40 stellt die simulierte Beschäftigung für die transformativen Kernbereiche (Roheisenproduktion) im Szenario 3 dar. Durch den Rückgang der Produktionskapazitäten in der Roheisengewinnung ergibt sich in Summe ein Beschäftigungsrückgang um knapp 2.900 Mitarbeiter (-58%).

Abbildung 40: Szenario 3: Beschäftigungsstruktur entlang der „Kernbereiche für die Transformation“ 2022-2036 (Anzahl der Beschäftigten)

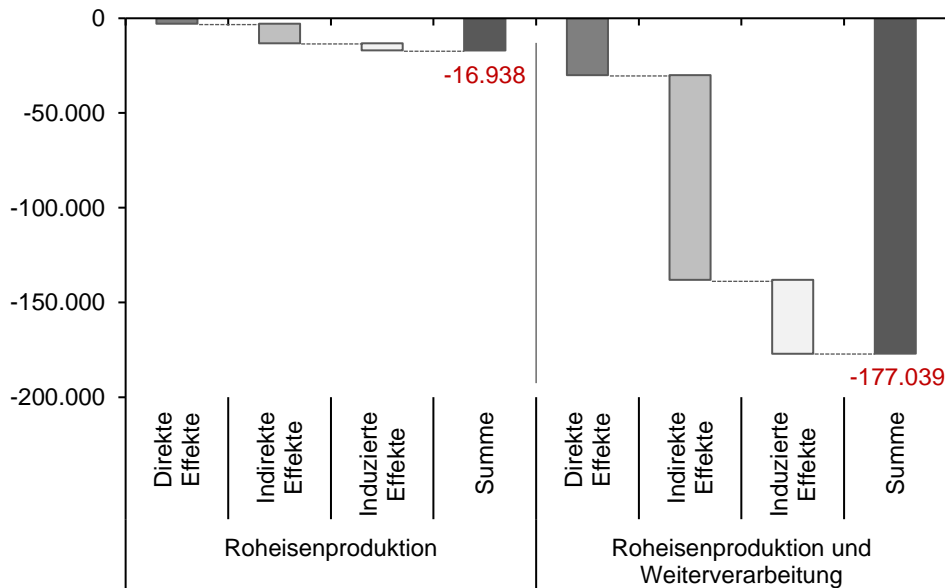


Quelle: Eigene Darstellung

Im Gegensatz zum Basisszenario erscheint es wenig wahrscheinlich, dass dieser deutlich höhere Beschäftigungsrückgang bei gleichzeitig signifikant sinkender Produktionsmenge durch gegenläufige Effekte wie erweiterte Recyclingaktivitäten oder Wasserstoffelektrolyse an den Stahlstandorten (vollständig) kompensiert werden kann. Vor dem Hintergrund des verhältnismäßig geringen Einflusses und der aus heutiger Sicht hohen Unsicherheit, wurden diese gegenläufigen Effekte in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

Weiterhin sind aber auch indirekte Effekte bei Zulieferern sowie einkommensinduzierte Effekte zu beachten. Überschlägig ergäbe sich allein in Bezug auf die verringerte Beschäftigung in der Roheisenproduktion in diesem Szenario ein Abbau von knapp 17.000 Arbeitsplätzen über indirekte und induzierte Effekte als „untere Bandbreite“ (Abbildung 41), die zukünftig vor allem in strukturschwachen Regionen fehlen würden (siehe auch Kapitel 3.3).

Abbildung 41: Szenario 3: Beschäftigungseffekte der Roheisenproduktion (links) sowie Beschäftigungseffekte der Roheisenproduktion und Weiterverarbeitung (rechts, jeweils Anzahl der Beschäftigten) (exemplarisch)



Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Ermittlung der „oberen Bandbreite“ möglicher Beschäftigungseffekte ist zu beachten, dass ein anteiliges „Herauslösen der Roheisenproduktion“ aus der unternehmerischen Wertschöpfung zwangsläufig auch mit Beschäftigungseffekten in anderen Bereichen (wie der Verwaltung) einhergehen würde. Darüber hinaus bestünde das erhöhte Risiko, dass weitere Teile der Wertschöpfung in Drittländer abwandern. Es wären also möglicherweise der Upstream- und der Downstream-Bereich betroffen.

Als obere Bandbreite wird ein proportionaler Rückgang der Stahlproduktion inkl. Weiterverarbeitung im Verhältnis des Rückganges der Roheisenproduktion unterstellt. Am Beispiel des Szenario 3 ergäben sich in der oberen Bandbreite im Simulationsergebnis rund 177.000 weniger Arbeitsplätze, was in etwa der Bevölkerung von Mülheim an der Ruhr entspricht (Stadt Mülheim a.d.R. 2023).

Sowohl die ermittelte untere als auch die obere Bandbreite erscheinen in der Realität wenig realistisch. Es ist nicht davon auszugehen, dass ein Rückgang der Roheisenproduktion zu keinerlei Auswirkungen in anderen Unternehmensbereichen führt. Die (anteilige) Verlagerung weiterer Wertschöpfungsstufen ist hingegen keine zwangsläufige Konsequenz, es besteht jedoch zweifelsohne ein erhöhtes Risiko dafür.

Bandbreite der Beschäftigungseffekte insgesamt

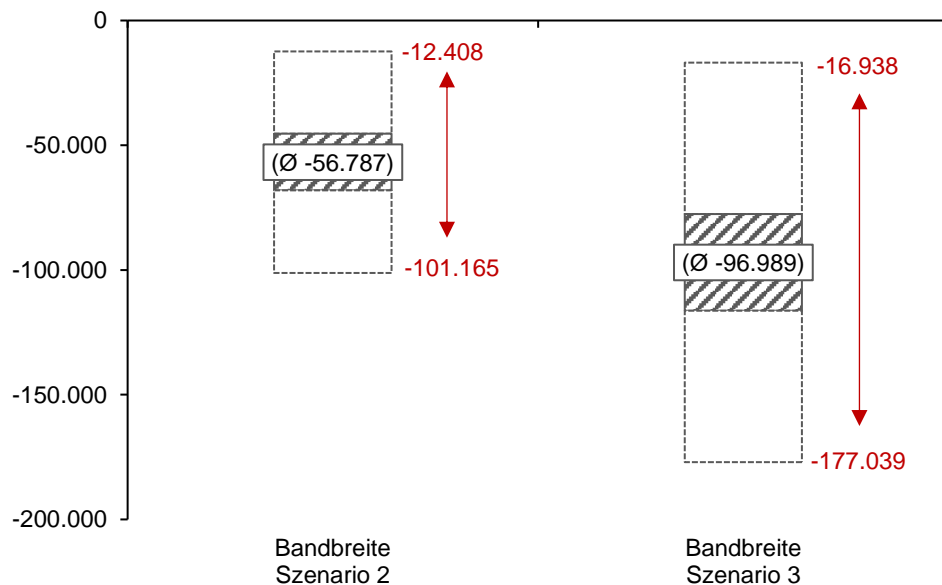
Es zeigt sich, dass das Gesamtbild in Bezug auf Beschäftigungseffekte einer rückläufigen Primärstahlproduktion komplex ist, weit über separierte Prozessschritte hinausgeht und mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet ist. Die

zusammenfassende Bandbreite möglicher Beschäftigungseffekte für die Alternativszenarien wird in Abbildung 42 dargestellt. Im Szenario 2 liegt die simulierte Bandbreite zwischen rund -12.000 und -101.000 Beschäftigten, im Szenario 3 zwischen rund -17.000 und -177.000 Beschäftigten.

Wie zuvor skizziert, sind die Extremwerte in beiden Szenarien als wenig realistisch zu erachten. Wahrscheinlicher erscheint es bspw. im Hinblick auf erforderliches Know-how der Beschäftigten, der Komplexität von Prozessschritten oder auch Kunden- und Zuliefererstrukturen, dass ein „Upstream-Verlust“ in der Praxis mit einem „Downstream-Teilverlust“ einhergehen könnte. An dieser Stelle ergibt sich aber eine große Grauzone.

Daher erscheinen aufgrund der hohen Unsicherheit Beschäftigungsverluste um den Bereich der Mittelwerte der dargestellten Bandbreiten in Höhe von rund -56.000 Beschäftigten (Szenario 2) sowie rund -96.000 Beschäftigten (Szenario 3) aus heutiger Sicht geeignete grobe Abschätzungen mit allen Unsicherheiten zu sein.

Abbildung 42: Szenarien 2 und 3: Bandbreite der Beschäftigungseffekte (Anzahl der Beschäftigten)



Quelle: Eigene Darstellung

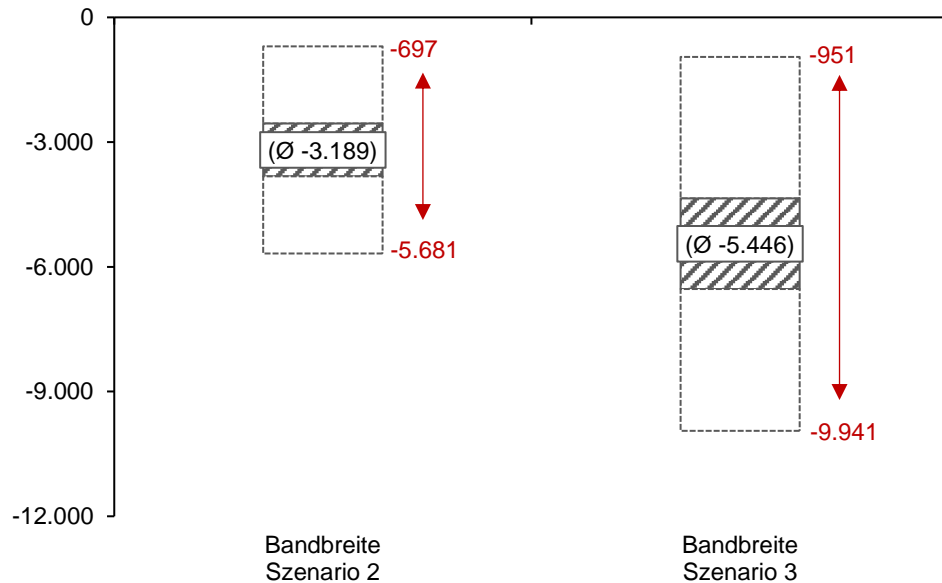
Wertschöpfungseffekte

Anhand der abgeleiteten Beschäftigungseffekte lässt sich indikativ der Effekt auf die Wertschöpfung ableiten (Abbildung 43). Zwangsläufig ergeben sich auch in diesem Fall aufgrund vielfältiger Unsicherheiten weitreichende Bandbreiten von rund 0,9 Mrd. Euro (untere Bandbreite Szenario 2) bis hin zu 13,2 Mrd. Euro pro Jahr (obere Bandbreite Szenario 3).

Zur besseren Einordnung eines möglichen Wertschöpfungsverlustes sei hier eine vereinfachende Beispielrechnung zum Rückgang der Steuereinnahmen aufgeführt:

Bei einem angenommenen Einkommenssteuersatz von 30% ergäben sich steuerliche Mindereinnahmen in einer Bandbreite von 0,2 bis 1,7 Mrd. Euro (Szenario 2) bzw. 0,3 bis 3,0 Mrd. Euro (Szenario 3) pro Jahr. Hinzu kämen weitere Bestandteile der Bruttowertschöpfung (Unternehmerlohn und Abschreibungen), die in dieser vereinfachten Betrachtung nicht inkludiert wurden.

Abbildung 43: Szenarien 2 und 3: Bandbreite der Wertschöpfung auf Basis von Löhnen/Gehältern (in Mio. €)



Quelle: Eigene Darstellung

In den nachfolgenden Kapiteln werden, auf Basis der in diesem Kapitel erörterten Transformationsszenarien der Primärstahlindustrie, die vorgelagerten Branchen „Wasserstoff“, „erneuerbare Energien“ (mit Schwerpunkt Photovoltaik, Wasserkraft und Biogas) sowie vor- und nachgelagert die „Windenergiebranche“ und nachgelagert die Automobilbranche im Hinblick auf Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte analysiert.

4. Wasserstoff

4.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation

4.1.1. Die Branche im Überblick

Wasserstoff kann in unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden. Die Ergebnisse der wesentlichen Produktionsverfahren werden als grauer, blauer und grüner Wasserstoff bezeichnet. Bei der Produktion von „grauem“ Wasserstoff wird Erdgas in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid gespalten. Wenn das dabei entstehende CO₂ mit Carbon Capture Technologien aufgefangen und gespeichert wird, spricht man von „blauem“ Wasserstoff. „Grüner“ Wasserstoff wird unter Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen hergestellt (Hydrogen Council 2021).

Aktuell wird in Deutschland vorwiegend grauer Wasserstoff produziert, blauer sowie grüner Wasserstoff spielen untergeordnete Rollen. Wasserstoff findet fast ausschließlich als Produktionsmittel in chemischen Herstellungsprozessen Verwendung, bspw. in der Herstellung von Ammoniak und Methanol und wird weniger als Energieträger genutzt (Steinhaus/Emons 2023). Innerhalb der Wasserstoffindustrie kann man unterschiedliche Teilbereiche unterscheiden: die Produktion, die Speicherung, die Logistik sowie die verschiedenen Anwendungsfelder von Wasserstoff.⁷

Zu den bedeutendsten Akteuren im Bereich der Herstellung von Industriegasen insgesamt gehören international agierende Unternehmen aus der Chemieindustrie wie Linde, L’Air Liquide, Air Products and Chemicals sowie Nippon Sanso. Der Großteil der Hersteller von Industriegasen stammt aus dem asiatischen Raum (Japan und Südkorea) sowie den USA. Innerhalb der europäischen Union stammen die umsatzstärksten Unternehmen aus Italien und Irland. Deutschland nimmt im internationalen Vergleich eine untergeordnete Rolle ein (Steinhaus/Emons 2023).

Aufgrund ihrer Bedeutung für den langfristigen Erfolg der Energiewende und die Erreichung der nationalen und internationalen Klimaziele wird die Wasserstoffindustrie in Zukunft eine Schlüsselrolle innerhalb der deutschen Chemiewirtschaft einnehmen. Als Teil der nationalen Wasserstoffstrategie stellt die auf erneuerbaren Energien basierte Herstellung von „grünem“ Wasserstoff einen entscheidenden Schritt zur Dekarbonisierung von Industriezweigen (wie z.B. der Chemie- und der Stahlindustrie) dar (BMWK 2023d).

⁷ Die Wasserstoffindustrie wird gemäß der Klassifizierung des Statistischen Bundesamts dem Wirtschaftszweig zur Herstellung von Industriegasen (WZ08-20.11) zugeordnet. Für Wasserstoff gibt es keine eigene Wirtschafts(unter)klasse, statistisch ist somit keine eindeutige Abgrenzung möglich. Daher dienen hier primär Erhebungen und Schätzungen bspw. von Branchenverbänden als Quelle zur Beschreibung der Branche.

Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie

Gemäß der Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie will die Bundesregierung bis 2030 10 GW inländische Elektrolysekapazität aufbauen. Damit sollen 30 bis 50% des deutschen Wasserstoffbedarfs gedeckt werden, der übrige Bedarf soll durch Importe gedeckt werden. Für das Jahr 2030 geht man von einem Gesamtwasserstoffbedarf von 95 bis 130 TWh aus, dieser könnte sich bis 2045 verzehnfachen (BMWK 2023a).

Wesentliche aktuelle Projekte und Herausforderungen in der Wasserstoffbranche betreffen den Aufbau von Produktionskapazitäten/-technik sowie der Infrastruktur für ein deutschlandweites Pipeline-Netz für den Transport von Wasserstoff und dessen Speicherung (Heismann/Stölzel 2023; Stratmann 2023; Uniper 2023).

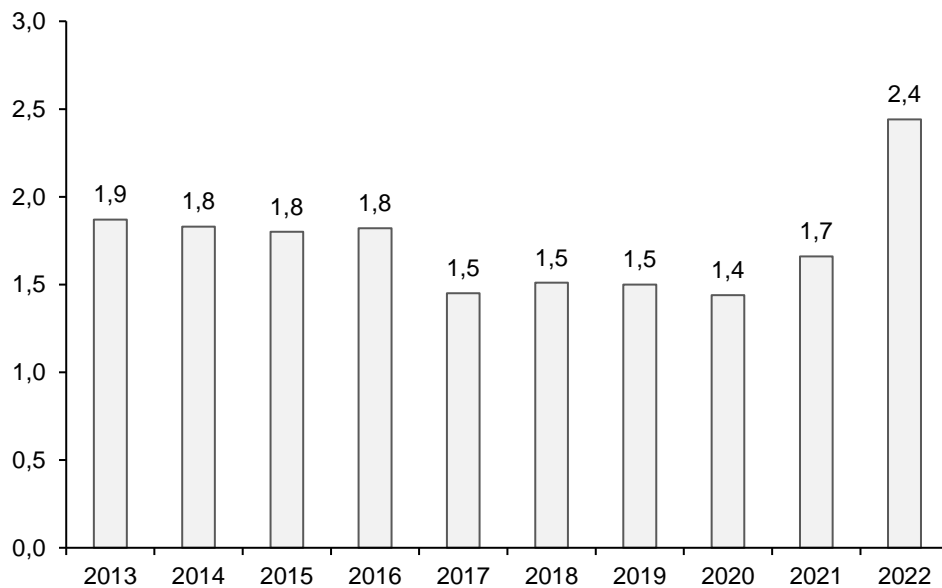
Laut Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung soll bereits bis 2032 ein über 11.000 Kilometer langes Wasserstoffnetz (aus umgestellten und neu gebauten Wasserstoffleitungen) die großen Wasserstoffeinspeiser mit den großen Verbrauchern verbinden (BMWK 2023a). Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff und Wasserstoffkraftwerke werden auf Wasserstoffspeicher angewiesen sein.

Den Langfristszenarien des BMWK zufolge bräuchte man zur Umsetzung der Energiewende bis 2045 Wasserstoffspeicher mit einer Kapazität von 72 bis 74 TWh. Aus heutigem Bestand an Gasspeichern könnte dem Branchenverband Initiative Energien Speichern zufolge eine Wasserstoffspeicherkapazität in Höhe von 32 TWh bereitgestellt werden. Um die Lücke in Zukunft zu schließen, müssten im großen Umfang Gasspeicher umgewidmet oder Wasserstoffspeicher neu gebaut werden (Spiegel Online 2023a).

4.1.2. Umsatz und Produktion

Für den Bereich der Herstellung von Wasserstoff liegen keine statistischen Daten zur Umsatzentwicklung vor, daher wird hier auf Statistiken zur Herstellung von Industriegasen als übergeordnete Kategorie zurückgegriffen. In den Jahren von 2013 bis 2020 hat sich der Umsatz von Produzenten von Industriegasen in Deutschland leicht negativ entwickelt, in 2021 war hingegen ein leichter Aufwärtstrend zu verzeichnen (Abbildung 44). Der signifikante Anstieg der Umsatzerlöse in 2022 (+47% im Vergleich zum Vorjahr) dürfte größtenteils auf gestiegene Preise in einem inflationären Marktumfeld zurückzuführen sein.

Abbildung 44: Umsatz der Hersteller von Industriegasen 2013-2022 (in Mrd. €)



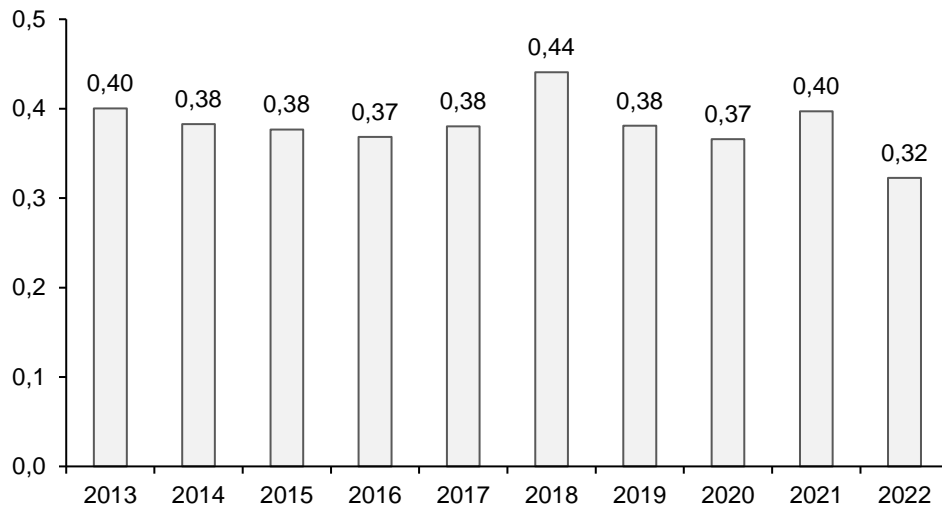
Quelle: Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, August 2023; eigene Darstellung

Hinweis: Betriebe mit 20 und mehr tätigen Personen

Basierend auf der nationalen Wasserstoffstrategie und der damit verbundenen Dekarbonisierung kompletter Wirtschaftszweige (BMWK 2023a, 2023d) ist damit zu rechnen, dass sowohl die Nachfrage nach Wasserstoff als auch der Umsatz in den nächsten Jahren deutlich zunehmen werden.

Abbildung 45 zeigt die vom Verband der Chemischen Industrie (VCI) veröffentlichten Produktionszahlen für Wasserstoff in Deutschland. Seit 2013 ist die Produktion relativ konstant und liegt bei jährlichen Werten zwischen 0,4 und 0,5 Mio. Tonnen. In 2022 wurde dieses Niveau mit 0,32 Mio. Tonnen erstmals unterschritten.

Abbildung 45: Produktion von Wasserstoff 2013-2022 (in Mio. Tonnen)



Quelle: VCI (2023)

Wasserstoff wurde in den letzten Jahren in der industriellen Anwendung als Produktionsmittel zur Herstellung von Ammoniak und Methanol verwendet – als Energieträger kam Wasserstoff bisher weniger zu Einsatz. Die damit verbundene Nachfrage unterlag in den vergangenen Jahren kaum Veränderungen, die Produktionsmenge war somit weitestgehend konstant (EWI 2023).

E.ON beziffert die jährliche Produktionsmenge allein von grauem Wasserstoff in Deutschland für die Jahre 2015 bis 2022 auf Basis eigener Berechnungen des Konzerns auf 1,3 bis 1,5 Mio. Tonnen – und damit dreimal so hoch wie der VCI (ebd.). Auf Basis der Produktionszahlen von E.ON lässt sich der Umsatz in den vergangenen Jahren in einer Bandbreite von rund 1,5 bis rund 4,5 Mrd. Euro abschätzen.

4.1.3. Betriebe und Branchenstruktur

Die Branche zur Herstellung von Industriegasen weist international eine Oligopolstruktur mit wenigen dominierenden Großkonzernen als Anbieter und vielen Nachfragern auf. Auch in Deutschland wird der Markt von wenigen großen Herstellern dominiert. 2021 waren in Deutschland 70 Betriebe bzw. 12 Unternehmen im Bereich der Herstellung von Industriegasen tätig (Steinhaus/Emons 2023). Mehr als Dreiviertel der Betriebe sind Kleinunternehmen mit weniger als 50 Beschäftigten und lokaler bzw. regionaler Marktausrichtung.

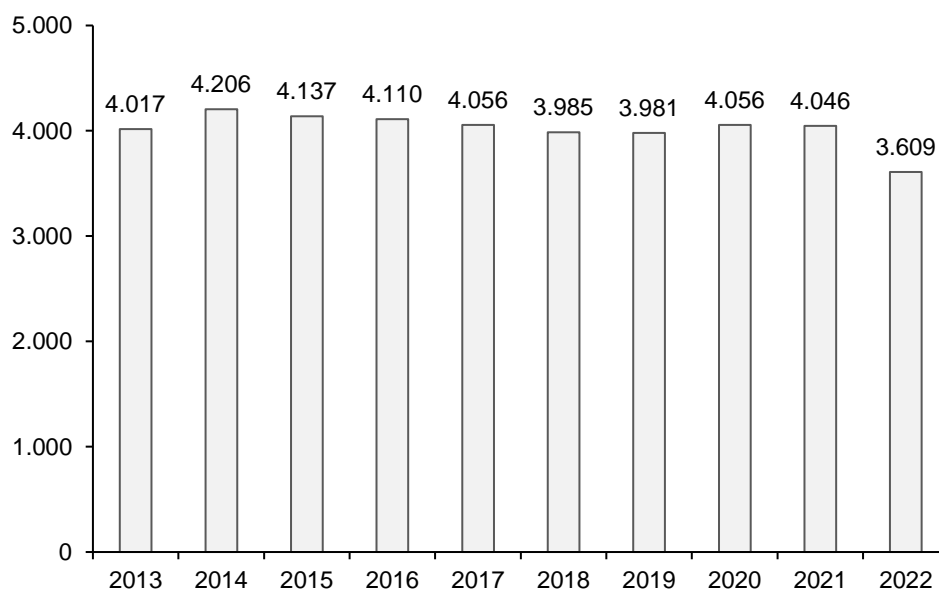
Die Entwicklung der Wasserstoffindustrie steht im Fokus der Politik. Viele Länder haben Förderprogramme aufgesetzt, die auch für Investoren attraktiv sind. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass weitere Anbieter in den Markt eintreten werden, auch wenn der Konzentrationsgrad aktuell hoch ist. Gerade Start-ups nehmen mit Blick auf den Ausbau der Produktionskapazitäten für die Elektrolyse und mit Blick auf Innovationen eine wichtige Rolle

ein (Steinhaus/Emons 2023). Gleichzeitig zeichnet sich eine Veränderung der Produktionsstrukturen ab, da auf der einen Seite zukünftige industrielle Verbraucher grünen Wasserstoffs zur Sicherungsstellung ihres Bedarfs ebenfalls in eigene Elektrolysekapazitäten investieren und auf der anderen Seite hohe Importquoten zur Deckung der massiv steigenden Nachfrage notwendig erscheinen (ebd.).

4.1.4. Beschäftigung

Wie Abbildung 46 verdeutlicht, war die Beschäftigung im Bereich der Herstellung von Industriegasen von 2013 bis 2021 mit rund 4.000 Mitarbeitern konstant. In 2022 waren hingegen knapp 11% weniger Menschen in der Branche beschäftigt als im Vorjahr. Die Beschäftigtenzahl weist somit eine Entwicklung auf, die mit der relativ konstanten und in 2022 abflachenden Produktion korrespondiert.

Abbildung 46: Anzahl der Beschäftigten im Bereich der Herstellung von Industriegasen 2013-2022



Quelle: Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, August 2023

Hinweis: Betriebe mit 20 und mehr tätigen Personen

Exakte Daten zur Beschäftigtenzahl im Bereich der Herstellung von Wasserstoff als Teilbereich der Herstellung von Industriegasen liegen nicht vor, an dieser Stelle wird daher auf vorliegende Schätzungen zurückgegriffen.

Eine Schätzung stammt von „Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking“, einer privat-öffentlichen Forschungsgemeinschaft der Europäischen Kommission für Brennstoffzellen und Wasserstoff. Diese leitet potenzielle Beschäftigungseffekte auf Basis der Quoten von Beschäftigten je 1 Mio. Euro Umsatz vergleichbarer Industrien ab (FCH 2 JU 2019). Konservativ ge-

schätzt werden 7 Mitarbeiter je 1 Mio. Euro Umsatz entlang der Wertschöpfungskette für Wasserstoff angenommen (siehe auch DWV 2019; Roland Berger 2020b).

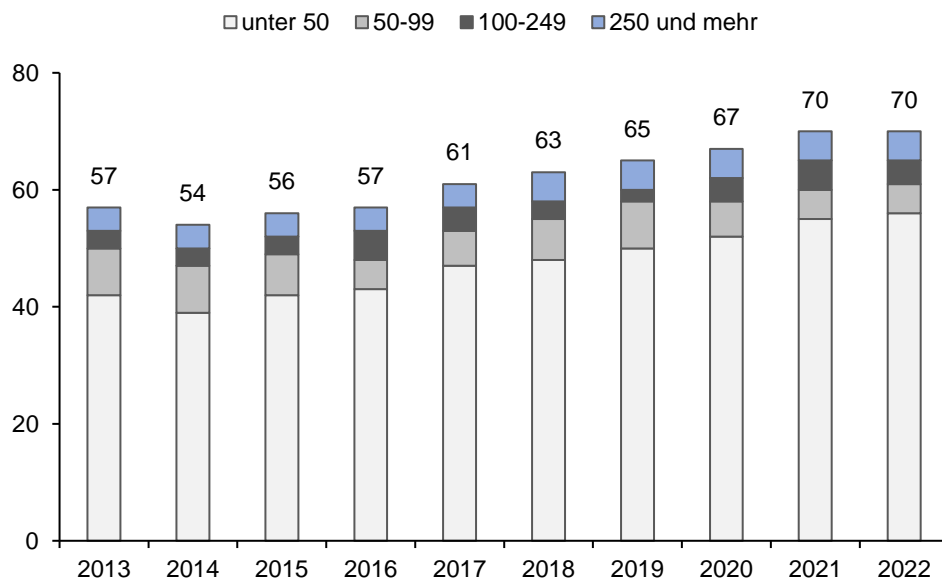
Auf dieser Basis und den oben dargestellten Produktions- und Umsatzzahlen müsste sich eigenen Berechnungen zufolge die Beschäftigung im Bereich der Wasserstoffproduktion in Deutschland in den vergangenen Jahren auf einem Niveau deutlich über 4.200 Mitarbeitern bewegt haben. Diese Zahl entspricht in etwa den Daten des Statistischen Bundesamtes für die Beschäftigung im Bereich der Herstellung von Industriegasen insgesamt.

Da momentan die Produktion grauen Wasserstoffs überwiegt (EWI 2023), entfällt auch ein Großteil der Beschäftigung auf diesen Bereich. Es ist davon auszugehen, dass der Ausbau der Produktionskapazitäten und des Pipeline-Netzes zum Transport von grünem Wasserstoff in den nächsten Jahren zu einem deutlichen Anstieg der Beschäftigtenzahlen in Verbindung mit grünem Wasserstoff führen wird. Beschäftigungseffekte ergeben sich sowohl durch die Wasserstoffproduktion mithilfe der Elektrolyse als auch durch die Speicherung und den Transport von Wasserstoff.⁸

In Abbildung 47 ist die Entwicklung der Anzahl der Betriebe im Bereich der Herstellung von Industriegasen seit 2013 nach Beschäftigtengrößenklassen dargestellt. Während die Anzahl der Betriebe in den vergangenen 10 Jahren stetig angestiegen ist, hat die durchschnittliche Zahl der Beschäftigten pro Betrieb abgenommen. Im Jahr 2013 lag sie noch bei 70 Beschäftigten, im Jahr 2022 ist sie auf 52 Beschäftigte pro Betrieb gesunken. 80% der Betriebe hatten im Jahr 2022 weniger als 50 Beschäftigte.

⁸ In Abhängigkeit von der Wasserstoffnachfrage und vom Umfang der inländischen Bedarfsdeckung in einer Bandbreite von 0 bis 90% schätzen DIW Econ und das Wuppertalinstitut (2020) die damit verbundenen Beschäftigungseffekte bis 2050 zwischen ca. 20.000 und 800.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen. Die Untersuchung bezieht sich jedoch auf die gesamte Wertschöpfungskette der Wasserstoffherstellung, d.h. inkl. der Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien, der Produktion der benötigten Anlagen und aller damit direkt und indirekt verbundenen Vorstufen.

Abbildung 47: Anzahl der Betriebe im Bereich der Herstellung von Industriegasen nach Beschäftigtengrößenklassen 2013-2022



Quelle: Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, August 2023
Hinweis: Betriebe mit 20 und mehr tätigen Personen

4.1.5. Fachkräftesituation

Zurzeit gibt es auf dem deutschen Arbeitsmarkt nur wenige Fachkräfte im Bereich Wasserstofftechnologie. Diese werden vom Markt problemlos aufgenommen, viele offene Stellen bleiben jedoch unbesetzt (Nationaler Wasserstoffrat 2022). Die Situation wird dadurch verschärft, dass sich die gesamte Wirtschaft in einem Umbruch befindet und neue elektrische Verfahren und Prozesse zum Einsatz kommen. Somit steht die Wasserstoffindustrie in Konkurrenz mit verwandten Branchen u.a. aus der chemischen Industrie oder der Energiewirtschaft/Energiesystemtechnik.

Zum Gelingen der Energiewende werden bereits heute Fachkräfte mit speziellen Kenntnissen nachgefragt. Der Bedarf besteht entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Erzeugung, über Infrastruktur, Anlagen, Industrie (v.a. Chemie- und Stahlindustrie), Wärmeversorgung bis hin zu Logistik. Angesichts der zu erwartenden deutlich steigenden Marktdynamik wird auch der Fachkräftebedarf zukünftig deutlich steigen.

Durch den massiven Ausbau grüner Wasserstoffproduktion liegen die personalwirtschaftlichen Herausforderungen im Wesentlichen in der Gewinnung von Fachkräften für neu entstehende sowie expandierende Unternehmen im Bereich der Elektrolyse. Die Bedienung von Elektrolyseuren erfordert spezielle Kenntnisse, eine technische Grundausbildung reicht dafür nicht aus. Benötigt werden Ingenieure mit Elektrolysekenntnissen, Verfahrens- und Elektrotechniker, Fachkräfte für Automatisierung, Maschinenbauer etc. Diese sind aufbauend auf ihrer technischen Grundausbildung im Bereich

Wasserstofftechnologie weiter zu qualifizieren bzw. zu spezialisieren (zum Felde 2022).

Der Fachkräftemangel kann das erwartete Wachstum der Branche ausbremsen, wenn die notwendigen Arbeitskräfte nicht rechtzeitig gewonnen bzw. qualifiziert werden können.

4.2. Auswirkungen der Szenarien

Basierend auf den Szenarien zur wasserstoffbasierten Rohstahlproduktion in Deutschland (Kapitel 3.5) werden nachfolgend benötigte Anlagenkapazitäten sowie Auswirkungen auf Beschäftigung und lohn- und gehaltsbasierte Wertschöpfung im Wasserstoffbereich abgeleitet.

4.2.1. Wasserstoffbedarf und benötigte Anlagekapazitäten

Der Bedarf für grünen Wasserstoff je 1 Mio. Tonnen Rohstahl liegt bei 0,07 Mio. Tonnen Wasserstoff (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2022a). Diesem Wert liegt ein vollständiger Einsatz von direktreduziertem Eisen zugrunde. In der Praxis ist hingegen davon auszugehen, dass zumindest anteilig auch Schrott im EAF/SAF beigemischt wird. Aus Sicht der befragten Experten stellt die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Schrott einen Engpass dar. Prognosen im Hinblick auf die Schrottverfügbarkeit sind somit schwer zu treffen.

Es ist anzunehmen, dass Wasserstoff zukünftig auch in Downstream-Prozessen der Stahlindustrie benötigt wird. Daher wird von einem Wasserstoffbedarf in Höhe von 0,07 Mio. Tonnen pro Tonne Rohstahl ausgegangen.

Industriennahe Insellösungen als Option

Optimale Bedingungen für die Versorgung von Elektrolyseanlagen mit erneuerbaren Energien ergeben sich, wenn die Volllaststunden sowohl für Wind als auch für Solarenergie hoch sind. Dadurch kann gewährleistet werden, dass durchgängig ausreichend Strom zur Verfügung steht und die Elektrolyseanlagen unter hoher Auslastung wirtschaftlicher betrieben werden können. Solche Bedingungen findet man in Deutschland besonders in den Küstengebieten vor, vor allem Offshore in der Nordsee.

In der vorliegenden Studie wird keine Zuordnung bestimmter Stromquellen zu den Elektrolysekapazitäten vorgenommen. Stattdessen wird unterstellt, dass der Strom entsprechend des zukünftigen Strommixes produziert wird. Nach Einschätzung der interviewten Branchenexperten wird bis 2030 in Deutschland die industriennahe Produktion von Wasserstoff in Form von sogenannten „Insellösungen“ – also dem Bau von Anlagen in unmittelbarer Nähe zu den Abnehmern – eine besondere Bedeutung einnehmen.

Technologische Verfahren

Bei den eingesetzten Technologien der Wasserstoffelektrolyse werden drei Verfahren unterschieden:

- Die alkalische Elektrolyse (AEL) erweist sich aufgrund ihrer Langzeitstabilität und Anfälligkeit gegenüber Lastschwankungen als geeignete Lösung für den Einsatz an Standorten mit konstanter Stromversorgung (Küster Simic/Schönfeldt 2022).
- Das Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse-Verfahren (PEMEL) ist weniger anfällig gegenüber Lastschwankungen, jedoch verfügt dieses Verfahren derzeit noch nicht über die technologische Reife der alkalischen Elektrolyse.
- Das Verfahren der Hochtemperaturelektrolyse (SOEL) ist aufgrund der Nutzung von Wärmeenergie zur Spaltung des Wassers mit einem niedrigeren Stromverbrauch verbunden (ebd). Das SOEL-Verfahren ist insbesondere für Insellösungen attraktiv, da sich die hierfür notwendige Wärme aus den durchgeführten industriellen Prozessen nutzen lässt.

Die Verfahren der AEL- und PEM-Elektrolyse sind in der Industrie bereits etabliert, sie verfügen über einen Wirkungsgrad von ca. 70%. Beim SOEL-Verfahren wird potenziell ein Wirkungsgrad von bis zu 84% erreicht, es besteht jedoch weiterer Entwicklungs- und Forschungsbedarf, weshalb ein Einsatz dieser Technologie in industriellen Maßstab noch Zeit braucht (ebd.).

Wasserstoffimporte

Unstrittig ist, dass der Wasserstoffbedarf neben der heimischen Produktion in Deutschland auch durch Importe aus anderen Ländern gedeckt werden muss (siehe hierzu auch Kapitel 3.4). Wesentliche Kriterien für die Ansiedlung von Produktionsstandorten für grünen Wasserstoff ist die Verfügbarkeit von günstigem Strom aus erneuerbaren Energien für die Elektrolyse. Weiterhin ist auch die Infrastruktur für den Transport des Wasserstoffs zu den Abnehmern bspw. den Stahlunternehmen in Deutschland ein entscheidender Faktor.

Als internationale Importpartner bieten insbesondere Südeuropa, aber auch Nordeuropa, die MENA-Staaten, Südafrika und Namibia sowie Australien und Südamerika (Brasilien und Chile) entsprechende Standortbedingungen. Für den südlichen Teil der USA gilt das gleiche, jedoch richtet sich die dortige Produktion gemäß den befragten Branchenexperten vor allem an den nationalen Abnahmebedarfen aus. Im Frühjahr 2023 hat Deutschland bereits ein Abkommen mit Norwegen über eine langfristige Versorgung mit Wasserstoff geschlossen (BWMK 2023h).

Während die internationalen Standorte gute Bedingungen für die Produktion von Wasserstoff bieten, ergeben sich aus Sicht deutscher Abnehmer Nachteile durch den notwendigen Transport. Innerhalb Europas kommt das bestehende Gasnetz für den Transport in Pipelines in Frage. Auch aus Nord-

afrika wird der Transport von Wasserstoff über Pipelines erwartet. Aus Namibia und Südafrika sowie Australien und Südamerika muss der Wasserstoff per Schiff transportiert werden. Für den Mittleren Osten gilt das kurzfristig ebenfalls, wobei hier mittelfristig auch die Nutzung von Pipelines zumindest diskutiert wird. Herausforderungen ergeben sich hier durch politische Unsicherheiten.

Der Transport per Pipeline ist am wirtschaftlichsten, da der Wasserstoff aufgrund des hohen Volumens im gasförmigen Zustand auf dem Seeweg stark verdichtet werden muss. Der Transport des Wasserstoffs in Form von Ammoniak ist heute am stärksten verbreitet. Diese Variante hat den Vorteil, dass durch die chemische Bindung keine energieintensive Verflüssigung stattfinden muss und die bestehende Infrastruktur aus Schiffen, Terminals und Trucks für den Transport von Ammoniak genutzt werden kann. Das „Cracking“, also die Trennung des Wasserstoffs aus dem Ammoniak, führt allerdings zu Energieverlusten von 15 bis 20%. Verglichen mit dem Transport per Pipeline entstehen dadurch höhere Kosten.

Eigenproduktion versus Import von Wasserstoff

Das Verhältnis zwischen heimischer Produktion und Import von Wasserstoff ist nicht nur eine wirtschaftliche, sondern auch eine strategische Frage. Neben den Aspekten der ausreichenden Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und des Einkaufs- bzw. Erzeugungspreises steht auch die Autonomie und Innovationsfähigkeit der heimischen Wasserstoffindustrie im Vordergrund.

Des Weiteren ist bei der Auswahl von potenziellen Importländern die politische Stabilität der betroffenen Länder zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls die Abhängigkeit von spezifischen Importländern in Zukunft zu vermeiden, was durch eine Diversifizierung der Importpartner möglich ist. Unstrittig ist, dass eine europäische und deutsche Wasserstoffindustrie wettbewerbsfähig sein muss.

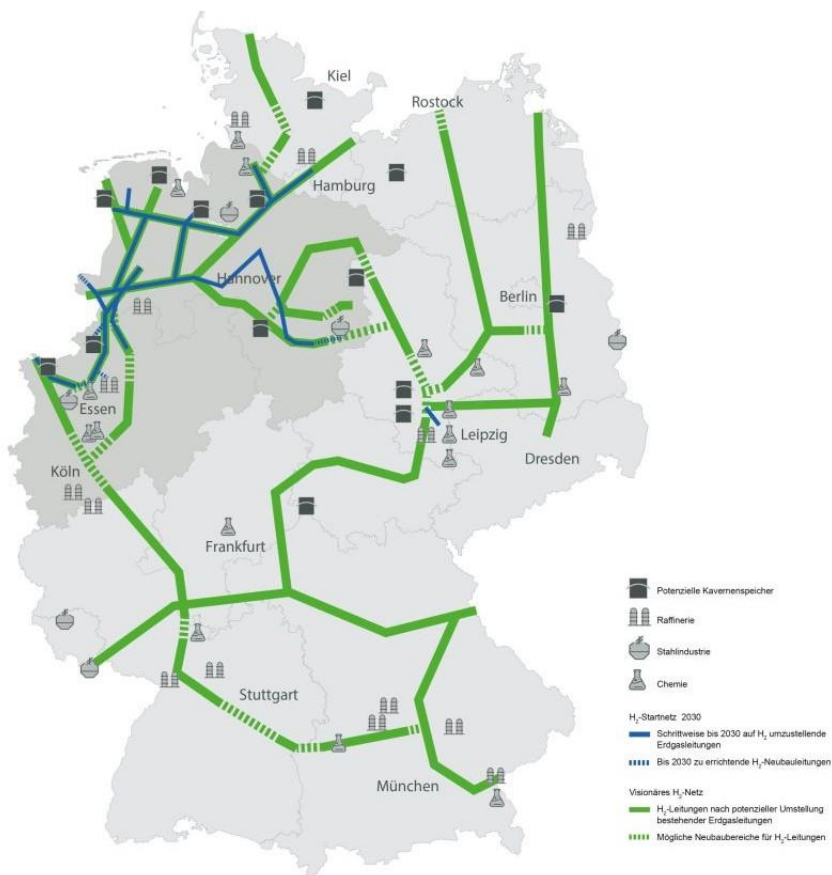
Zum aktuellen Zeitpunkt ist das zukünftige Verhältnis zwischen der Eigenproduktion und dem Import von Wasserstoff noch unklar. Gemäß des derzeitigen Koalitionsvertrages ist bis zum Jahr 2030 eine inländische Elektrolysekapazität von 10 GW geplant, dies ist auch in der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie festgehalten (BMWK 2023a). Stand Februar 2023 sind lediglich 68 MW erreicht (E.ON 2023).

Im Rahmen des „Important Project of Common European Interest“ (IPCEI) bzw. seit 2022 der neuen Leitlinien für Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen (Guidelines on State aid for climate, environmental protection and energy, kurz CEEAG, im Deutschen „KUEBLL“) werden in Deutschland 62 Wasserstoff-Großprojekte gefördert, welche die Errichtung von Elektrolyseuren, Infrastruktur- und Mobilitätsprojekten sowie die Förderung von Industrieprojekten seitens der Großverbraucher von Wasserstoff umfas-

sen. Mit der Umsetzung der Projekte ist eine Erzeugungskapazität von 2 GW geplant (BMF 2022).

Durch Umbau und Umwidmung kann das bestehende Gasnetz in Deutschland für den Transport von Wasserstoff genutzt werden. Die Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas geht davon aus, dass das im Jahr 2050 benötigte Wasserstoffnetz etwa 13.300 Kilometer lang sein muss. Rund 11.000 Leitungskilometer (bzw. 83%) werden vermutlich auf umgestellten Gasleitungen basieren (Abbildung 48; FNB Gas 2021). Der Verband rechnet damit, dass bis 2030 etwa 73% der erwarteten 5.100 Kilometer umgestellte Gasleitungen sind (FNB Gas 2023).

Abbildung 48: Annahme Wasserstoff-Netz 2050



Disclaimer: Bei der Karte handelt es sich um eine schematische Darstellung, die hinsichtlich der eingezeichneten Speicher und Abnehmer keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Quelle: FNB Gas (2021)

Wesentliche Annahmen im Simulationsmodell

Aufgrund der genannten Unsicherheiten bzgl. des kurzfristigen Ausbaus von internationalen Wasserstoffpartnerschaften wird im Simulationsmodell für das Jahr 2030 ein nationaler Produktionsanteil von 60% angenommen. Die

verbleibenden 40% werden insbesondere aus Südeuropa und den MENA importiert werden.

Für den Zeitraum nach 2030 wird davon ausgegangen, dass sowohl die internationalen Produktionskapazitäten deutlich ausgeweitet werden als auch die internationale und nationale Infrastruktur den Transport größerer Mengen Wasserstoff erlaubt. Elektrolyseanlagen werden sich dann vermutlich zunehmend an den Erzeugerregionen für erneuerbare Energien ansiedeln. Hierdurch steigt die Importquote – wie auch in anderen Studien angenommen – im zugrundeliegenden Modell auf 64% (Agora Energiewende 2021b). Durch den technologisch möglichen und wirtschaftlich über Lerneffekte sinnvollen Transport auf dem Seeweg wird zu diesem Zeitpunkt nach Einschätzung der befragten Branchenexperten vermutlich die Bedeutung von Importen aus Namibia und Südafrika sowie Australien und Südamerika zunehmen.

Die benötigte Elektrolysekapazität für die Produktion von Wasserstoff ergibt sich neben den Gigawattstunden aus den Volllaststunden der Elektrolyseanlagen pro Jahr sowie dem Effizienzgrad der Elektrolyseanlage, der zwischen den verschiedenen Technologien abweichen kann. Bzgl. der Volllaststunden der Elektrolyseanlagen gehen bisherige Studien von 4.500 Volllaststunden pro Jahr aus (Agora Energiewende 2021b).

Nach Einschätzung der interviewten Branchenexperten könnte dieser Wert zu niedrig angesetzt sein. An Standorten mit guten Bedingungen für die Erzeugung von Solar- und Windenergie können bei gleichzeitiger Nutzung von Akkukapazitäten potenziell über 8.000 Volllaststunden erreicht werden. Gleichzeitig werden Elektrolyseanlagen aber teilweise nur bei günstigen Strompreisen betrieben, so dass sich aus dieser Sicht die Volllaststunden reduzieren. Im Mittel gehen die Branchenexperten von 5.000 Volllaststunden pro Jahr aus – dieser Wert wurde ins Simulationsmodell übernommen.

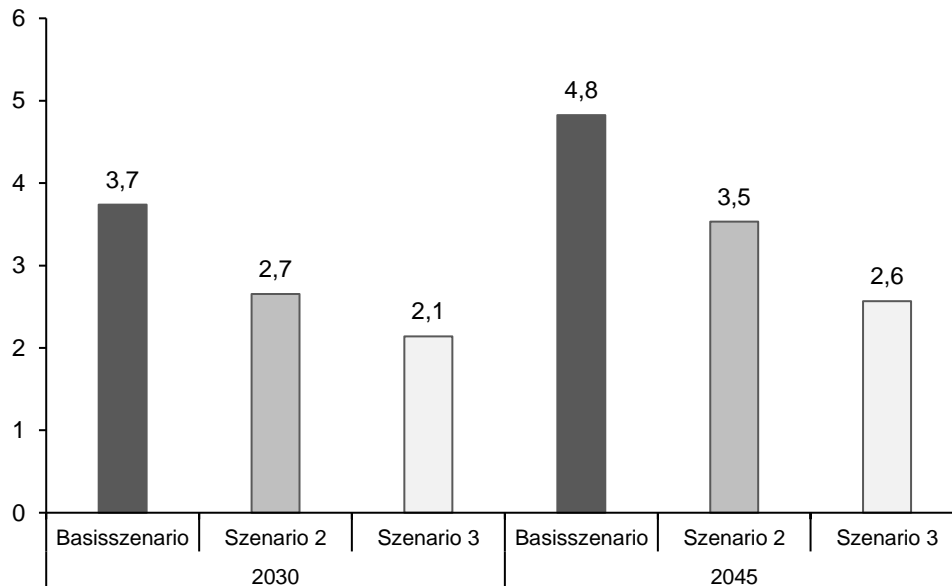
Die Kapazität der Elektrolyseanlagen steht am Anfang einer Skalierungsphase. Die einzelnen Elektrolyseanlagen liegen heute im unteren zweistelligen MW-Bereich und könnten sich bis 2027 in den oberen zweistelligen Bereich bewegen. Ab 2027 sind Anlagen ab 100 MW zu erwarten, langfristig auch im GW-Bereich.

Erforderliche Erzeugungskapazität

Abbildung 49 zeigt die benötigte Produktionskapazität für grünen Wasserstoff innerhalb Deutschlands zur Herstellung grünen Stahls unter der Annahme, dass bei der Elektrolyse ein Wirkungsgrad von 72% erreicht wird. Die Unterschiede zwischen den hier dargestellten Szenarien ergeben sich aus der zugrunde gelegten Produktionsmenge grünen Stahls. Für das Basiszenario der vollständigen Transformation ergibt sich im Jahr 2030 eine benötigte Produktionskapazität für grünen Wasserstoff von 3,7 GW.

Bis 2045 steigt diese nochmals um knapp 30% auf 4,8 GW. Im Szenario 2 liegt die Produktionskapazität im Vergleich zum Basisszenario um mehr als ein Viertel niedriger und im Szenario 3 fast um die Hälfte niedriger.

Abbildung 49: Erforderliche Erzeugungskapazität im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in GW)



Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2. Mögliche Hemmnisse

Für die Wasserstoffindustrie stellt der Fachkräftemangel aktuell und in naher Zukunft die bedeutendste Herausforderung dar. Im Rahmen des notwendigen Ausbaus und der Skalierung der Wasserstoffindustrie werden Fachkräfte (insbesondere Elektro- und Verfahrenstechniker) sowie Ingenieure in den Bereichen der Konstruktion und des Anlagenbaus benötigt. Zusätzlich ergeben sich Personalbedarfe im kaufmännischen Bereich, wobei diese Bedarfe möglicherweise leichter zu decken sind.

Die zentralen Voraussetzungen für das Eintreten des prognostizierten Basisszenarios betreffen insbesondere den Ausbau der erneuerbaren Energien innerhalb Deutschlands, da diese für die Erzeugung von grünem Wasserstoff notwendig sind. Des Weiteren ist die Schaffung einer adäquaten H₂-Infrastruktur essenziell, um die Erzeugerregionen von Wasserstoff mit den Industriestandorten, an denen die wesentlichen Verbraucher ansässig sind, zu verbinden. Dies beinhaltet sowohl den Umbau sowie die Umwidmung des bereits existierenden Gasnetzes in Deutschland als auch den Neubau von Leitungen. Eine mangelhafte Infrastruktur für den Transport von grünem Wasserstoff gefährdet sowohl den Ausbau der Wasserstoffindustrie als auch die Transformation der industriellen Verbraucher von Wasserstoff.

Zudem muss der Transformationsdruck auf die zukünftigen Großverbraucher von Wasserstoff beibehalten werden. Die gezielte Erhöhung der CO₂-

Belastungen stellt ein Mittel hierfür dar. Schließlich muss ein wettbewerbsfähiger Industriestrompreis gewährleistet werden, um sicherzustellen, dass der Industriestandort Deutschland auch weiterhin attraktiv und zukunftsfähig ist. Ein wettbewerbsfähiger Industriestrompreis wird von den interviewten Branchenexperten auf zwischen 4 Cent/KWh und 6 Cent/KWh beziffert.

4.2.3. Beschäftigungseffekte

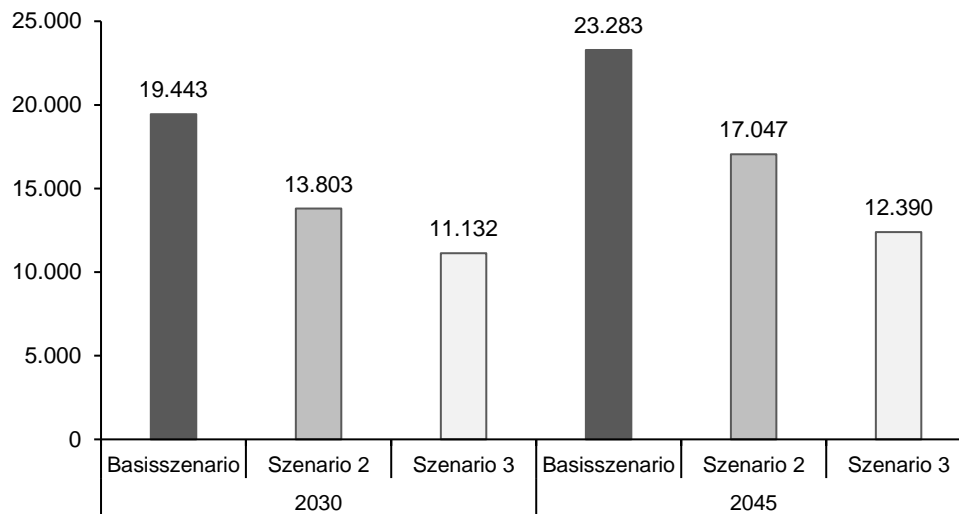
Der Ausbau der Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff bringt zusätzliches Beschäftigungspotenzial in Deutschland mit sich. Sowohl auf europäischer als auch auf Länderebene wurden bereits Prognosen zum Beschäftigungseffekt durch die Ansiedlung einer Wasserstoffindustrie vorgenommen.

Diese zeigen, dass je nach lokaler Wirtschaftsstruktur unterschiedliche Schwerpunkte in der Entwicklung liegen werden. So wird bspw. in Baden-Württemberg insbesondere von Beschäftigungseffekten in der Zuliefererstruktur ausgegangen (Roland Berger 2020b), wohingegen für Brandenburg der Fokus verstärkt auf der Produktion von Elektrolyseuren liegt (DWV 2019). Daraus ergeben sich Beschäftigungseffekte in einer Bandbreite von 117 bis 752 FTE je 100 MW Produktionskapazität.

Die Effekte beziehen sämtliche Wertschöpfungsstufen ein, von der Entwicklung neuer Technologien, der Produktion von Elektrolyseuren und Wasserstoff bis hin zum Transport. Um die unterschiedlichen Wirtschaftsstrukturen zu berücksichtigen, sind die Annahmen zu den Beschäftigungseffekten der regionalen und überregionalen Studien in das Modell dieser Studie eingeflossen. Neben den direkten und indirekten Beschäftigungseffekten ergeben sich darüber hinaus induzierte Beschäftigungseffekte, die aus der Ansiedlung inländischer Wertschöpfung hervorgehen.

Abbildung 50 zeigt die insgesamt zu erwartenden Beschäftigungseffekte in Deutschland ausgelöst durch den Ausbau inländischer Produktionskapazitäten für Wasserstoff. Grundlage für diese Prognosen sind die dargestellten Produktionskapazitäten. Für eine vollständige Transformation der Primärstahlindustrie (Hochöfen) auf Direktreduktionsanlagen ergibt sich ein Beschäftigungseffekt für den Ausbau der Wasserstoffindustrie von knapp 20.000 FTE im Jahr 2030 und weiteren 4.000 FTE bis 2045. Der starke Anstieg bis 2030 spiegelt den ökonomischen Druck und den politischen Willen zur Transformation wider.

Abbildung 50: Beschäftigungseffekte im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in FTE)



Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Dargestellt werden direkte, indirekte und induzierte Effekte insgesamt unter Berücksichtigung einer Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Anlageneffizienz.

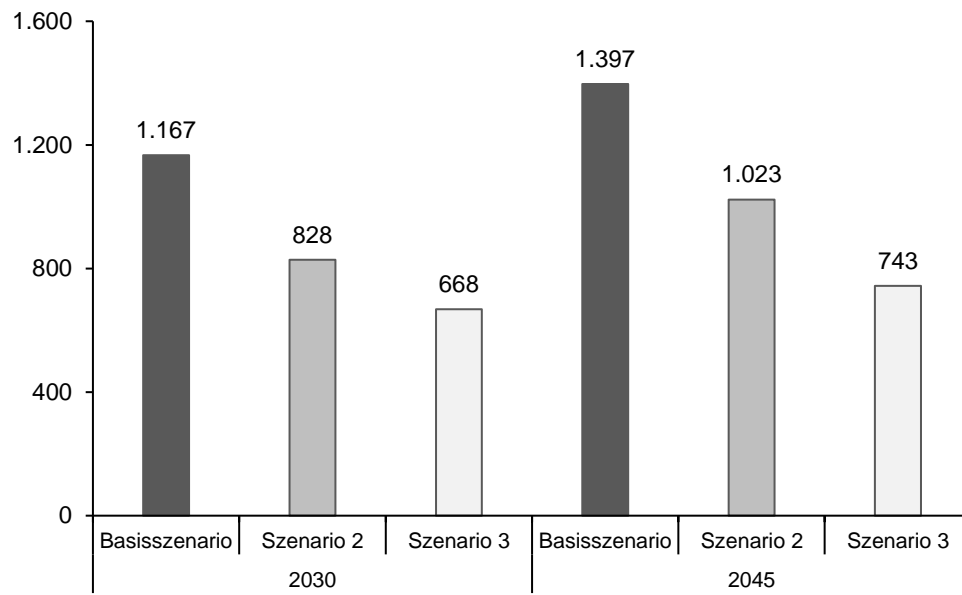
4.2.4. Wertschöpfungseffekte auf Basis von Löhnen/Gehältern

Basierend auf den dargestellten Beschäftigungseffekten lassen sich zusätzliche Wertschöpfungseffekte prognostizieren. Zwecks Vereinfachung werden die für die Jahre 2030 und 2045 berechneten Beschäftigungszahlen mit dem aktuellen durchschnittlichen Bruttojahreseinkommen multipliziert. Für den Bereich Wasserstoff wird ein Bruttojahreseinkommen von 60.000 Euro pro Jahr angenommen (Basisgehalt zuzüglich Umlagen, Pauschalen etc.).

Als Basis für die Berechnung des Bruttojahreseinkommens dient die Erhebung des statischen Bundesamtes hinsichtlich der Verdienste aus dem vierten Quartal 2022 (EVAS-Nummer 62361-0030). Für die Berechnung wurde das arithmetische Mittel des Bruttomonatsverdienstes der Berufsgruppe „Chemie“ verwendet und auf einen Bruttojahresverdienst extrapoliert.

Insgesamt ergeben sich für das Basisszenario, welches die vollständige Transformation der Stahlindustrie voraussetzt, Wertschöpfungseffekte in Höhe von 1,2 Mrd. Euro (2030) bzw. ca. 1,4 Mrd. Euro (2045; Abbildung 51).

Abbildung 51: Wertschöpfungseffekte im Bereich Wasserstoff 2030 und 2045 (in Mio. €)



Quelle: Eigene Darstellung

5. Erneuerbare Energien: Windenergie

5.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation

5.1.1. Die Branche im Überblick

Die Windenergiebranche in Deutschland ist eine vielfältige Industrie, die sowohl Onshore- als auch Offshore-Windkraftanlagen umfasst. Ihr kommt eine maßgebliche Rolle für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende zu.

Die Windenergiebranche ist als Querschnitt verschiedener Branchen zu verstehen, die verschiedenen Wirtschaftszweigen zuzuordnen sind, z.B. Metallverarbeitung, Maschinenbau oder Elektroindustrie (dena 2022; Ludwig et al. 2023).⁹ Sie umfasst zahlreiche Teilbereiche, darunter die Hersteller von Windkraftanlagen bzw. einzelnen Komponenten (u.a. Türme, Rotorblätter, Generatoren), Projektentwickler, Betreiber von Windparks, Netzbetreiber, Wartungs- und Instandhaltungsdienstleister sowie Betriebe der vorgelagerten Wertschöpfungskette, die die notwendige Infrastruktur für den Ausbau der Windenergie in Deutschland beisteuern.

Bekannte Hersteller von Windkraftanlagen sind Unternehmen wie Siemens Gamesa Renewable Energy, Vestas, Nordex und Enercon. Diese Unternehmen sind weltweit tätig und haben ihren Hauptsitz oder wichtige Produktionsstätten in Deutschland. In den letzten Jahren haben sich auch kleinere, lokal ansässige Unternehmen etabliert, die maßgeschneiderte Lösungen für die Windenergiebranche anbieten. Derzeit durchläuft die Windkraftindustrie u.a. aufgrund des gestiegenen Wettbewerbs und aktuell gegebener ökonomischer Bedingungen eine Konsolidierungsphase, die durch Maßnahmen zur Steigerung der Profitabilität und Restrukturierungen geprägt ist (Ludwig et al. 2023).

Regionale Schwerpunkte der Windenergiebranche in Deutschland liegen vor allem in den Küstenregionen der Nord- und Ostsee, wo günstige Windbedingungen und ausreichend Platz für den Ausbau von Windparks vorhanden sind. Einige der wichtigen deutschen Küstenländer wie Schleswig-Holstein und Niedersachsen haben eine hohe Konzentration von Windenergieprojekten und Unternehmen (Ulrich/Lehr 2018).

5.1.2. Installierte Leistung und Stromerzeugung

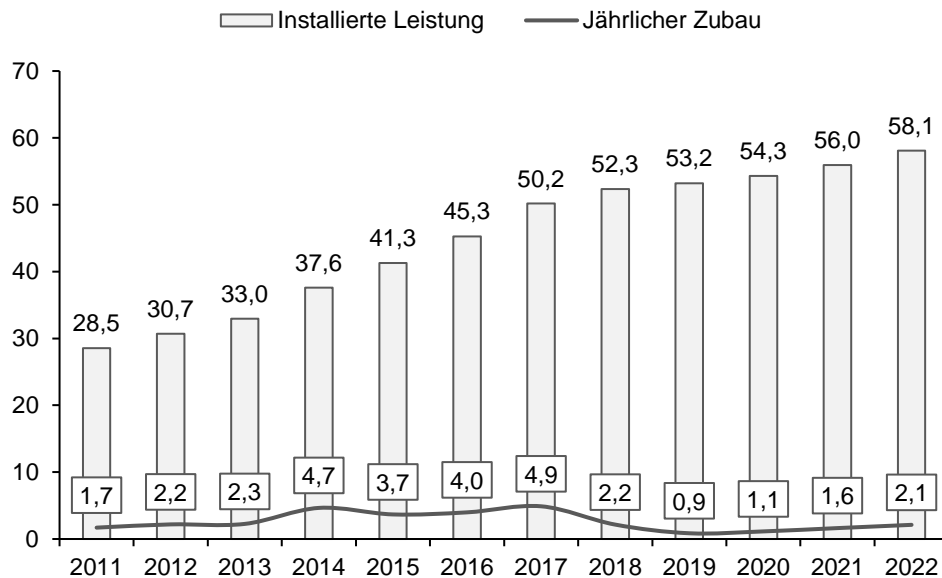
Mit der Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes im Jahr 2022 und dem Windenergie-auf-See-Gesetz hat die aktuelle Bundesregierung ambitionierte Ausbauziele verabschiedet (z.B. Agora Energiewende 2023; BMWK

⁹ Daher gestaltet sich auch die statistische Abgrenzung der Windenergiebranche schwierig. Es gibt keine eigene Wirtschaftszweigklassifikation des statistischen Bundesamtes, spezifische Daten zu Umsatz und Wertschöpfung liegen nicht vor. Als Quelle zur Beschreibung der Branche dienen in erster Linie Erhebungen und Schätzungen von Instituten und Ministerien.

2023e). Um die Energiewende zu meistern, sollen bis 2030 115 GW installierte Leistung im Bereich Onshore und 30 GW im Bereich Offshore erreicht werden, was einem benötigten jährlichen Netto-Zubau von ca. 11 GW pro Jahr entspricht (aktualisierte Berechnung auf Basis von Stecherle et al. 2021). Bei momentan typischen Nennleistungen von 6 MW im Bereich Onshore und 15 MW im Bereich Offshore entspricht dies ca. 1.750 Anlagen an Land und 185 Anlagen auf See, die bis 2030 jährlich neu hinzukommen müssen.

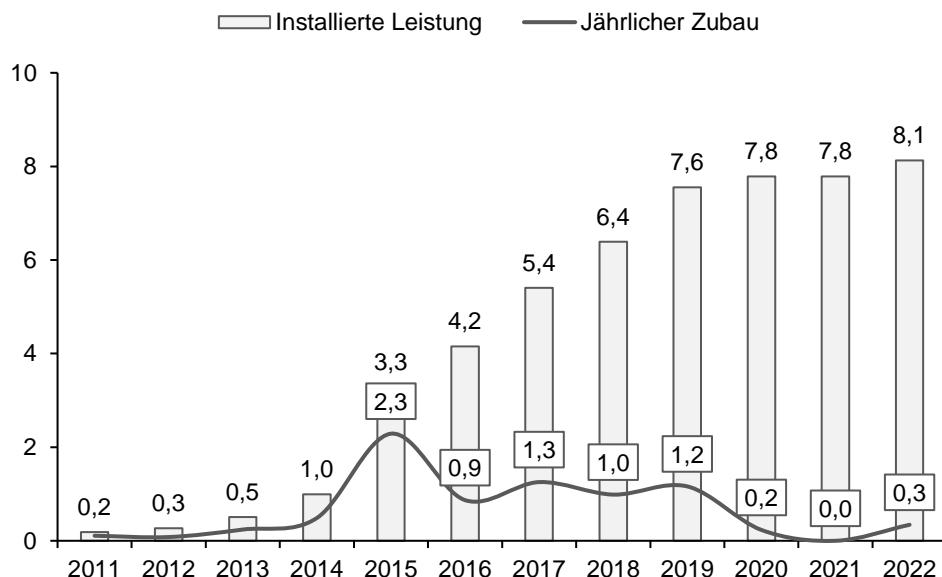
Die jüngste Vergangenheit verdeutlicht die damit verbundene Herausforderung, mit der die Windenergiebranche konfrontiert ist. Während in den Jahren des starken Zubaus in Deutschland jährlich über 6 GW (Onshore + Offshore) an neuer installierter Leistung erreicht wurden, ist der Zubau zuletzt stark zurückgegangen (Abbildung 52 und Abbildung 53).

Abbildung 52: Installierte Leistung und jährlicher Zubau im Bereich Wind Onshore 2011-2022 (in GW)



Quelle: BMWK (2023f)

Abbildung 53: Installierte Leistung und jährlicher Zubau im Bereich Wind Offshore 2011-2022 (in GW)

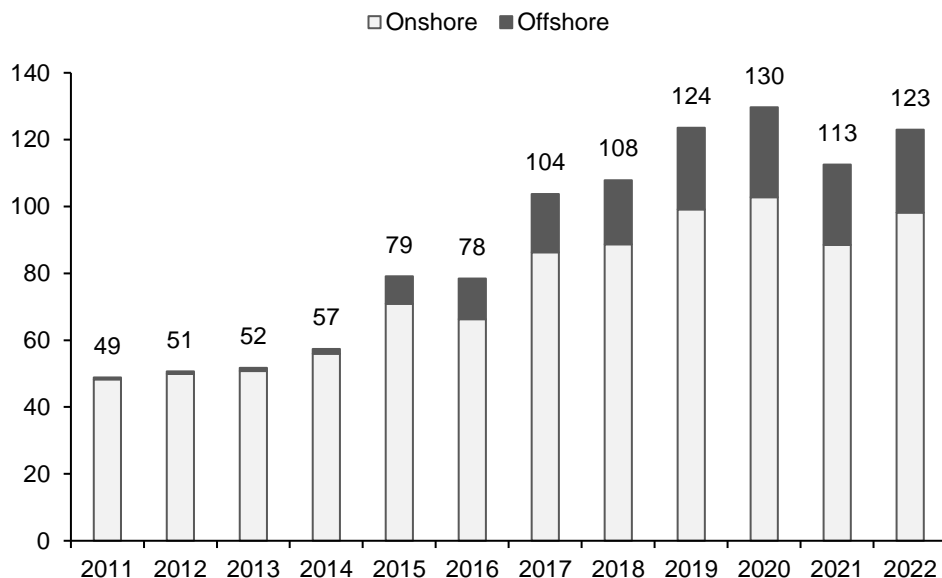


Quelle: BMWK (2023f)

Nettostromerzeugung durch Windenergie

In Abbildung 54 wird die Nettostromerzeugung durch Windenergie in Deutschland in den letzten Jahren veranschaulicht, die mit der installierten Leistung korrespondiert. Durch Windenergieanlagen an Land und auf See wurde im Jahr 2022 eine Strommenge von 123 TWh erzeugt. Gegenüber dem Vorjahr entspricht dies einer Zunahme von etwa 9%, das Niveau von 2020 wird jedoch leicht unterschritten. 2022 deckte die Windenergie rund 23% des deutschen Bruttostromverbrauchs – vor der Braunkohle war sie damit der wichtigste Energieträger im Strommix in Deutschland (Umweltbundesamt 2023a).

Abbildung 54: Nettostromerzeugung durch Windenergie 2011-2022 (in TWh)



Quelle: BMWK (2023f)

Die Gründe für den verlangsamten Zubau sind vielfältig. Eine wesentliche Ursache liegt in der Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes von 2014, die die Attraktivität von Investitionen in die Windkraft nachhaltig gemindert hat. Dies spiegelt sich auch in den festgelegten Mengenzielen wider, die einen jährlichen Zubau von 2,5 GW im Onshore-Bereich und eine feste Begrenzung der neu installierten Anlagen auf 6,5 GW bis 2020 im Offshore-Bereich vorsahen (BMWk 2014).

Darüber hinaus haben langwierige und komplexe Genehmigungsverfahren, nicht ausreichende Stromnetzinfrastruktur und mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz verbunden mit Bürgerinitiativen und Anwohnern, die gegen den Bau von Windkraftanlagen protestiert und geklagt haben, den Zubau verzögert.

Mit der Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2023) und des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG) zum 1. Januar 2023 hat die aktuelle Bundesregierung den politischen Kurs neu ausgerichtet und erste Weichen (wie die Vereinfachung der Genehmigungsverfahren) gestellt. Angesichts der derzeit installierten Leistung von etwa 58 GW im Onshore-Bereich und 8 GW im Offshore-Bereich sowie des jährlich erforderlichen „Rekord-Zubaus“ wird es enorm herausfordernd für die Windenergiebranche sein, die vorgegebenen Ziele zu erreichen.

5.1.3. Beschäftigung

Aufgrund der Schwierigkeit, die Windenergiebranche statistisch abzugrenzen, liegen keine Beschäftigtendaten z.B. des Statistischen Bundesamtes oder der Bundesagentur für Arbeit vor. Es lassen sich aber eine Reihe von

Studien bzw. Institutionen finden, die die Beschäftigung in der Branche schätzen.

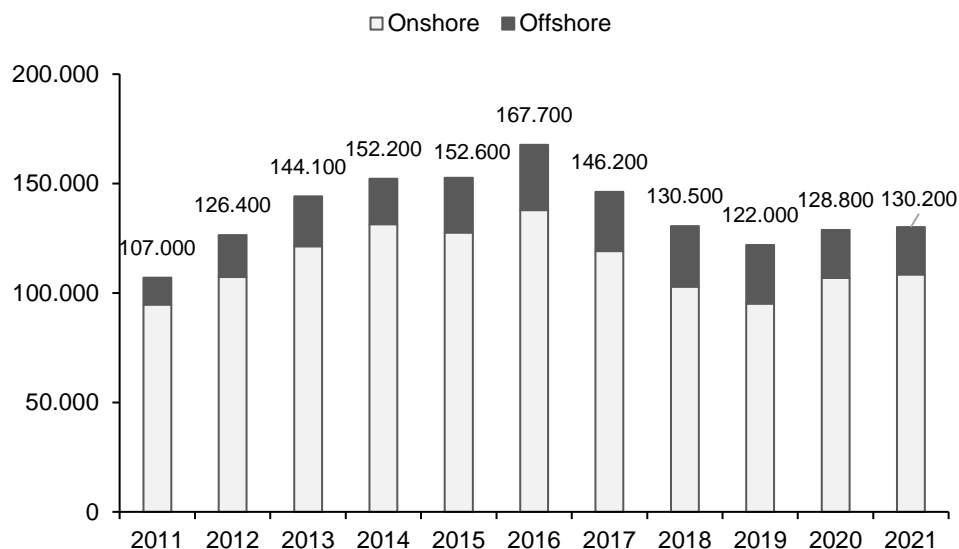
Unterschiedliche Schätzungen zur Zahl der Beschäftigten

Die vorliegenden Schätzungen weichen teilweise erheblich voneinander ab, je nachdem, ob direkte, indirekte oder induzierte Effekte berücksichtigt werden. Auch die Verfahren zur Bestimmung der Größen und Faktoren, die Eingang in das Modell finden, spielen eine Rolle (siehe hierzu Kapitel 2).

Prognos (2019b) beziffert die direkte Beschäftigung in der Onshore-Windkraft im Jahr 2018 im Rahmen einer eher konservativen Schätzung auf rund 64.000 Personen. Für das gleiche Jahr schätzt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK 2022) die Zahl der direkt und indirekt Beschäftigten auf insgesamt rund 103.000 (Bruttobeschäftigung).¹⁰ DIW et al. (2018) wiederum rechnet der Onshore-Windkraft unter Berücksichtigung von induzierten Effekten etwa 120.000 Beschäftigte zu.

Da das BMWK Daten zur Beschäftigung in der Windenergiebranche in Deutschland in Zeitreihen erfasst, wird im Folgenden darauf zurückgegriffen. Der Rückgang des jährlichen Zubaus findet in den Beschäftigungszahlen des BMWK Ausdruck (Abbildung 55). Nahm die Bruttobeschäftigung in der Windenergiebranche insgesamt seit 2010 stetig zu und lag sie 2016 in der Spitze bei ca. 167.000 Beschäftigten, ist sie seitdem um mehr als 20% auf ca. 130.000 Beschäftigte im Jahr 2021 zurückgegangen.

Abbildung 55: Anzahl der Beschäftigten (direkt und indirekt) in den Bereichen Wind Onshore und Offshore 2011-2021



Quelle: BMWK (2022)

¹⁰ De durch das BMWK ermittelte Bruttobeschäftigung bezieht direkte Beschäftigungseffekte durch die Windkraftindustrie und die Anlagenbetreiber und indirekte Effekte in Vorleistungs- und Zulieferunternehmen ein.

Rückgang der Beschäftigtenzahlen

Der Rückgang der Beschäftigung im Bereich Offshore steht in Zusammenhang mit dem Rückgang des Zubaus. So entspricht die Zahl der Beschäftigten in den Jahren 2020 und 2021 mit ca. 22.000 wieder dem Niveau vor den ausbaustarken Jahren 2015 bis 2019. Die Gesamtentwicklung der Beschäftigung im Windenergiebereich wird stark geprägt durch die Entwicklung der Beschäftigung im Bereich Onshore. Aufgrund der größeren installierten Leistung im Onshorebereich ist dort auch der Beschäftigungseffekt stärker, der zudem ebenfalls mit der Entwicklung des Zubaus korreliert.

Zum besseren Verständnis der dargestellten Entwicklungen bietet sich eine differenzierte Betrachtung nach Tätigkeitsschwerpunkten an. Während der Beschäftigungsrückgang in den Bereichen Projektentwicklung und -planung, Produktion und Herstellung sowie Montage und Installation unmittelbar in Zusammenhang mit der Reduktion des jährlichen Zubaus steht, ist der Bereich Betrieb und Wartung in erster Linie von der insgesamt installierten Leistung abhängig. Daher ist der Bereich Betrieb und Wartung trotz des abgeebbten Zubaus ein Wachstumsfeld für Beschäftigung in Deutschland (Ludwig et al. 2023).

Neben den betroffenen eher klein- und mittelständischen Betrieben im Bereich Projektentwicklung und -planung war angesichts des Rückgangs des Zubaus in Deutschland insbesondere der Bereich Produktion mit starken Beschäftigungsverlusten konfrontiert. In diesem Kontext ist die internationale Entwicklung der Windenergiebranche von Bedeutung. Da die weltweite Nachfrage im Gegensatz zum deutschen Absatzmarkt weiterhin stark gestiegen ist, haben viele Windkraftanlagenhersteller ihre Produktionsstätten ins Ausland verlagert.

Diese Investitionsentscheidungen hängen einerseits mit ökonomischen Gründen (u.a. kostengünstigere Produktion, kürzere Transportwege zu Absatzmärkten, höhere Planungssicherheit mit Blick auf die Kapazitätsauslastung) und andererseits mit dem vermehrten Aufkommen von Local-Content-Anforderungen zusammen. Diese Anforderungen schreiben die Fertigung im Inland des jeweiligen Absatzmarkts bei der Vergabe von Aufträgen vor. Als Ergebnis befindet sich z.B. mit der Schließung des Rostocker Werkes des Anlagenherstellers Norder keine Rotorblatt-Produktionsstätte mehr in Deutschland (ebd.).

Neben der nachlassenden Zubaudynamik in Deutschland ist der Rückgang der Beschäftigtenzahlen hierzulande in jüngster Vergangenheit vor allem der allgemeinen Marktlage der europäischen Windkraftanlagenhersteller geschuldet. Keiner der Hersteller verzeichnet im Bereich Produktion momentan Gewinne (dena 2022). Ursachen dafür sind vor allem in den Auswirkungen der COVID 19-Pandemie und dem Krieg in der Ukraine (und damit u.a.

verbundenen gestiegenen Rohstoff- und Logistikkosten bei hoher Inflation)¹¹ sowie dem anhaltenden Konsolidierungs- und Konzentrationsprozess in der Windenergiebranche zu sehen (BWE 2023).¹² Insolvenzen (wie die des deutschen Anlagenherstellers Senvion Ende 2019) haben zu Beschäftigungsverlusten geführt (Witsch 2019).

5.1.4. Fachkräftesituation

In der öffentlichen Wahrnehmung war das Bild der Windenergiebranche in den vergangenen Jahren weniger von der Sorge geprägt, wie sich Fachkräftebedarfe decken lassen, sondern – wie oben beschrieben – vielmehr von Standortschließungen, Insolvenzen und Maßnahmen des Personalabbaus (siehe ausführlich Ludwig et al. 2023). Doch auch in der Windenergiebranche stellen Probleme bei der Besetzung offener Stellen viele Betriebe seit Jahren vor Herausforderungen. Perspektivisch dürfte die zu erwartende und zur Erreichung der beschlossenen Klimaziele erforderliche „Renaissance“ der Branche die Personalsituation verschärfen.

Personalengpässe bzw. -bedarfe bestehen nahezu in allen Berufsfeldern, bspw. bei Anlagenmechanikern, Elektronikern, Mechatronikern, aber auch bei Arbeitsschutzexperten, Servicetechnikern oder Mitarbeitern im Qualitätswesen (dena 2022; Ludwig et al. 2023). Wesentliche Ursachen für Stellenbesetzungsprobleme können auf regionalbedingte generelle Fachkräfteengpässe und den Wettbewerb um Fachkräfte in der jeweiligen Arbeitsmarktre-gion zurückgeführt werden. Die Betriebe der relativ „jungen“ Windenergiebranche, die in den letzten Jahren eher mit Negativmeldungen in den Schlagzeilen war, müssen sich im Wettbewerb um Fachkräfte gegen Betriebe anderer Branchen behaupten.

5.2. Auswirkungen der Szenarien

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der in Kapitel 3.5 skizzierten Transformationsszenarien der Primärstahlindustrie auf den Strombedarf für die Elektrolyse, den daraus resultierenden Bedarf an Anlagenkapazitäten und daraus abgeleitete Beschäftigungseffekte innerhalb der Windenergiebranche in Deutschland dargestellt. Zusätzlich werden damit verbundene lohn- und gehaltsbasierte Wertschöpfungspotenziale ermittelt.

Basis für die Abschätzung und Berechnung der Transformationseffekte ist das eigens entwickelte Simulationsmodell, das die Zeithorizonte 2030 und

¹¹ Der schwedische Energieversorger Vattenfall hat im Juli 2023 aufgrund hoher Inflation und Kostensteigerungen in Höhe von bis zu 40% den Bau eines 1,4-GW-Meereswindparks vor der Küste Großbritanniens gestoppt (Spiegel Online 2023b).

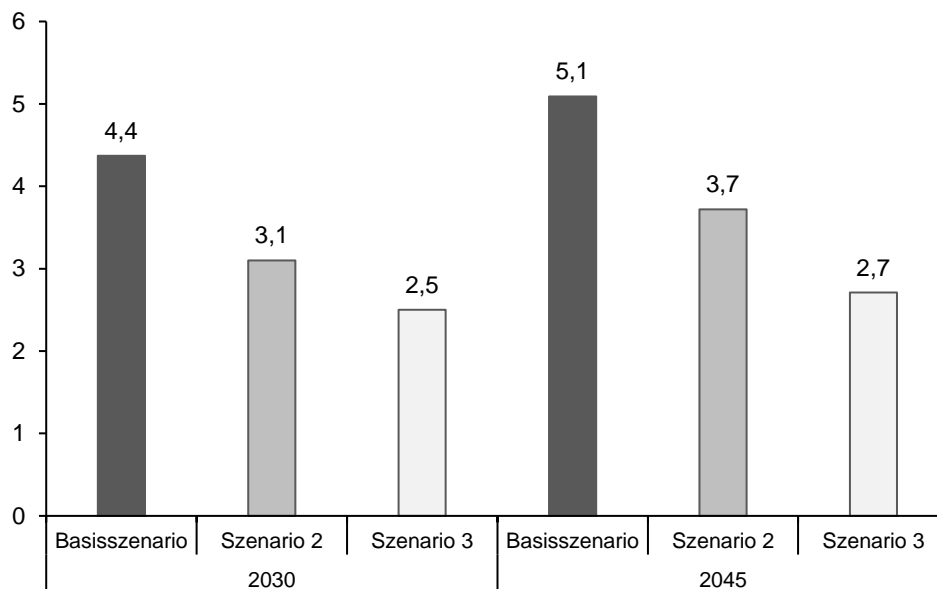
¹² Weitere Gründe für die schlechte Ergebnissituation von Windkraftanlagenherstellern sind darin zu sehen, dass Verträge bisher in Teilen keine Preisgleitklauseln vorsahen (Höpner 2023). D.h. wenn etwa die Kosten für Stahl stark ansteigen, bleiben die Endabnahmepreise für Windkraftanlagen unverändert, da diese bereits Jahre vor der Abnahme festgelegt wurden. Die höheren Kosten bzw. die Defizite haben die Hersteller zu tragen.

2045 abbildet (siehe Kapitel 2.4). Die getroffenen Annahmen wurden durch Interviews mit Experten aus der Windenergiebranche validiert. Schwerpunkt der folgenden Ausführungen ist das Szenario einer produktionsneutralen Transformation der Primärstahlindustrie (Basisszenario).

5.2.1. Strombedarf und benötigte Anlagekapazitäten

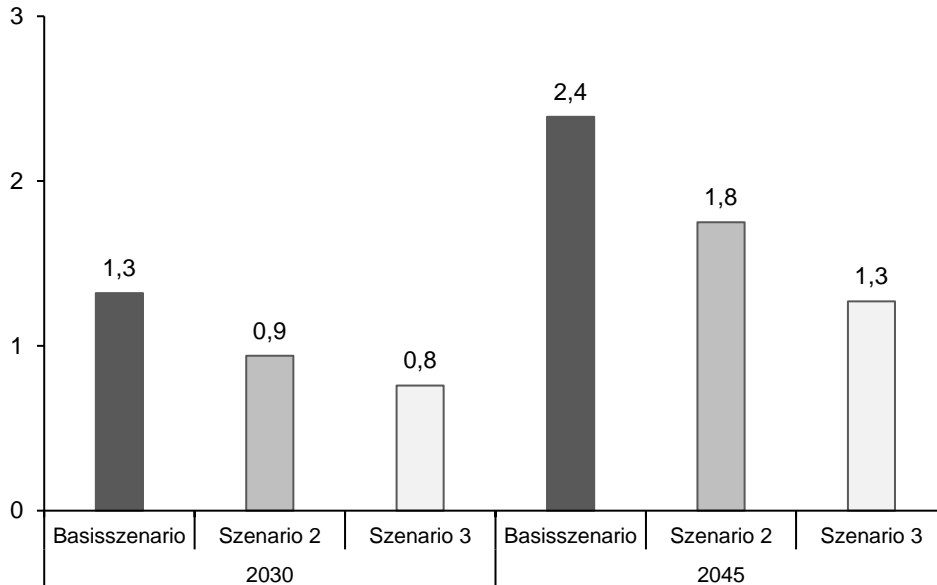
Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen die erforderlichen Anlagenkapazitäten für Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen zur Deckung des Strombedarfs entlang der drei Transformationsszenarien, um grünen Wasserstoff per Elektrolyseverfahren herzustellen. Zunächst wird der Zeitraum bis 2030 betrachtet. Für den Fall einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie wird bis 2030 eine Anlagenkapazität an Land (Onshore) von 4,4 GW und auf See (Offshore) von 1,3 GW benötigt.

Abbildung 56: Erforderliche Anlagenkapazität im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in GW)



Quelle: Eigene Darstellung

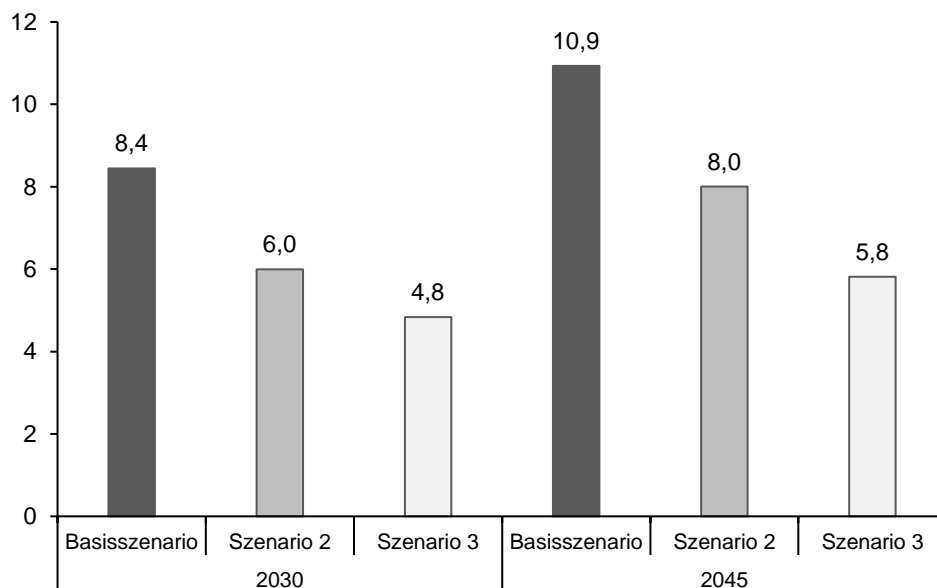
Abbildung 57: Erforderliche Anlagenkapazität im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in GW)



Quelle: Eigene Darstellung

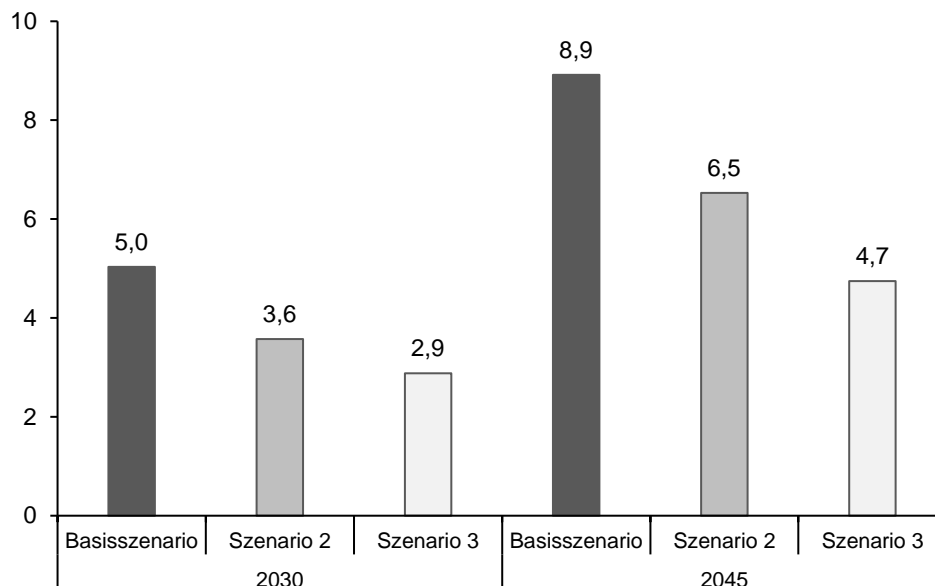
Die notwendige installierte Leistung in den Bereichen Wind On- und Offshore verändert sich proportional zur erforderlichen Nettostromerzeugung (Abbildung 58 und Abbildung 59). Die Annahmen zu den jeweiligen Volllaststunden wurden aus der Studie der Agora Energiewende (2021b) übernommen (Volllaststunden Onshore 2030: 1.932, 2045: 2.150; Volllaststunden Offshore 2030: 3.800, 2045: 3.725).

Abbildung 58: Erforderliche Nettostromerzeugung im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in TWh)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 59: Erforderliche Nettostromerzeugung im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in TWh)



Quelle: Eigene Darstellung

Im Basisszenario ist bis 2030 eine inländische Elektrolyseleistung von 3,7 GW zu realisieren. Annahme dabei ist, dass bei der Elektrolyse ein Wirkungsgrad von 72% erreicht wird (siehe Kapitel 4.2.1). Der errechnete Gesamtstrombedarf für die Elektrolyse beträgt bis 2030 26,0 TWh. Dieser wird im Simulationsmodell anteilig durch die unterschiedlichen Energiequellen Wind Onshore (8,4 TWh), Wind Offshore (5,0 TWh), Photovoltaik (7,8 TWh) und Wasserkraft und Biomasse (zusammengenommen 4,7 TWh) gedeckt.

Zur Bestimmung der jeweiligen Anteile der einzelnen Energiequellen am Strommix im Jahr 2030 wird die Prognose der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ zugrunde gelegt, die die für die Energiewende in Deutschland notwendige Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach unterschiedlichen Energiequellen abschätzt (Agora Energiewende 2021b). Danach beträgt der Anteil von Wind Onshore am Strommix im Jahr 2030 rund 33%, der Anteil von Wind Offshore etwa 19%.

Für die vorliegende Analyse wurde angenommen, dass die von Agora Energiewende (2021b) für das Jahr 2030 prognostizierte Nettostromerzeugung mit Blick auf die Energiequellen Wind und Photovoltaik um jeweils 30% unterschritten wird. Dementsprechend weicht der für das Simulationsmodell unterstellte Strommix leicht von den Berechnungen der Agora Energiewende (2021b) ab.

Diese Annahme basiert auf der Einschätzung vieler Interviewpartner, dass das Erreichen der Ausbauziele in den Bereichen Windkraft und Photovoltaik bis 2030 unrealistisch erscheint. Die Gründe dafür sind vielfältig, im

Vordergrund stehen bürokratische und infrastrukturelle Hürden (siehe unten) sowie der Mangel an Personal und fehlende inländische Produktionskapazitäten. Insbesondere der Verlust an Fertigungstiefe in Deutschland und der derzeitige Fachkräftemangel stellen große Herausforderungen für das Erreichen der Ausbauziele bis 2030 dar (siehe auch Kapitel 5.1.3 und 5.1.4).

Erforderliche Erzeugungskapazität bis 2045

Bis 2045 steigen im Simulationsmodell die für die Elektrolyse erforderlichen Strombedarfe und die dafür notwendigen Anlagenkapazitäten im On- und Offshore-Bereich kontinuierlich an. Für eine vollständige Transformation der Primärstahlindustrie im Basisszenario werden bis 2045 Kapazitäten in Höhe von 5,1 GW im Onshore- und von 2,4 GW im Offshore-Bereich benötigt, um einen Strombedarf für die Elektrolyse in Höhe von 33,5 TWh zu decken.

Den Überlegungen der Agora Energiewende (2021b) folgend ist eine grundlegende Annahme im Modell, dass Wind Onshore im Jahre 2045 einen Anteil am Strommix aus erneuerbaren Energiequellen von rund 33% und Wind Offshore von etwa 27% hat. Die befragten Experten halten dies für plausibel. Den Interviewpartnern zufolge erscheint zudem das Erreichen der (politischen) Zielmarken für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für das Jahr 2045 realistischer als für das Jahr 2030. Aus ihrer Sicht sind die Unternehmen auf lange Sicht eher in der Lage, (erneut) inländische Produktionskapazitäten aufzubauen und Maßnahmen zur Bewältigung des Fachkräftemangels in der deutschen Windenergiebranche zu ergreifen.

Das Modell geht davon aus, dass die Anlagenkapazitäten im Bereich Offshore bis 2030 zunächst geringfügig, aber zwischen 2030 und 2045 stärker ausgebaut werden (Abbildung 57). Hier wird auch die hohe Komplexität beim Ausbau von Offshore-Windkraftanlagen berücksichtigt. Für Investitionsentscheidungen, Planung, Bau, Errichtung der benötigten Infrastruktur und Aufbau der Produktionskapazitäten sind längere Zeithorizonte notwendig als im Onshore-Bereich.

5.2.2. Mögliche Hemmnisse

Im Rahmen der Interviews wurde eine Reihe von Hemmnissen benannt, die den Aus- und Zubau von Windkraftanlagen verzögern und damit eine ausreichende Verfügbarkeit von grünem Strom (zu wettbewerbsfähigen Preisen) gefährden können. Dazu zählen die Komplexität und die Dauer der Planungs- und Genehmigungsprozesse (inkl. Transportgenehmigungen für Sondertransporte¹³), die fehlende Ausweisung von Flächen und die in Teilen unzureichende Stromnetzinfrastruktur.

¹³ Um verschiedene Komponenten einer Windenergieanlage von der Fertigungsstätte zum Projektstandort zu transportieren, sind spezielle Transporte erforderlich. Die Genehmigung dieser Transporte kann mehrere Monate dauern, da vor Transportbeginn Genehmigungen von jeder Gemeinde entlang der Transportroute eingeholt werden müssen (dena 2022).

Ein wesentlicher hemmender Faktor besteht – wie oben angedeutet – in den fehlenden inländischen Produktionskapazitäten, die benötigt werden, um die im EEG 2023 festgelegten Ausbaupfade für Windenergie an Land und auf See zu realisieren. Über viele Jahre waren die Produktionskapazitäten der Anlagenhersteller aufgrund der schlechten Auftragslage nicht ausgelastet, in vielen Fällen wurden keine Gewinne erwirtschaftet (dena 2022; siehe Kapitel 5.1).

Die geringe Marktdynamik, der Kostensenkungswettbewerb (bei gleichzeitigem Anstieg der Herstellungskosten) und vielfach bestehende Planungsunsicherheit haben dazu geführt, dass die Investitionsbereitschaft der Unternehmen gesunken ist. Dies hat den Ausbau der Produktionskapazitäten gehemmt. In den vergangenen Jahren haben diese Faktoren zusammen mit Lieferkettenproblemen (mit Blick auf Komponenten wie Gussteile, Turmsegmente, Elektronik, Chips, aber auch Rohstoffe wie Kupfer und Aluminium) sogar zur Verringerung der Fertigungskapazitäten geführt (ebd.).

Es ist nicht bekannt, dass Anlagenhersteller in der derzeitigen Situation eine Erweiterung oder den Neubau von Werken planen. Sollte die Marktdynamik zunehmen und der Zubau hochlaufen, könnten Produktionssteigerungen vorerst durch eine optimierte Nutzung der vorhandenen Kapazitäten umgesetzt werden, bspw. durch enger getaktete Schichtzeiten in den Produktionsstätten. Für die Realisierung neuer Produktionswerke (inkl. Standortsuche und Genehmigungsverfahren) ist jedoch mit einem Zeitraum von mehreren Jahren zu rechnen.

Ein weiterer hemmender Faktor ist in der fehlenden Speicherinfrastruktur zu sehen. Für die Energiewende müssen in großem Umfang Energiespeicher errichtet werden, die die verfügbare, aber zum Zeitpunkt x nicht benötigte Energie zur späteren Nutzung speichern. Momentan sehr begrenzt ist nach Auskunft der Interviewpartner auch die Verfügbarkeit von Spezialkränen für das Aufstellen von Windkraftanlagen an Land.

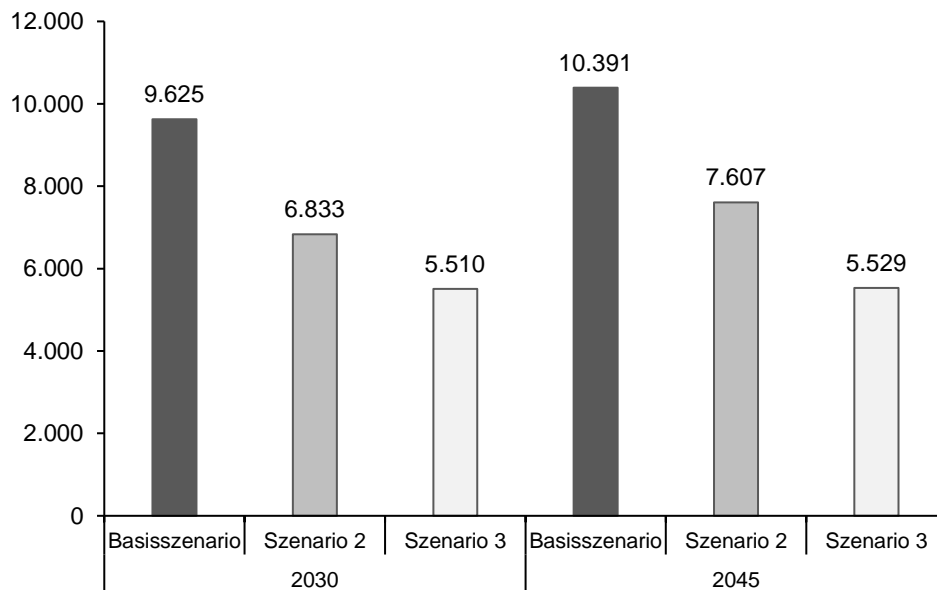
Für die Hersteller von Offshore-Windenergieanlagen sind Häfen von zentraler Bedeutung. Wegen der Größendimension von Offshore-Anlagen und der damit verknüpften Transportanforderungen sind die Produktionsstandorte in der Regel direkt in Häfen angesiedelt. Für die Realisierung von Offshore-Projekten ist sowohl eine leistungsfähige Hafeninfrastuktur (wie Lastenkränen und Verladevorrichtungen) als auch eine ausreichende Bereitstellung von Schiffen notwendig (ebd.). Ein mögliches Hemmnis wären demnach fehlende Investitionen in die Hafeninfrastuktur und Engpässe bei der Verfügbarkeit von Schiffen u.a. infolge des voraussichtlich wachsenden internationalen Handels.

5.2.3. Beschäftigungseffekte

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die Beschäftigungseffekte, die sich aus den für die Elektrolyse im Zuge der Transformation der Primärstahlindustrie benötigten Anlagenkapazitäten für die Stromerzeugung ergeben. Ab-

geschätzt wird die Zahl der Beschäftigten bis 2030 bzw. 2045 unter Berücksichtigung direkter, indirekter und induzierter Effekte. Es werden also nicht nur Beschäftigungseffekte in der Kernbranche Windenergie (Hersteller, Anlagenbetreiber, Projektentwickler etc.), sondern auch in den Vorleistungs- und Zulieferindustrien betrachtet. Zusätzlich werden Beschäftigungseffekte berücksichtigt, die sich im Zusammenhang mit dem Einkommen und den Konsumausgaben der Beschäftigten in der Kernbranche und den vorgelagerten Bereichen ergeben (Multiplikator: 1,3; siehe ausführlich Kapitel 2).

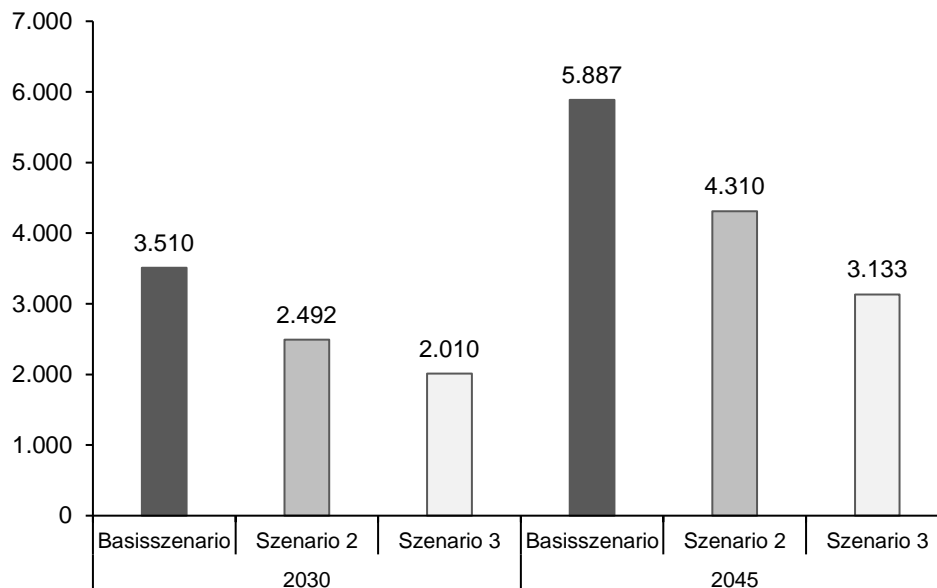
Abbildung 60: Beschäftigungseffekte im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in FTE)



Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Dargestellt werden direkte, indirekte und induzierte Effekte insgesamt unter Berücksichtigung einer Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Anlageneffizienz.

Abbildung 61: Beschäftigungseffekte im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in FTE)



Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Dargestellt werden direkte, indirekte und induzierte Effekte insgesamt unter Berücksichtigung einer Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Anlageneffizienz.

Für das Basisszenario werden im Bereich Onshore bis 2030 Beschäftigungseffekte in Höhe von 9.625 FTE und bis 2045 in Höhe von 10.391 FTE erwartet. Im Bereich Offshore wird mit Beschäftigungseffekten in Höhe von 3.510 FTE bis 2030 und 5.887 FTE bis 2045 gerechnet.

Diese Werte ergeben sich aus der Multiplikation der ermittelten benötigten Anlagekapazität mit den abgeschätzten FTE-Bedarfen pro 1 GW. Die Schätzung geht im Bereich Onshore von einem Bedarf von 2.202 FTE pro 1 GW Leistung bis 2030 und von 2.043 FTE bis 2045 aus. Die entsprechenden Werte für den Bereich Offshore betragen 2.560 FTE (2030) und 2.459 FTE (2045) – jeweils unter Berücksichtigung der Annahme, dass die Arbeitsproduktivität bis 2045 jährlich um 0,5% zunimmt und die Anlageneffizienz bei Offshore-Windkraftanlagen bis 2030 um 3% und bei Onshore-Windkraftanlagen um 1% p.a. steigt (siehe ausführlich Kapitel 2). Die kommerzielle Erzeugung von Strom im Bereich Offshore begann erst Ende der 2000er Jahre. Daher wird angenommen, dass dort größere Potenziale für Effizienzgewinne bestehen als im Onshore-Bereich.

Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Anlageneffizienz

Die Annahme einer Steigerung der Arbeitsproduktivität ergibt sich insbesondere aus Potenzialen in der Standardisierung und Automatisierung von Prozessen entlang der Wertschöpfungskette (Digitalisierung, Einsatz künstlicher

Intelligenz, Weiterentwicklung von Produktionsverfahren). Besondere Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität werden im Bereich Betrieb und Wartung gesehen – durch den Einsatz von Sensoren und künstlicher Intelligenz. Diese Entwicklung könnte in Zukunft zu einem Übergang von präventiver Wartung zu prädiktiver Wartung führen. Anlagen werden dabei nicht mehr in einem regelmäßigen Intervall gewartet, sondern nur noch gezielt nach Feststellung gewisser Anhaltspunkte anhand von Sensoren und einer entsprechenden Auswertung durch Berechnungsmodelle.

Möglichkeiten zur Steigerung der Anlageneffizienz ergeben sich primär durch technologischen Fortschritt und kürzere Produktentwicklungszyklen, die zu einer stetigen Erhöhung der Nennleistungen von Offshore- und Onshore-Windkraftanlagen führen. War die maximale Nennleistung von Windkraftanlagen im Jahre 1980 noch auf 30 KW begrenzt, betrug sie im Offshore-Bereich 2020 bereits 12 MW (BWE 2022). Heutige seriengefertigte Offshore-Windkraftanlagen erreichen bereits eine Nennleistung von 15 MW (Vestas 2023).

Im Modell wurde der Faktor lediglich bis zum Jahr 2030 angewendet, um die Grenzen des Wachstums von Windkraftanlagen auszudrücken, denn die zunehmende Anlageneffizienz ist bislang primär durch die steigende Größe der Anlagen erreicht worden. Die Turmhöhen von Offshore-Windkraftanlagen betragen mittlerweile über 200 Meter (ebd.). Damit erreichen die Anlagen erste Grenzen in der Transportfähigkeit, da sie nicht mehr über den Landweg transportiert werden können, was bspw. zu Einschränkungen bei der Wahl des Produktionsstandorts führt. Auch die Skaleneffekte durch eine Steigerung der Anlagengröße nehmen ab und sind auf absehbare Zeit begrenzt.

Auswirkungen auf „Blue-Collar-Jobs“

Generell werden sich den Interviewpartnern zufolge die dargestellten Beschäftigungseffekte insbesondere bei „Blue-Collar-Jobs“ auswirken. Die Beschäftigung bei Betrieb und Wartung wird weiterhin proportional mit der installierten Leistung wachsen, während das Beschäftigungswachstum in anderen Bereichen (Projektplanung, Herstellung, Montage/Errichtung) in erster Linie von dem jährlichen Zubau abhängig ist. Ungeachtet dessen ist aber auch hier von permanenten Beschäftigungseffekten auszugehen. In den Bereichen Planung, Produktion und Errichtung zeigen sich zwar theoretisch lediglich einmalige Beschäftigungseffekte, durch den kontinuierlichen Zubau, aber auch den notwendigen Ersatz von alten Anlagen werden dauerhaft Arbeitskräfte benötigt.

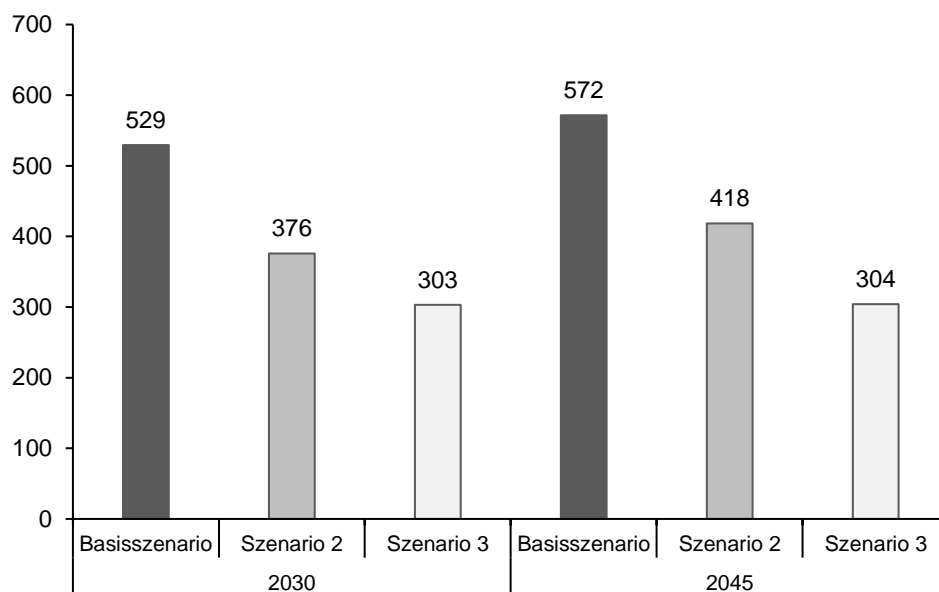
5.2.4. Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt

Aus den abgeschätzten Beschäftigungseffekten lassen sich Wertschöpfungseffekte ableiten. Vereinfacht wird dafür die für die Jahre 2030 und 2045 ermittelte Gesamtbeschäftigtenzahl mit dem aktuellen durchschnittlichen

Bruttojahreseinkommen multipliziert. Für den Onshore-Bereich wird mit einem Bruttojahreseinkommen von im Durchschnitt 55.000 Euro kalkuliert, für den Offshore-Bereich wird ein Bruttoeinkommen von 60.000 Euro pro Jahr angenommen (Basisgehalt zuzüglich Umlagen, Pauschalen in den Bereichen Installation und Wartung). Für den Offshore-Bereich wird ein höherer Wert angesetzt, weil dort andere Zulagenregelungen gelten als im Onshore-Bereich.

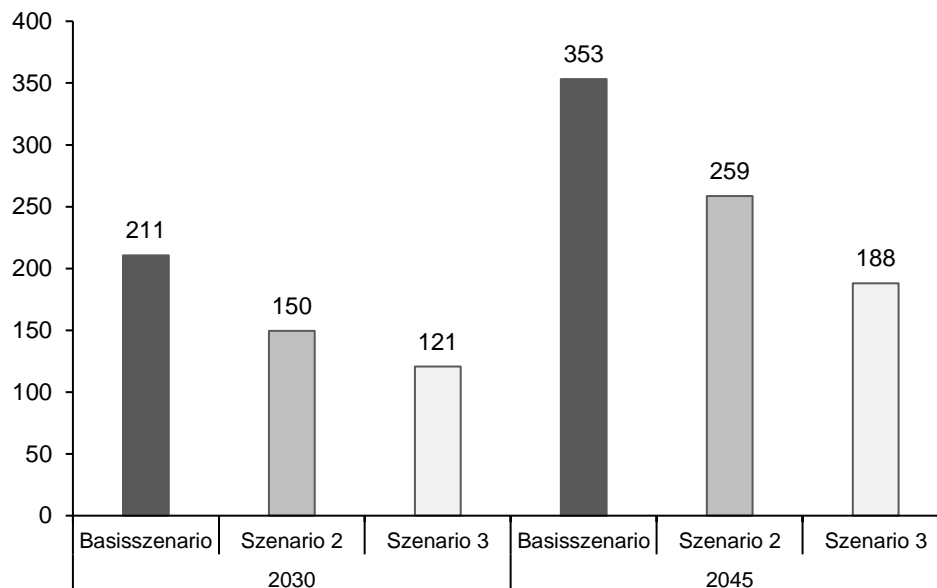
Für die Ermittlung des Bruttojahreseinkommens wurde sich an die bei Siemens Gamesa Renewable Energy geltende Tarifvertragliche Sondervereinbarung (TvSv) und öffentlich verfügbare Gehaltstabellen anderer Unternehmen orientiert. Auf dieser Grundlage betragen die Wertschöpfungseffekte im Bereich Onshore im Basisszenario 529 Mio. Euro (2030) bzw. 572 Euro (2045; Abbildung 62). Mit Blick auf den Offshore-Bereich ist von Wertschöpfungseffekten in Höhe von 211 Mio. Euro (2030) bzw. 353 Mio. Euro (2045) auszugehen (Abbildung 63), die sich aus der vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie ergeben.

Abbildung 62: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt im Bereich Wind Onshore 2030 und 2045 (in Mio. €)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 63: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt im Bereich Wind Offshore 2030 und 2045 (in Mio. €)



Quelle: Eigene Darstellung

5.3. Die Windenergiebranche als Abnehmer von Stahl

Neben der vorgelagerten Position der Windenergiebranche als Energieerzeuger für Elektrolyse von grünem Wasserstoff zur Transformation der Stahlindustrie ist die Windenergiebranche gleichzeitig auch Teil der nachgelagerten Wertschöpfungskette als Abnehmer von Stahl und daraus erzeugten Produkten. Insbesondere Türme von Windkraftanlagen und Offshore-Fundamente bestehen zu einem großen Teil aus Stahl.

5.3.1. Stahlnachfrage insgesamt

Je nach Modell und Standort (Onshore/Offshore) unterscheiden sich Windkraftanlagen in Bezug auf Leistung und Materialbedarf. Nach Angaben des Zentrums für Windenergieforschung „For Wind“ und des Bundesverbandes Windenergie werden für den Bau einer Windenergieanlage an Land pro 1 MW Leistung etwa 100 Tonnen Stahl benötigt (Todtmann 2022).

Bei einer durchschnittlichen Nennleistung von 6 MW (siehe Kapitel 5.1.2) entspräche der Stahlbedarf demnach ca. 600 Tonnen Stahl. Nach Angaben des Windkraftanlagenherstellers Siemens Gamesa Renewable Energy sind für eine moderne Onshore-Anlage in starker Abhängigkeit von der Turmhöhe sogar 500 bis 800 Tonnen Stahl erforderlich (Schwichtenberg 2022).

Für Offshore-Anlagen ist der Stahlbedarf pro Anlage aufgrund größerer Turmhöhen und benötigter Stahlfundamente mitunter deutlich höher. Bereits die Fundamente können in Abhängigkeit zur Wassertiefe, Bauart und standortspezifischen Bedingungen über 900 Tonnen wiegen (Dillinger Hüttenwerke 2023). Die durchschnittliche Betriebsdauer von Windkraftanlagen auf

Land und See variiert ebenfalls und liegt meist zwischen 20 und 30 Jahren (Schwichtenberg 2022; ENBW 2023).

Für die Erreichung des in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ genannten Ziels von 145 GW installierter Onshore-Anlagenkapazität und dem beschlossenen Ausbauziels von 70 GW installierter Offshore-Anlagenkapazität durch das Wind-Energie-auf-See-Gesetz ergibt sich somit ein Gesamtbedarf an Stahl von ca. 25 Mio. Tonnen (15,7 Mio. Tonnen für Bereich Onshore; 9,3 Mio. Tonnen für Bereich Offshore), was einen jährlichen durchschnittlichen Bedarf von ca. 1,1 Mio. Tonnen entspricht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vereinfachte Hochrechnung des Gesamt- und jährlichen Stahlbedarfs bis 2045 (in Mio. Tonnen)

| | Onshore | Offshore (inkl. Fundament) |
|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Stahlbedarf pro Anlage | 650 Tonnen | 1.050 Tonnen |
| Stahlbedarf pro Fundament | - | 950 Tonnen |
| Angenommener Ausbau bis 2045 | 145 GW | 70 GW |
| Angenommene Nennleistung der Anlagen | 6 MW | 15 MW |
| Bedarf an Anlagen bis 2045 | 24.167 | 4.667 |
| Stahlbedarf bis 2045 | 15,7 Mio. Tonnen | 9,3 Mio. Tonnen |
| Zeithorizont | 22 Jahre | |
| Stahlbedarf pro Jahr | 0,7 Mio. Tonnen | 0,4 Mio. Tonnen |

Quelle: Eigene Darstellung

Bei dieser Hochrechnung wird ein Stahlbedarf von 650 Tonnen pro Onshore-Anlage und 2.000 Tonnen pro Offshore-Anlage und momentan marktübliche Nennleistungen von 6 MW bzw. 15 MW angenommen. Des Weiteren wird die vereinfachte Annahme getroffen, dass alle bisher installierten Anlagenkapazitäten im Zeitraum bis 2045 aufgrund der erwarteten Betriebsdauer substituiert werden müssen und somit die angenommenen Ausbauziele mit den zu installierenden Anlagenkapazitäten gleichzusetzen sind.

Bei einer jährlichen Rohstahlproduktion von rund 40 Mio. Tonnen in Deutschland entspricht somit der jährliche Stahlbedarf für die zur Erreichung der Ausbauziele benötigten Windkraftanlagenkapazitäten allein ca. 2,7% der inländischen Gesamtproduktion. Zur Einordnung dieser Größe muss berücksichtigt werden, dass die deutsche Stahlproduktion die größte innereuropäische Produktion darstellt und der Gesamtbedarf für die europäische Energiewende weitaus höher liegt.

In einer Analyse beziffert Siemens Gamesa Renewable Energy diesen Bedarf für Europäische Union auf 120 Mio. Tonnen Stahl bis 2050 (Eickholt 2022). Im Kontext der gestiegenen Relevanz einer Unabhängigkeit von nicht-europäischen Handelspartnern kommt der deutschen Stahlindustrie somit eine wichtige Rolle der Sicherstellung des benötigten Rohmaterials für

die Bewältigung der europäischen Energiewende zu. Gleichzeitig unterstreicht dieser Bedarf die von Interviewpartnern gegenüber der Politik geforderten Sicherstellung außer-europäischer Lieferketten, da der direkte, an die benötigten Anlagenkapazitäten gekoppelte Bedarf nur einen Bruchteil des Gesamtbedarfs an Stahl für die europäische Energiewende, aber auch für andere Industriebranchen darstellt.

5.3.2. Nachfrage nach grünem Stahl

Neben den allgemeinen Faktoren wie Qualität, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Lieferanten ist der Preis ausschlaggebend für die Nachfrage nach Stahl durch die europäische Windkraftbranche.

Insbesondere die durch die COVID 19-Pandemie gestiegenen Rohstoff- und Logistikkosten haben bei den Herstellern von Windkraftanlagen für große Verluste gesorgt (siehe Kapitel 5.1). Um dieser Entwicklung künftig Rechnung zu tragen, haben viele Hersteller ihre Lieferketten unter dem Aspekt Kosten optimiert. Ergebnis dieser Optimierungen waren oftmals die Verlagerung von Produktionsstandorten ins Ausland, entweder aufgrund bürokratischer Hürden wie im Falle der Schließung des Rotorblattwerkes des Anlagenherstellers Nordex in Rostock oder aufgrund geringerer Lohn- und Transportkosten bzw. besserer infrastruktureller Bedingungen (siehe z.B. NDR 2022).

Daher ist für die Nachfrage nach grünem Stahl seitens der deutschen Windkraft die Aussteuerung der Mehrkosten durch eine ggf. teurere Stahlproduktion und dem damit verbundenen höheren Stahlpreis für Abnehmer ein entscheidender Faktor. Nach Schätzungen von Agora Energiewende (2021a) könnte der Preis für grünen Stahl zwischen 250 und 300 Euro pro Tonne – im Schnitt also um ca. 275 Euro pro Tonne – höher liegen als der für grauen Stahl.

Basierend auf den zuvor getätigten Annahmen würden sich bei einer Offshore-Anlage Mehrkosten von 500.000 Euro ergeben, für eine Onshore-Anlage würden sie 162.500 Euro betragen (unter Annahme von 250 Euro Mehrkosten pro Tonne Stahl). Diese Mehrkosten müssten für die Anlagenhersteller an anderer Stelle kompensiert werden, um grünen Stahl wettbewerbsfähig zu machen.

Mögliche Wiederansiedlung von Produktionsstandorten

Eine Möglichkeit wäre die Erzielung von Skaleneffekten durch die Vermeidung von Transportkosten. Dazu müssten zunächst günstige Bedingungen zur Wiederansiedlung in Deutschland für die ins Ausland abgewanderten Produktionsstandorte der Windkraftindustrie geschaffen werden. Ein positives Beispiel ist die Offshore-Endfertigung des Anlagenherstellers Siemens Gamesa Renewable Energy in Cuxhaven. Die Stadtregierung hatte sich aktiv für die Ansiedlung eingesetzt und unter anderem den Ausbau der notwendigen Hafeninfrastruktur zur Steigerung der Attraktivität als Standort voran-

getrieben (Preuß 2021). Neben der gesteigerten Nachfrage an grünem Stahl des Produktionsstandorts Deutschland würden diese Neuansiedlungen der Windkraftindustrie auch für weitere Wertschöpfung in Deutschland sorgen. Oberbürgermeister Santjer von der Stadt Cuxhaven spricht zum Beispiel in diesem Fall von 0,6 bis 0,8 weiteren Arbeitsplätzen pro Mitarbeiter im Werk.

Profiteur des Beispiels aus Cuxhaven war zum Beispiel auch unmittelbar die deutsche Stahlindustrie, denn mit dem Tochterunternehmen Steelwind in Nordenham, ist der Stahlproduzent Dillinger Hütte eine der größten Lieferanten von Stahlfundamenten für Offshore-Windkraftanlagen (FAZ 2023), insbesondere auch für Anlagen des Herstellers Siemens Gamesa Renewable Energy (Dillinger Hüttenwerke 2023).

Qualitative Ausschreibungskriterien

Ein alternativer Ansatz zur gezielten politischen Förderung der verarbeitenden Windkraftindustrie und vorgelagerten Industrien in Deutschland, um die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Stahl durch lokales Sourcing aufrechtzuerhalten, besteht darin, die Nachfrage bei den Endabnehmern, wie Windparkbetreibern und Projektierern, zu fördern.

Eine Möglichkeit hierfür wäre eine Anpassung der Ausschreibungskriterien mit einem Fokus auf Nachhaltigkeit und dem CO₂-Fußabdruck der Projekte. Dieser Ansatz wurde bereits teilweise im Windenergie-auf-See-Gesetz umgesetzt. Danach müssen Bieter bei Ausschreibungen nun neben dem Gebotswert auch den „Beitrag zur Dekarbonisierung des Ausbaus der Windenergie auf See“ in ihrer Projektbeschreibung erläutern. Allerdings wird vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft kritisiert, dass der Begriff selbst und die erforderlichen Unterlagen zur Beurteilung dieses Kriteriums nicht klar genug definiert sind (bdew 2022).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Nachfrage nach grünem Stahl von Seiten der Windkraftindustrie in Deutschland hauptsächlich davon abhängt, welche zusätzlichen Kosten damit verbunden sind, wer dafür aufkommt und wie regulatorische Rahmenbedingungen gestaltet sind. Wenn die Politik durch Fördermaßnahmen die Wiederansiedlung von Produktionsstandorten der Windkraftbranche attraktiver gestaltet und damit kosteneffizienteres lokales Sourcing für Windkraftanlagenhersteller im Vergleich zum Ausland ermöglicht oder durch Gesetzesänderungen die Vergabe von Ausschreibungen beeinflusst, indem sie den Einsatz von grünem Stahl positiv berücksichtigt, wird sich die Nachfrage nach grünem Stahl nachhaltig erhöhen.

6. Erneuerbare Energien: Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse

6.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation

6.1.1. Die Branche im Überblick

Neben Windkraft umfasst die Branche der erneuerbaren Energien weitere Technologien zur nachhaltigen Energieerzeugung, darunter Photovoltaik (PV), Wasserkraft und Biomasse.¹⁴ Auch diese spielen eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und der Verringerung der Treibhausgasemissionen.

Photovoltaik bezieht sich auf die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie mithilfe von Solarzellen. Kern der PV-Anlagen sind PV-Module auf Basis siliziumbasierter Technologien (dena 2022). Bei der Energieerzeugung durch Wasserkraft wird die Energie des fließenden oder fallenden Wassers genutzt, während bei der Erzeugung von Wärme oder Strom durch Biomasse erneuerbare organische Materialien wie Holz, Pflanzenreste oder biologische Abfälle (etwa Ernterückstände oder Tierdung) verwendet werden.

Zu den deutschen Herstellern von Solarmodulen gehören bspw. Hanwha Q Cells, Antec Solar, Axitec, AxSun, Heckert Solar oder Solarwatt. Regionale Schwerpunkte der Branche sind u.a. Bayern und Baden-Württemberg, dort sind eine Reihe von Photovoltaikherstellern ansässig. Die leistungsstärksten Wasserkraftwerke werden in der Regel von den großen Energiekonzernen oder Stadtwerken betrieben. Biomasseanlagen verteilen sich auf ländliche Gebiete quer durch Deutschland, da sie auf landwirtschaftlichen oder forstwirtschaftlichen Abfällen basieren und von land- und forstwirtschaftlichen Betrieben betrieben werden (Bundesnetzagentur 2023).

Starker Markteinbruch seit 2011

Deutsche Solarzellenhersteller gehörten Anfang der 2000er Jahre zu den weltweit führenden in der Entwicklung und Produktion von PV-Modulen, Wechselrichtern, Speichersystemen und anderen Komponenten für erneuerbare Energien. Nachdem der Deutsche Bundestag im Jahr 2011 eine umfassende Novelle des EEG angekündigt hatte, die u.a. eine Neuregelung der Boni-Systeme für die Bioenergie, Veränderungen bei den Einspeisetarifen

¹⁴ Die statistische Abgrenzung der Teilbranchen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse ist schwierig. Für die Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen gibt es zwar eine eigene Wirtschaftszweigklassifikation (WZ 26.11.1), die Installation und Montage von Solarmodulen wird jedoch nicht eigens erfasst. Für die Bereiche Wasserkraft und Biomasse gibt es auch keine eindeutig zuordenbare Klassifikation. Als Quelle zur Beschreibung der Teilbranche werden daher Erhebungen und Schätzungen von Instituten und Ministerien herangezogen. Daten zu Umsatz und Wertschöpfung liegen nicht vor.

und eine starke Kürzung für die Photovoltaik (Absenkung der Vergütungssätze) vorsah, kam es in Deutschland zu einem starken Markteinbruch, die Zahl der Neuinstallationen ging rapide zurück. Zur gleichen Zeit drängten chinesische Hersteller auf den Markt, die staatlich stark subventioniert wurden (z.B. dena 2022). Es kam zu einem extremen Preisverfall von Photovoltaikmodulen, wodurch zahlreiche deutsche Hersteller ihren Rückzug vom Markt verkündeten, darunter Q-Cells, Solar Millennium, Solarhybrid und später auch SI Module und Schott Solar (Enkhardt 2019; Vorholz 2012).

Gab es im Jahr 2012 nach Angaben des Bundesverbands Solarwirtschaft (BSW) rund 350 Hersteller von Solarzellen in Deutschland, existierten 2019 nur noch wenige Dutzend (Reimer 2019). Heute kommen sieben der zehn weltweit größten Solarzellenhersteller aus China (Photovoltaik One 2022; Fell 2023).

Deutschland und Europa importieren den größten Teil der installierten PV-Module und Vorprodukte. Die wenigen hierzulande vorhandenen Produktionskapazitäten konzentrieren sich meist auf die Modulfertigung, die Herstellungsvolumen liegen in der Regel deutlich unter 1 GW pro Jahr (dena 2022). Nach Einschätzung des Fraunhofer ISE (2023) haben deutsche Maschinenbauer, Material- und Komponentenhersteller sowie F&E-Einrichtungen im PV-Sektor durch Qualität, Spezialisierung und Technologievorsprung dennoch eine gute Position im Markt.¹⁵

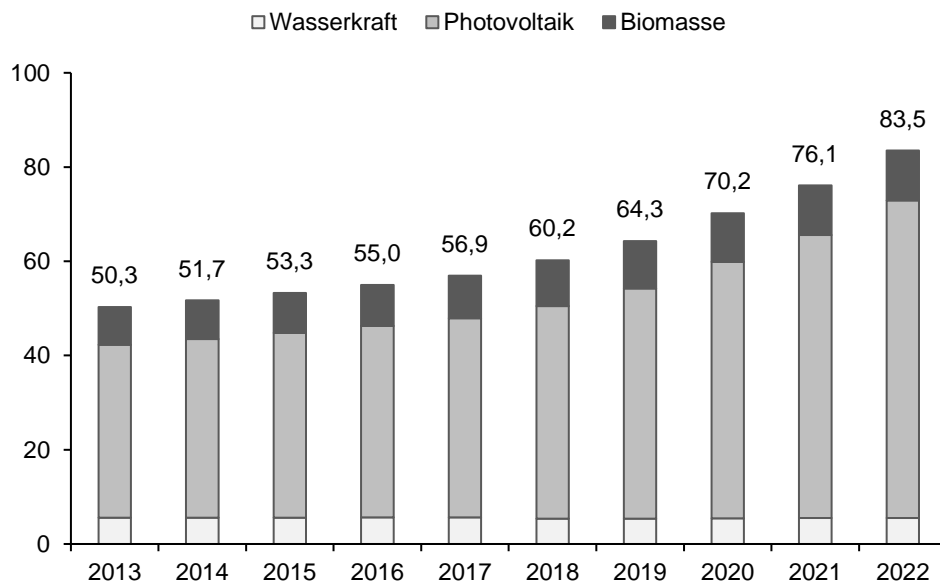
6.1.2. Installierter Leistung und Stromerzeugung

Ende 2022 stellten ca. 2,6 Mio. PV-Anlagen in Deutschland mit rund 67 GW Leistung den größten Anteil der Stromerzeugungssysteme bei den erneuerbaren Energien (Abbildung 64). Um das Ziel der Bundesregierung zu erreichen, im Jahr 2030 den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch auf mindestens 80% zu erhöhen, sollen die Ausbauraten bei Solaranlagen um 22 GW pro Jahr steigen und 2030 insgesamt rund 215 GW erreichen (BMWK 2023e; Deutsche Bundesregierung 2023).

Mit der Ende des Jahres 2022 in Deutschland über PV-Anlagen installierten Leistung von insgesamt ca. 67 GW wuchs die Gesamtleistung des PV-Anlagenparks im Vergleich zum Vorjahr um rund 12%. Nach dem Rekordzubaue an PV-Anlagen im Jahr 2012 mit fast 8,2 GW (Umweltbundesamt 2023a) war die neu zugebaute Leistung in den folgenden Jahren stark zurückgegangen. Seit 2015 ist wieder ein kontinuierlicher jährlicher Zubau der PV-Kapazität zu verzeichnen – der Trend hat sich im Jahr 2022 beschleunigt. Mit fast 7,3 GW wuchs der Anlagenpark deutlich stärker als im Vorjahr (5,7 GW).

¹⁵ Im Jahr 2022 haben Indien und die USA als zwei wichtige PV-Märkte industriepolitische Maßnahmen ergriffen, um PV-Fertigungskapazitäten gezielt im eigenen Land anzusiedeln. In den USA wurde der „Inflation Reduction Act (IRA)“ verabschiedet, der Steuervergünstigungen bei Investitionen in PV-Wertschöpfung im Land vorsieht. In der Folge haben europäische Hersteller angekündigt, Investitionsentscheidungen zugunsten amerikanischer Standorte zu treffen und Investitionen teilweise aus Europa abzuziehen (dena 2022).

Abbildung 64: Installierte Leistung in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2022 (in GW)



Quelle: BMWK (2023f)

Hinweis zu Wasserkraft: Gemeint sind Lauf- und Speicherwasserkraftwerke sowie Pumpspeicherkraftwerke mit natürlichem Zufluss.

Folglich stieg die Stromerzeugung aus Photovoltaik im Jahr 2022 gegenüber 2021 auf 60,8 TWh (+23%; Abbildung 65). Neben dem Wachstum des Anlagenparks ist dies auf die Witterung (mit viel Sonne insbesondere in den Sommermonaten) zurückzuführen (ebd.). Bereits in den Jahren 2018 bis 2020 hatte die Photovoltaik-Stromerzeugung von viel Sonnenschein und hoher Globalstrahlung profitiert. Seit 2013 (30,6 TWh) ist die Bruttostromerzeugung durch Photovoltaik kontinuierlich angestiegen, 2020 und 2021 verharrte sie jedoch auf einem Niveau um 49,3 bis 49,5 TWh.

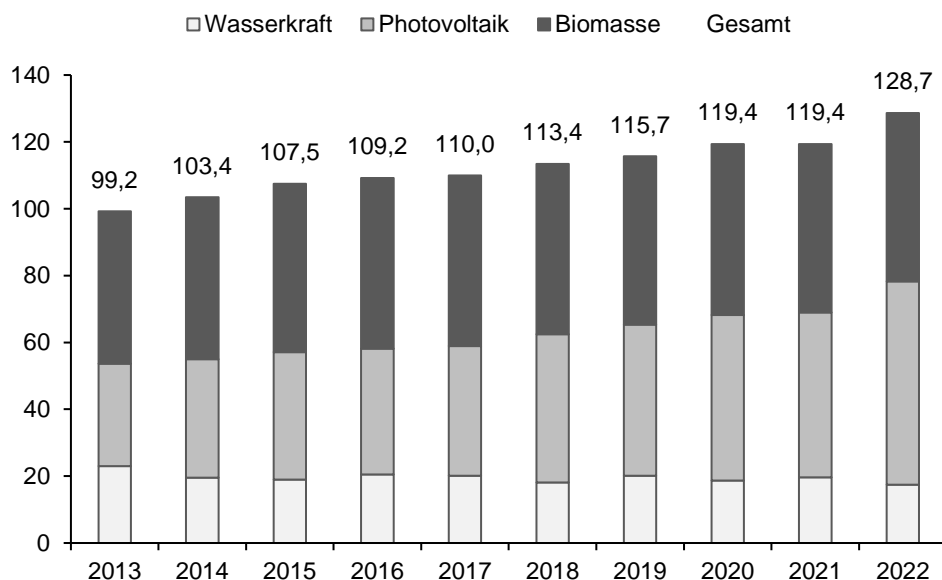
Das äußerst trockene Jahr 2022 sorgte in einem gegenläufigen Effekt für eine historisch niedrige Stromerzeugung aus Wasserkraftanlagen. Bei einer Leistung von mehr als 5,5 GW im Jahr 2022 wurde mit 17,5 TWh rund 11% weniger Strom erzeugt als 2021 (19,7 TWh) – das ist der niedrigste Stand seit 1998 (ebd.). Der Anteil der Wasserkraft am Bruttostromverbrauch insgesamt ist sehr gering, 2022 lag er bei etwa 3%. Für die Ausbauziele der Bundesregierung hat erneuerbare Energie aus Wasserkraft nur eine untergeordnete Bedeutung.

Über Biomasse wird rund 21% des gesamten erneuerbaren Stroms bereitgestellt, was etwa 9% des gesamten Bruttostromverbrauchs entspricht (BMWK 2023e). Im Jahr 2022 wurden aus fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse sowie dem erneuerbaren Anteil der Siedlungsabfälle insgesamt ca. 50,4 TWh Strom erzeugt, was in etwa dem Niveau des Vorjahres entspricht (Abbildung 65).

Die installierte Leistung im Bereich Biomasse ist über die letzten 10 Jahre zwar von 8,0 GW im Jahr 2013 auf 10,5 GW im Jahr 2022 angestiegen, für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan¹⁶ wurde im Jahr 2022 aber mit etwa 60 MW nochmals deutlich weniger Leistung zugebaut als in den Jahren zuvor (Umweltbundesamt 2023a).

Mit fast 45,6 TWh im Jahr 2013 stieg die Stromerzeugung aus Biomasse bis zum Jahr 2015 auf etwa 50,5 TWh an und blieb dann relativ konstant. Im Jahr 2022 wurde eine Bruttostromerzeugung von ca. 50,4 TWh aus Biomasse verzeichnet. Der Großteil der neu installierten Leistung auf Basis von Biomasse diente in den letzten Jahren der Erhöhung der Generatorleistung bei bestehenden Anlagen („Überbauung“). Die erzeugte Strommenge von Biogas und Biomethan veränderte sich kaum, da der Anlagenbestand relativ unverändert geblieben ist.

Abbildung 65: Bruttostromerzeugung durch Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2022 (in TWh)



Quelle: BMWK (2023f)

Hinweis zu Wasserkraft: Gemeint sind Lauf- und Speicherwasserkraftwerke sowie Pumpspeicherkraftwerke mit natürlichem Zufluss.

6.1.3. Beschäftigung

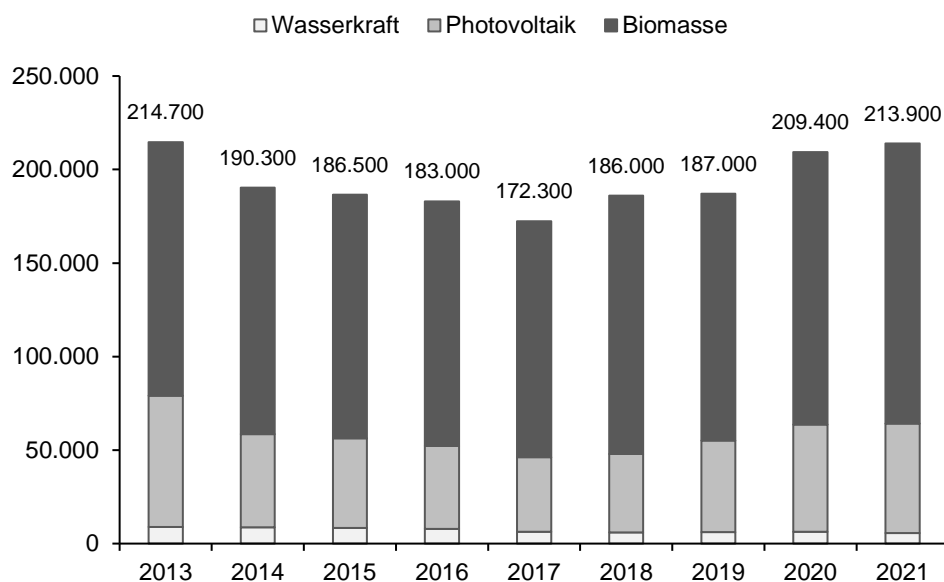
Abbildung 66 gibt die Bruttobeschäftigung gegliedert nach den Branchen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse wieder. Dargestellt sind Zahlen des BMWK, das jeweils die Bruttobeschäftigung (also direkte und indirekte Beschäftigungseffekte) in Zeitreihen betrachtet.

¹⁶ Fast zwei Drittel des aus Biomasse gewonnenen Stroms wird aus diesen beiden Energieträgern gewonnen (Umweltbundesamt 2023a).

Mit der Verschlechterung der wirtschaftlichen Situation der Hersteller von PV-Anlagen in Deutschland infolge des gedrosselten Photovoltaikausbaus (in Verbindung mit starken Förderkürzungen) seit 2012 und der verstärkten Konkurrenz durch chinesische Hersteller ging eine deutliche Abnahme der Zahl der Beschäftigten in der Branche einher. Bis 2017 sank die Zahl der Arbeitsplätze im Photovoltaikbereich in Deutschland auf 39.900, im Jahr 2013 wurden noch mehr als 70.000 Beschäftigte gezählt.

Seit dem Tiefpunkt im Jahr 2017 nimmt die Beschäftigtenzahl wieder zu, 2021 wurden wieder 58.500 Beschäftigte verzeichnet. Ausschlaggebend für die erneute Zunahme sind steigende Investitionen in die Errichtung von PV-Anlagen in Verbindung mit einem wieder kontinuierlich steigenden jährlichen Zubau der Kapazitäten.

Abbildung 66: Anzahl der Beschäftigten (direkt und indirekt) in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2013-2021



Quelle: BMWK (2022)

Vor allem in Verbindung mit Effizienzgewinnen und Personalabbaumaßnahmen in großen Energiekonzernen hat sich die Bruttobeschäftigung im Bereich Wasserkraft in den vergangenen Jahren vermindert. Von 8.900 direkt und indirekt in der Branche Beschäftigten im Jahr 2013 sank die Zahl der Arbeitsplätze auf 5.700 im Jahr 2021.

Im Verhältnis zur installierten Leistung verzeichnet das BMWK für den Bereich Biomasse eine vergleichsweise hohe Zahl an Beschäftigten (Bruttobeschäftigung). Ausschlaggebend für diese hohe Zahl dürften Schätzungseffekte sein in Verbindung mit der Erhebung landwirtschaftlicher Betriebe, die (im Nebenerwerb) Biogas- bzw. Biomethananlagen betreiben. Für das Jahr 2013 wurden 135.600 direkte und indirekte Beschäftigte verzeichnet.

Die Zahl sank in den Folgejahren leicht, um in den Jahren 2020 und 2021 deutlich auf fast 150.000 anzuwachsen.

6.1.4. Fachkräftesituation

Beschäftigte in den hier betrachteten Branchen erneuerbarer Energien sind in erster Linie in produktions- und handwerksorientierten Berufen tätig. Der Untersuchung von Monsef und Wendland (2022) zufolge sind über 60% der Beschäftigten im Bereich erneuerbare Energien insgesamt in Bau- und Ausbauberufen (z.B. gebäudenahe Handwerksberufe) und in fertigungstechnischen Berufen (z.B. bei Energie-, Elektronik- und maschinellen Anwendungen) tätig. Technische Fachkenntnisse gehören zu den wichtigsten Arbeitsanforderungen.

Laut Schätzungen zur Klima- und Wohnungsbaupolitik der Bundesregierung werden für die Erreichung der Klimaziele mindestens 400.000 Beschäftigte benötigt (Zika et al. 2022). Ein Großteil entfällt danach auf das Baugewerbe und den Handwerksbereich, wo Spezialisten u.a. auf den Gebieten Sanitär-, Heizungs-, Klima- und Energietechnik gefragt sind. Auch ohne beschleunigte Energiewende ist die Personalsituation in vielen Unternehmen angespannt, vielfach wird von Personalengpässen berichtet (dena 2022; Monsef/Wendland 2022).

Vor allem der Nachwuchs in handwerklichen Berufen u.a. mit Bezug zur Solarbranche ist Monsef/Wendland (2022) zufolge bundesweit unzureichend. Die hohe Zahl offener Stellen im Handwerk generell wird durch die in den nächsten Jahren zu erwartenden Renteneintritte der Baby-Boomer verstärkt.

Dem VDI-/IW-Ingenieurmonitor zufolge kann die steigende Nachfrage nach Fachkräften (insbesondere IT-Experten speziell zur Entwicklung klimafreundlicher Technologien und Produkte, aber auch Ingenieurberufe in den Bereichen Bau, Energie- und Elektrotechnik) nicht annähernd gedeckt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Anzahl der Studienanfänger in den Ingenieurwissenschaften und der Informatik in den letzten fünf Jahren um rund 15% gesunken ist (VDI 2022).

6.2. Auswirkungen der Szenarien

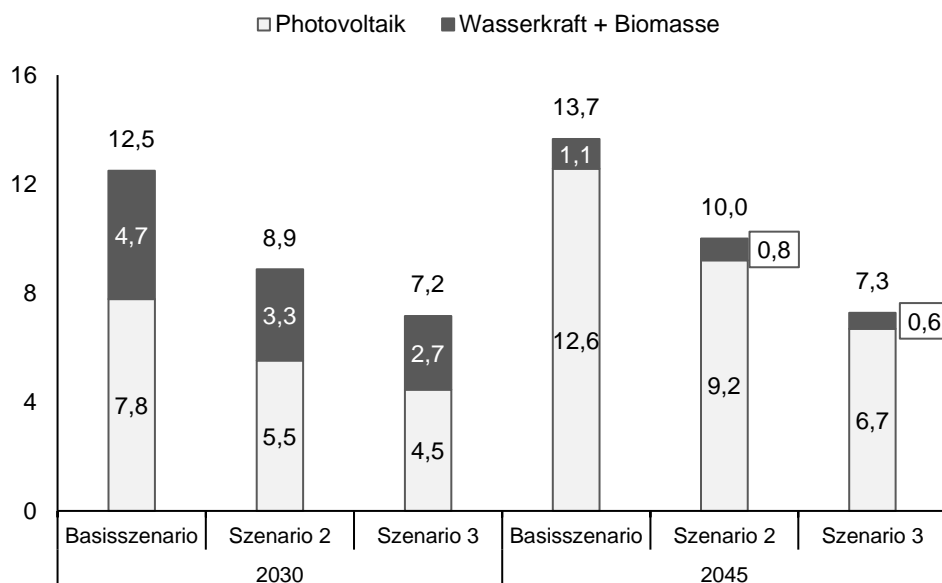
Im Folgenden werden die Auswirkungen der Transformationsszenarien der Primärstahlindustrie auf den Bedarf an Anlagenkapazitäten für die Stromerzeugung (Elektrolyse) und damit verbundene Bruttobeschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse skizziert. Die Abschätzung und Berechnung der Transformationseffekte basiert auf dem in Kapitel 2.4 dargestellten Simulationsmodell für die Zeithorizonte 2030 und 2045. Im Vordergrund steht das Szenario einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie (Basisszenario).

6.2.1. Strombedarf und benötigte Anlagenkapazitäten

Bis zum Jahr 2030 ist im Basisszenario eine Elektrolyseleistung von 3,7 GW zu erreichen, was einem Gesamtstrombedarf von 26,0 TWh entspricht (siehe Kapitel 4.2.1). Im Simulationsmodell wird dieser anteilig durch die unterschiedlichen Energiequellen gedeckt, der Anteil von Photovoltaik beträgt 7,8 TWh, der von Wasserkraft und Biomasse insgesamt 4,7 TWh (Abbildung 67) – bei unterstellten Volllaststunden im Bereich Photovoltaik von 957 (2030) bzw. 959 (2045) und 3.875 (2030 und 2045) bei Wasserkraft und Biomasse (Agora Energiewende 2021b).

Die Anteile der einzelnen Energiequellen am Strommix aus erneuerbaren Energien im Jahr 2030 ergeben sich in Anlehnung an den prognostizierten Entwicklungspfad der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (ebd.). Im Simulationsmodell beträgt der Anteil von Photovoltaik rund 30% und die Anteile von Wasserkraft und Biomasse belaufen sich zusammengenommen auf rund 18%.

Abbildung 67: Erforderliche Nettostromerzeugung in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in TWh)



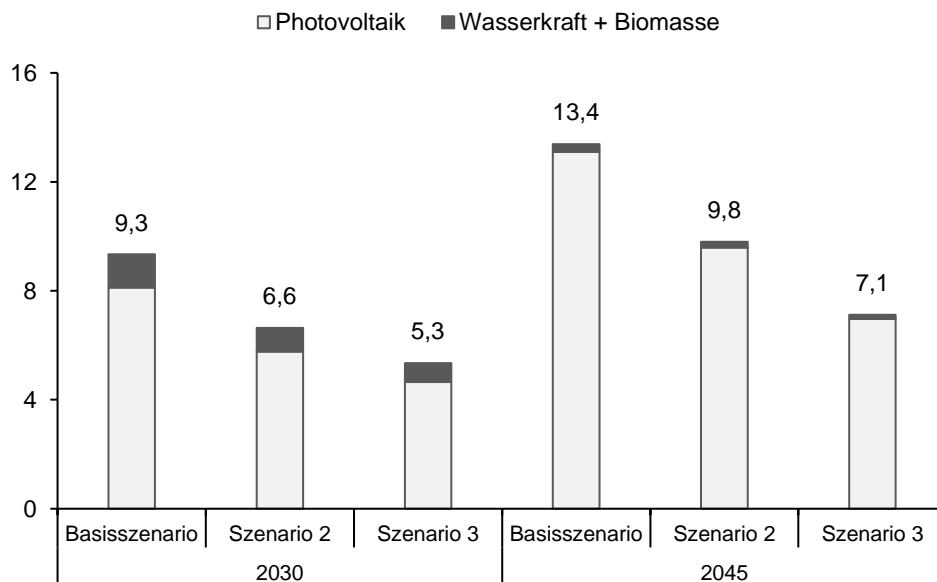
Quelle: Eigene Darstellung

Im Modell weicht der unterstellte Strommix leicht von den Berechnungen der Agora Energiewende (2021b) ab. Annahme ist, dass die von Agora Energiewende prognostizierte Nettostromerzeugung im Bereich Photovoltaik im Jahr 2030 um 30% unterschritten wird. Auf Basis der Einschätzung vieler interviewter Experten wird unterstellt, dass die Ausbauziele im Bereich Photovoltaik bis 2030 nicht vollumfänglich erreicht werden (siehe auch Kapitel 5.1.2 und 5.2.1).

Diese Prämissen vorausgesetzt, ist für eine vollständige Transformation der Primärstahlindustrie (Basisszenario) bis 2030 eine Anlagenkapazität im

Bereich Photovoltaik in Höhe von 8,1 GW und in den Bereichen Wasserkraft und Biomasse von insgesamt 1,2 GW erforderlich, um grünem Wasserstoff per Elektrolyseverfahren zu erzeugen (Abbildung 68).

Abbildung 68: Erforderliche Anlagenkapazität in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in GW)



Quelle: Eigene Darstellung

Hierbei handelt es sich also lediglich um den Strombedarf für die Erzeugung von Wasserstoff für die Direktreduktion. Zukünftig werden Stahlunternehmen insgesamt deutlich mehr Strom benötigen, da sie zum einen keinen Eigenstrom mehr herstellen werden und zum anderen weitere Prozesse z.B. im Downstream elektrifiziert werden. Das Verhältnis der Direktreduktion zu den übrigen Prozessen im Hinblick auf den Strombedarf dürfte sich nach Auskunft von Interviewpartnern auf 3:1 belaufen.

Bis 2045 ist davon auszugehen, dass die für die Elektrolyse erforderlichen Strombedarfe und die entsprechenden Anlagenkapazitäten weiter ansteigen werden. Für eine vollständige Transformation der Primärstahlindustrie wird im Simulationsmodell ein anteiliger Strombedarf für die Elektrolyse der Bereiche Photovoltaik sowie Wasserkraft und Biomasse in Höhe von 33,5 TWh angenommen. Dafür sind bis 2045 Kapazitäten in Höhe von 13,1 GW im PV-Bereich (das entspricht 12,6 TWh) und von 0,3 GW im Bereich Wasserkraft und Biomasse (das entspricht 1,1 TWh) erforderlich.

Wesentliche Annahme dabei ist, dass Photovoltaik nach der Prognose der Agora Energiewende (2021b) im Jahre 2045 einen Anteil am Strommix aus erneuerbaren Energiequellen von rund 37% haben wird. Der Anteil der Energiequellen Wasserkraft und Biomasse wird laut Agora Energiewende (2021b) bis zum Jahr 2045 deutlich abnehmen – auf zusammengenommen etwa 3%. Folglich gehen laut Simulationsmodell auch die erforderlichen

Anlagenkapazitäten im Bereich Wasserkraft und Biomasse zurück, was wiederum Auswirkungen auf die abgeschätzten Beschäftigungseffekte im Jahr 2045 hat (siehe unten).

6.2.2. Mögliche Hemmnisse

Ein wesentliches Hemmnis, das den Aufbau von Kapazitäten (den im EEG 2023 festgelegten Ausbaupfaden folgend) insbesondere im PV-Bereich verzögern könnte, besteht im Mangel an industriellen Produktionskapazitäten und qualifiziertem Personal im Inland (i.W. für Produktion und Montage).

Im Laufe der letzten rund 10 Jahre haben sich eine Reihe deutscher Produzenten vom Markt zurückgezogen, während die Konkurrenz von chinesischen Herstellern, die heute den Weltmarkt dominieren, zugenommen hat (siehe Kapitel 6.1.1). Die Internationale Energieagentur (IEA 2022) geht davon aus, dass die globale Nachfrage und die weltweit installierte PV-Kapazität in den nächsten beiden Jahrzehnten enorm steigen werden. Trotzdem rechnet die IEA für die kommenden Jahre mit einer weiteren Konzentration auf China als Standort für PV-Fertigungskapazitäten.

Laut deutscher Energie-Agentur haben die aktuellen Gesetzgebungen in den USA und in Indien, die die Ansiedlung von PV-Wertschöpfung in den jeweiligen Ländern mit Steuergutschriften begünstigen, bereits zu Investitionsentscheidungen zugunsten von indischen bzw. US-Standorten geführt (dena 2022). Mittelfristig wird angenommen, dass sich die Wertschöpfungsketten im PV-Bereich international stärker diversifizieren und sich regionale Produktionsstandorte etablieren werden, die angesichts geopolitischer Unsicherheiten höhere nationale Ansprüche an die Energiesicherheit berücksichtigen.

In diesem Marktumfeld müssen sich deutsche Produzenten von PV-Anlagen und Projektentwickler in den nächsten Jahren bewähren. Sie sind auf die Kooperation mit internationalen Partnern angewiesen. Dies betrifft vor allem die Polysilizium-, Ingot- und Waferproduktion (für weitere Hemmnisse siehe Kapitel 5.2.2).

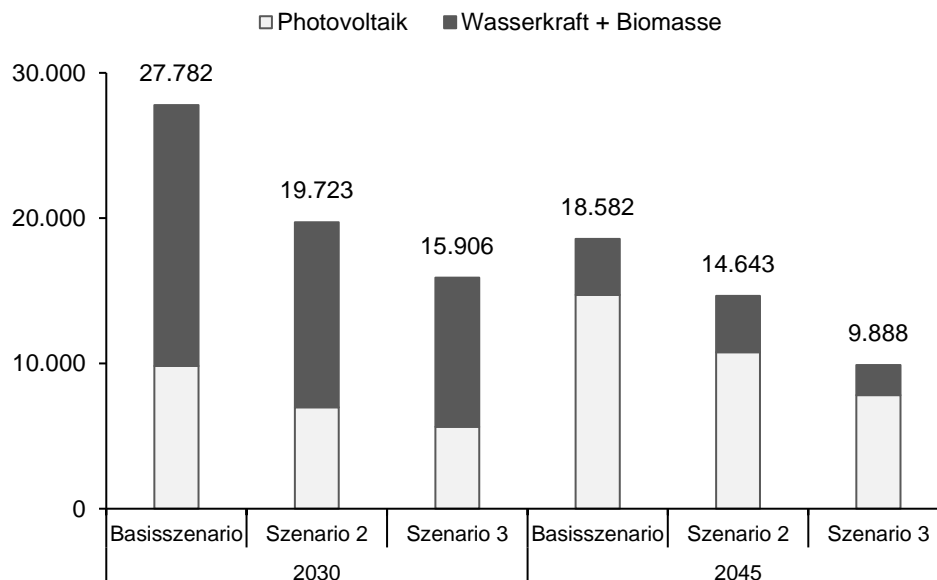
6.2.3. Beschäftigungseffekte

Aus der Transformation der Primärstahlindustrie bzw. den für die Elektrolyse benötigten Anlagenkapazitäten für die Stromerzeugung ergeben sich entsprechende Beschäftigungseffekte in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse. In Abbildung 69 werden direkte, indirekte und induzierte Beschäftigungseffekte (Multiplikator: 1,3) unter Berücksichtigung einer Steigerung der jährlichen Arbeitsproduktivität von 0,5% in den Aufsatzjahren 2030 und 2045 dargestellt (siehe ausführlich Kapitel 2.4 und 5.2.3).

Im Basisszenario entstehen positive Beschäftigungswirkungen im PV-Bereich in einer Größenordnung von 9.828 FTE (2030) bis 14.705 FTE (2045). Diese Zahlen verdeutlichen das Potenzial zur Schaffung zusätzlicher Ar-

beitsplätze in der Photovoltaikbranche im Zuge einer vollständigen Transformation der Primärstahlindustrie.

Abbildung 69: Beschäftigungseffekte in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse (in FTE)



Quelle: Eigene Darstellung

Hinweis: Dargestellt werden direkte, indirekte und induzierte Effekte insgesamt unter Berücksichtigung einer Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Anlageneffizienz.

Da bis zum Jahr 2045 mit einer relativ starken Abnahme des Anteils von Biomasse als Energiequelle am Strommix aus erneuerbaren Energien gemäß Agora Energiewende (2021b) zu rechnen ist (Anteil 2030: insgesamt 18%; Anteil 2045: insgesamt 3%), fällt der entsprechende Beschäftigungseffekt für das Jahr 2045 mit zusammengenommen 3.877 FTE deutlich geringer aus als für das Jahr 2030 mit 17.954 FTE im Basisszenario. Als Gründe für diesen deutlich zurückgehenden Beschäftigungseffekt lässt sich zum einen der in Zukunft reduzierte Beitrag von Biomasse zur Nettostromerzeugung und zum anderen der relativ hohe Basiswert für die Beschäftigung im Jahr 2021 anführen.

Agora Energiewende (2021b) geht davon aus, dass die Nettostromerzeugung durch Biomasse bis zum Jahr 2045 auf 10 TWh sinken wird. Im Vergleich zu heutigen Werten ist das ein Rückgang um rund 75%, dementsprechend reduziert sich der Anteil von Biomasse am Strommix. Die Nettostromerzeugung durch Wasserkraft bleibt Agora Energiewende (2021b) zufolge bis 2045 stabil bei 21 TWh.

Zur Ermittlung der Beschäftigungseffekte wurden die abgeschätzten Bedarfe bei Anlagekapazitäten mit den angenommenen FTE-Bedarfen pro 1 GW multipliziert. Die FTE-Bedarfe für Wasserkraft und Biomasse im Jahr

2030 fallen vergleichsweise hoch aus, da zur Berechnung auf Schätzwerte des BMWK (2022) zurückgegriffen wird. Das Ministerium weist für Biomasse eine relativ hohe Bruttobeschäftigung von fast 114.000 Personen im Jahr 2021 aus – bei einer installierten Leistung von 10,5 GW (Umweltbundesamt 2023a). Der Bereich Wasserkraft ist weniger beschäftigungsintensiv, für 2021 weist das BMWK (2022) 5.700 Beschäftigte (brutto) aus; die installierte Leistung lag im selben Jahr bei 5,5 GW.

Auswirkungen auf technisch-handwerkliche Tätigkeiten

Die Beschäftigungseffekte im PV-Segment beziehen sich in erster Linie auf technisch-handwerkliche Tätigkeiten im Bereich Montage/Installation, aber auch auf Arbeitsplätze in der Produktion und der Projektplanung und -durchführung. Gerade in Berufen der Klima- und Heizungstechnik sowie der Energie- und Gebäudetechnik wird der Bedarf an qualifizierten Fachkräften auf hohem Anforderungsniveau steigen. Nur ein geringer Anteil des zukünftigen Fachkräftebedarfs kann aufgrund der Tätigkeitsanforderungen durch angeleitete Geringqualifizierte gedeckt werden (dena 2022). Der demografische Wandel wird die Deckung des Fachkräftebedarfs jedoch erschweren, da vor allem in den genannten Berufsfeldern viele Beschäftigte der Baby-Boomer-Generation aus dem Erwerbsleben ausscheiden werden.

6.2.4. Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt

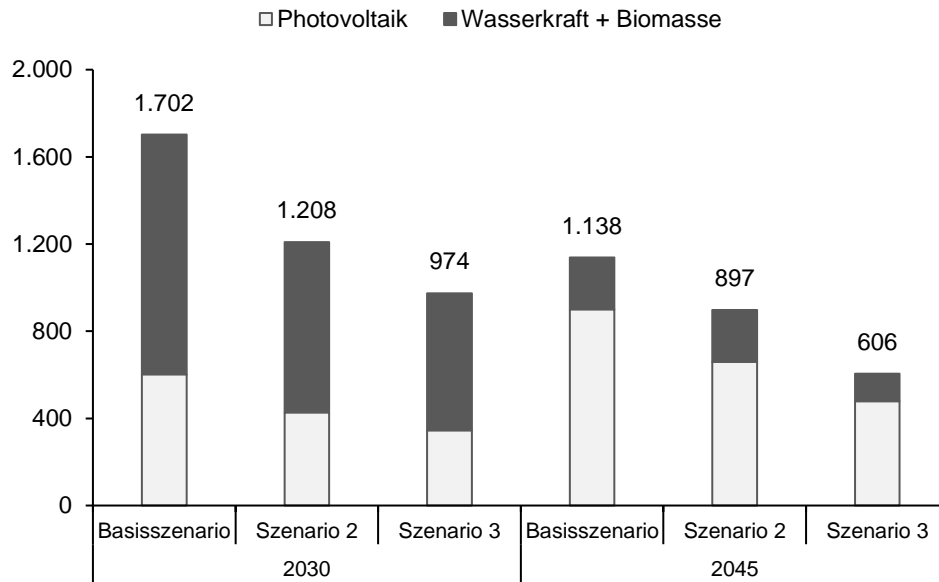
Wertschöpfungseffekte entlang der einzelnen Szenarien lassen sich vereinfacht berechnen durch die Multiplikation der benötigten FTE mit dem durchschnittlichen Bruttojahreseinkommen eines Beschäftigten der betrachteten Branche. Da es keine eindeutigen WZ-Klassen für die betrachteten Branchen und somit auch keine entsprechenden Einkommensdaten gibt, wird das durchschnittliche Einkommen näherungsweise geschätzt. Einkommensdaten des Statistischen Bundesamtes für die Energieversorgung, das Baugewerbe und das produzierende Gewerbe stellen eine gute Annäherung für die Bereiche Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse dar.

Das durchschnittliche Bruttojahreseinkommen in der Energieversorgung liegt nach aktuellen Statistikdaten bei 71.683 Euro (es wird für die vorliegende Studie mit 50% gewichtet), im Baugewerbe beträgt es 46.410 Euro (Gewichtung mit 25%) und im produzierenden Gewerbe 55.223 Euro (Gewichtung mit 25%). Daraus ergibt sich ein durchschnittliches gewichtetes Bruttojahreseinkommen pro Person von 61.250 Euro.

In Abbildung 70 werden die kumulierten Wertschöpfungseffekte für die Jahre 2030 und 2045 auf Basis der heutigen Einkommensdaten dargestellt. Mit Blick auf das Basisszenario belaufen sich die Wertschöpfungseffekte für den PV-Bereich auf 602 Mio. Euro (2030) bzw. 901 Mio. Euro (2045). Aufgrund der hohen unterstellten Beschäftigtenzahlen für den Bereich Biomasse im Jahr 2030 (siehe oben) sind auch die damit verbundenen Wertschöpfungspotenziale hoch. Für Wasserkraft und Biomasse zusammen-

genommen werden im Basisszenario im Jahr 2030 Wertschöpfungseffekte in Höhe von 1,1 Mrd. Euro erwartet, im Jahr 2045 aufgrund des zurückgehenden Anteils im Strommix in Höhe von 237 Mio.

Abbildung 70: Wertschöpfungseffekte auf Basis von Lohn/Gehalt in den Bereichen Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse 2030 und 2045 (in Mio. €)



Quelle: Eigene Darstellung

7. Automobilindustrie

7.1. Branchen- und Arbeitsmarktsituation

7.1.1. Die Branche im Überblick

Die deutsche Automobilindustrie spielt eine bedeutende Rolle in der Volkswirtschaft des Landes. Zur Automobilindustrie zählen Kraftfahrzeughersteller, die Hersteller von Karosserien, Anhängern und Aufbauten sowie Zulieferer von Kfz-Teilen und -Zubehör.¹⁷

Der Hauptfokus der deutschen Automobilindustrie ist die Herstellung von Pkw, ein weiterer Schwerpunkt ist die Herstellung von Nutzfahrzeugen (leichte Transporter, innerstädtische Verteilerfahrzeuge, schwere Lkw und Busse). Im Jahr 2020 betrug die Wertschöpfung der Branche nach Angaben des Statistischen Bundesamtes 86,9 Mrd. Euro, im Vor-Corona-Jahr 2019 lag die Bruttowertschöpfung bei 102,1 Mrd. Euro.

Die Automobilhersteller und Zulieferindustrien konzentrieren sich vor allem im Westen und insbesondere im Süden Deutschlands (Stiftung Arbeit und Umwelt 2022). Besonderheit der Automobilindustrie ist die stark ausdifferenzierte Wertschöpfungskette sowie der hohe Grad an Arbeitsteilung und Zusammenarbeit in komplexen Liefernetzwerken (BMWK 2023g). Für die Fahrzeugfertigung werden Teile, Systemkomponenten und Rohstoffe benötigt, die zugekauft werden. Daher wirken auch Branchen, die auf den ersten Blick wenig mit dem Fahrzeugbau zu tun haben, an der Herstellung von Kraftfahrzeugen mit.

Mit einem Anteil von etwa 70% erwirtschaftet die vor allem mittelständisch geprägte Zuliefererindustrie inzwischen den Großteil der Wertschöpfung der Automobilindustrie in Deutschland. Forschung, Entwicklung und wissenschaftliche Kooperationen haben eine hohe Bedeutung für die Branche (ebd.).

Die deutsche Automobilindustrie befindet sich in einer längerfristigen Transformation (z.B. Agora Verkehrswende 2021; Grimm/Pfaff 2022). Sowohl der Trend zur Elektrifizierung der Antriebe (vor allem batterieelektrische Fahrzeuge), die fortschreitende Automatisierung und Vernetzung der Fertigungsprozesse als auch die Einführung autonomer und vernetzter Fahrfunktionen und das Aufkommen neuer Mobilitätsdienstleistungen verändern die Branche (OEMs als auch Zulieferer). Wertschöpfungsnetzwerke und die Produktion von Automobilherstellern und Zulieferern wandeln sich zum Teil tiefgreifend.

¹⁷ Die Automobilindustrie wird dem Statistischen Bundesamt zufolge als Wirtschaftszweig 29 „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ klassifiziert. Dieser umfasst die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren (WZ 29.1), von Karosserien, Aufbauten und Anhängern (WZ 29.2) sowie von Teilen und Zubehör für Kraftwagen (WZ 29.3). Die Wirtschaftszweige für die Instandhaltung und Reparatur von Kraftwagen sowie den Handel mit Kraftwagenteilen und -zubehör werden im Folgenden nicht berücksichtigt (WZ 45.2 und 45.3).

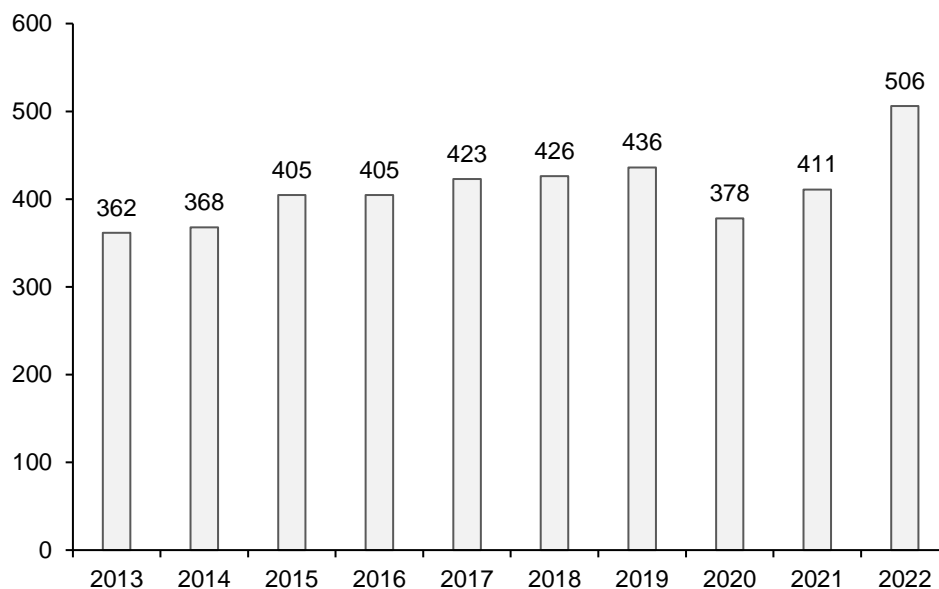
Weltweit rangiert Deutschland im Fahrzeugbau hinter China, den USA, Japan, Indien und Südkorea an sechster Stelle, vor Spanien und Frankreich (Steinhaus/Kraft 2023). Die deutschen Hersteller Volkswagen, Mercedes-Benz Group und BMW gehören sowohl im Umsatz als auch im Absatz zu den führenden Automobilherstellern der Welt (Statista 2023a, 2023b).

7.1.2. Umsatz und Produktion

Die Automobilindustrie ist die größte Branche des verarbeitenden Gewerbes und gemessen am Umsatz der bedeutendste Industriezweig in Deutschland (BMWK 2023g). Nach einem Umsatzeinbruch zu Beginn der Corona-Pandemie 2020 erwirtschafteten die Unternehmen der Branche im Jahr 2022 einen Umsatz von mehr als 500 Mrd. Euro und damit fast 100 Mrd. Euro mehr als im Vorjahr (Abbildung 71).

80% des Umsatzes im Jahr 2022 entfielen dem Statistischen Bundesamt zufolge auf die Fahrzeug- und Motorenhersteller. Knapp 70% des Umsatzes (352 Mrd. Euro) erzielte die Automobilindustrie dem Statistischen Bundesamt zufolge im Ausland, vor allem in den Ländern außerhalb der Europäischen Union. Hohe Bedeutung im nationalen und internationalen Wettbewerb kommt qualitativ hochwertigen Premiumfahrzeugen aus Deutschland zu.

Abbildung 71: Umsatz in der Automobilindustrie 2013-2022 (in Mrd. €)



Quelle: Statistisches Bundesamt, Genesis-Online Datenbank, Juni 2023, Betriebe mit 50 und mehr tätigen Personen

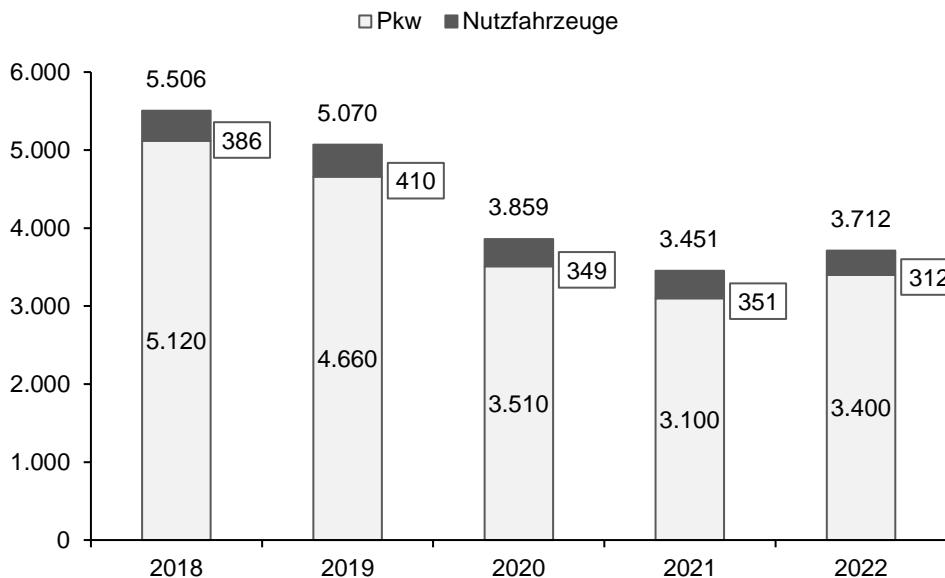
In den letzten Jahren waren die Unternehmen der Automobilbranche aufgrund des Chip- bzw. Halbleiternmangels zeitweilig zu Schließungen und Kapazitätsdrosselungen gezwungen (VDA 2023a). Die weltweite Nachfrage nach Pkw war seit 2019 rückläufig aufgrund der konjunkturellen Ab-

schwächung auf den globalen Märkten sowie der Auswirkungen der Corona-Pandemie und des Krieges in der Ukraine. Zusätzlich gab es Lieferengpässe bei Vorprodukten und Rohstoffen. Dies führte zu Beeinträchtigungen des Pkw-Absatzes und der Pkw-Produktion (BMWK 2023g).

Im Jahr 2022 konnte mit rund 3,4 Mio. Fahrzeugen zwar eine Steigerung der Produktion von Personenkraftwagen um etwa 12% im Vergleich zum Vorjahr verzeichnet werden, der Wert lag jedoch deutlich unter dem Niveau von 2019 mit rund 4,7 Mio. Pkw (Abbildung 72). Rund drei Viertel der in Deutschland produzierten Pkw (etwa 2,6 Mio. Fahrzeuge) wurden exportiert.¹⁸

Im Bereich Nutzfahrzeuge lag das Produktionsniveau mit rund 312.000 Fahrzeugen im Jahr 2022 deutlich unter dem Vorjahresniveau (etwa 351.000 Fahrzeuge) und dem Niveau im Vor-Corona-Jahr 2019 (fast 410.000 Fahrzeuge). Gegenläufig dazu ist die Zahl der in Deutschland produzierten Elektrofahrzeuge zwischen 2019 (89.000 Fahrzeuge) und 2021 (328.000 Fahrzeuge) deutlich angestiegen (Statistisches Bundesamt 2023).

Abbildung 72: Anzahl der produzierten Pkw und Nutzfahrzeuge in Deutschland 2018-2022 (in 1.000)



Quelle: VDA (2023b)

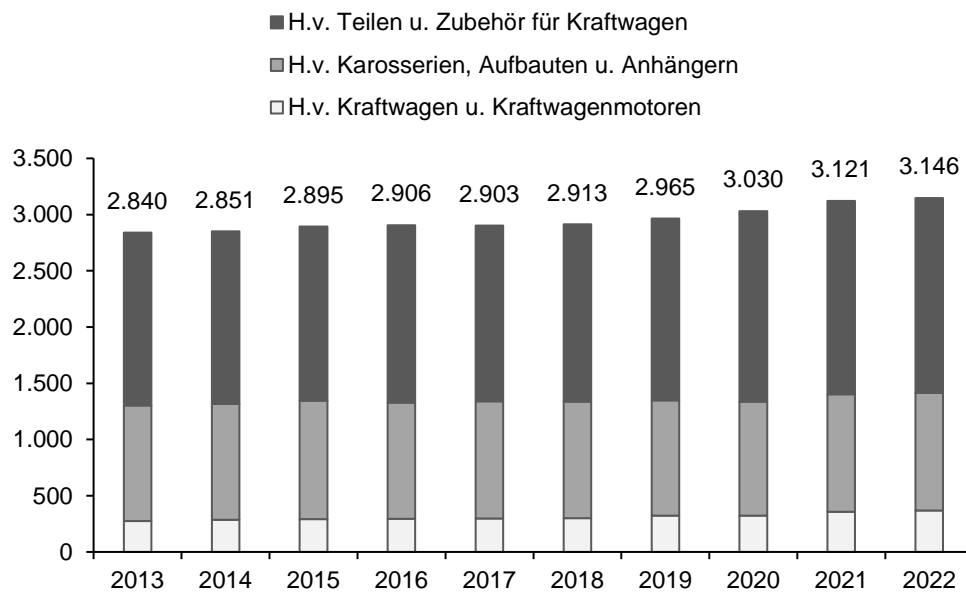
¹⁸ Neben der Diversifizierung von Liefer- und Rohstoffketten ist der Zugang zu Auslandsmärkten ein zentrales Thema für die deutschen Automobilhersteller. Handelshemmende Maßnahmen einiger Länder erschweren jedoch die Ausfuhr, so dass die deutsche Automobilindustrie weiterhin Werke in wachstumsstarken Regionen im Ausland errichtet. FuE und die Modellentwicklung bleiben allerdings meist in Deutschland (Falck et al. 2021; BMWK 2023g).

7.1.3. Betriebe und Branchenstruktur

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Betriebe in der Automobilindustrie nach Angaben der Bundesagentur für Arbeit leicht angewachsen, im Jahr 2022 wurden mehr als 3.100 Betriebe gezählt (Abbildung 73). 55% der Betriebe sind dem Bereich der Herstellung von Teilen und Zubehör für Kleinwagen zuzuordnen, 34% entfallen auf die Herstellung von Karosserien und 11% auf die Herstellung von Kraftwagen und Motoren.

Hinsichtlich der Betriebsgrößenklasse dominieren kleine und mittlere Unternehmen, wobei die meisten Betriebe Kleinunternehmen mit 1 bis 9 Beschäftigten sind.

Abbildung 73: Anzahl der Betriebe in der Automobilindustrie 2013-2022



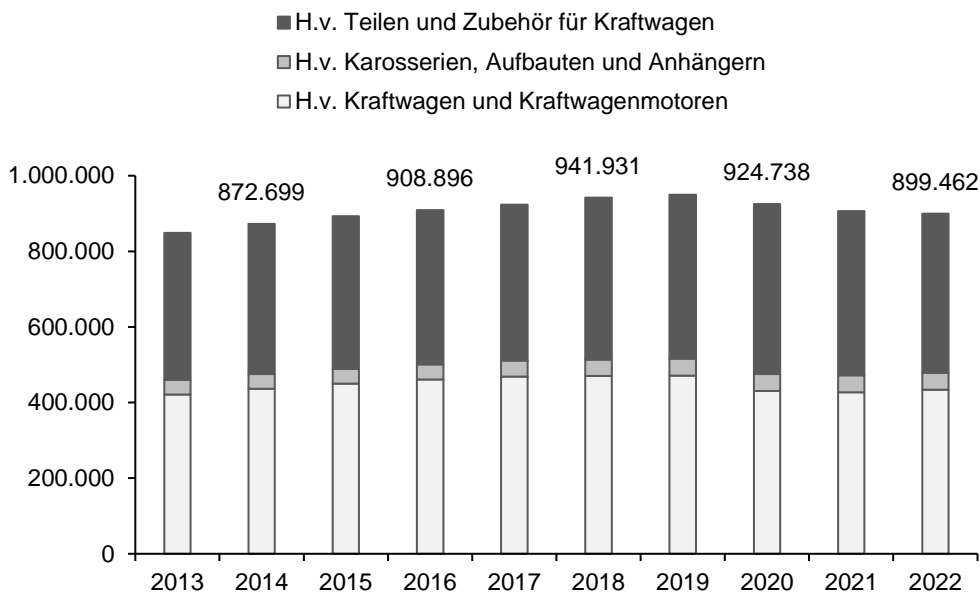
Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.; eigene Darstellung

7.1.4. Beschäftigung

Im Jahr 2022 waren fast 900.000 Menschen sozialversicherungspflichtig in der Automobilindustrie beschäftigt (Abbildung 74). Fast 434.000 Beschäftigte sind bei den Fahrzeug- und Motorenherstellern tätig, rund 466.000 Beschäftigte entfallen auf die Hersteller von Karosserien, Aufbauten und weiteren Teilen und Komponenten.

Das Gros der Beschäftigten entfällt auf Großunternehmen und Konzerne – nach Angaben der Statistik der Bundesagentur für Arbeit sind rund 8 von 10 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in großen Unternehmen mit 500 und mehr Beschäftigten tätig.

Abbildung 74: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie 2013-2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.; eigene Darstellung

Bis 2019 ist die sozialversicherungspflichtige Beschäftigung in der Automobilindustrie auf rund 950.000 angewachsen, seitdem hat sie um rund 50.000 abgenommen. Ausschlaggebend für den Rückgang der Beschäftigung sind u.a. Auswirkungen der Corona-Pandemie, aber vor allem der strukturelle Umbau der Industrie (Digitalisierung, Elektromobilität/Dekarbonisierung).

Zukünftige Beschäftigungseffekte

Die Prognosen zu zukünftigen Beschäftigungseffekten sind äußerst unterschiedlich. Laut einer Studie von IPE et al. (2019) bspw. sind in der Automobilindustrie bis 2040 bis zu 300.000 Arbeitsplätze gefährdet.

Der Agora Verkehrswende (2021) zufolge wird es in den nächsten Jahren in der Automobilindustrie und angrenzenden Industrien insgesamt u.a. durch den Wandel hin zu Elektromobilität, Produktivitätssteigerungen und einer Abwanderung von Arbeitsplätzen ins Ausland einen deutlichen Abbau von Arbeitsplätzen geben (-385.000), der sich jedoch u.a. durch einen günstigen Produktmix, ein entsprechendes Marktvolumen und neue Jobs infolge des Wandels zur Elektromobilität weitestgehend kompensieren ließe. Speziell bei Automobilherstellern (-70.000) und antriebsstrangfokussierten Zulieferern mit Schwerpunkt auf Verbrennungsmotoren (-95.000) ist jedoch mit einem deutlichen Rückgang der Zahl der Beschäftigten zu rechnen.

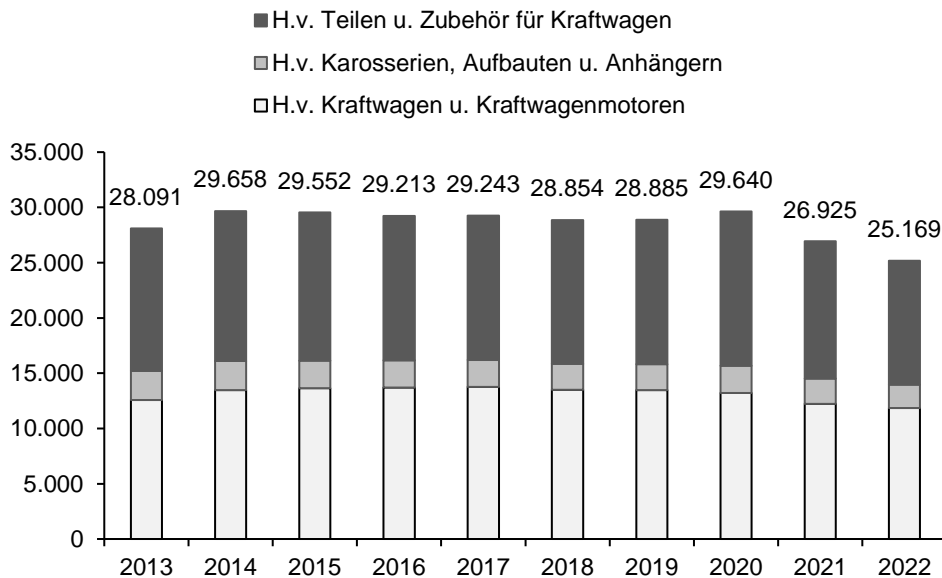
Laut ifo Institut (2023) hat die Automobilindustrie seit 2013 9% der Fertigungsberufe eingebüßt. Ein Teil des Verlusts wird bereits und könnte in Zukunft noch mehr durch Batteriefertigung, Dienstleistungen im Bereich Software oder digitale Geschäftsmodelle aufgefangen werden. Ausschlagge-

bend für das Fertigungslevel in Deutschland sind dem ifo Institut (2023) zufolge jedoch vor allem die zukünftigen Verschiebungen im Wettbewerb mit chinesischen und US-amerikanischen Herstellern.

Verschiebung der Beschäftigtenstruktur

Im Jahr 2022 wurden in der Automobilindustrie mehr als 25.000 Auszubildende gezählt (Abbildung 75), die Ausbildungsquote liegt somit bei fast 3%. Seit 2017 (mehr als 29.200 Auszubildende) hat die Zahl der Auszubildenden abgenommen, im Jahr 2021 u.a. als Effekt der Corona-Pandemie besonders stark (-2.700 gegenüber dem Vorjahr). Geringfügige Beschäftigung spielt in der Automobilindustrie eine untergeordnete Rolle. Im Jahr 2022 waren rund 5.700 Beschäftigte in einem „Minijob“ in der Branche tätig. Die Zahl der Minijobs hat seit 2013 um rund ein Viertel abgenommen.

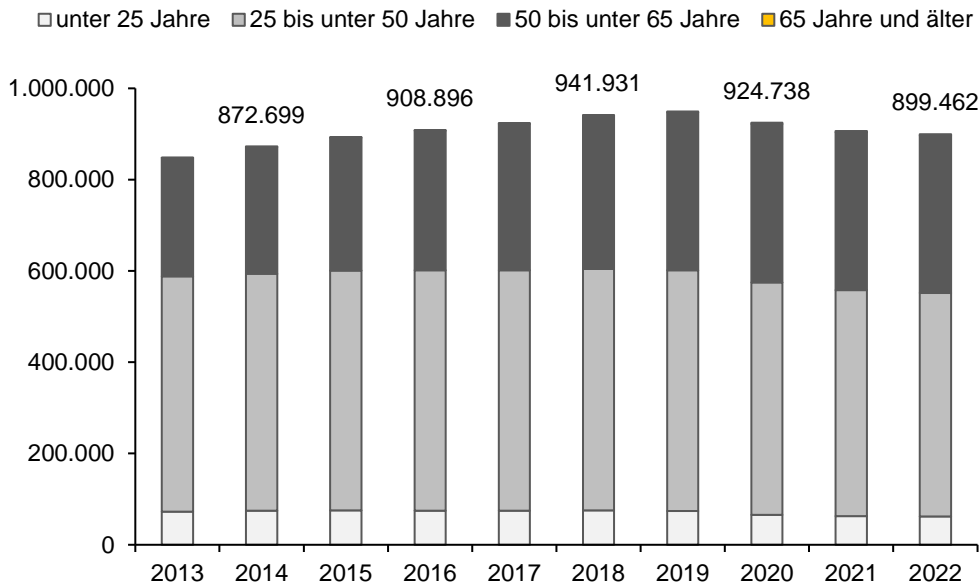
Abbildung 75: Anzahl der Auszubildenden in der Automobilindustrie 2013-2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.; eigene Darstellung

Was die Altersstruktur angeht, sind die Jahrgänge im Alter von 25 bis unter 50 Jahren nach Angaben des statistischen Bundesamtes die zahlenmäßig größte Gruppe (fast 490.000 Beschäftigte, Abbildung 76). Diese Gruppe ist in den letzten Jahren jedoch kleiner geworden, während die Altersgruppe der 50 bis unter 65-Jährigen auf fast 345.000 angestiegen ist – damit hat sich die Altersstruktur im Zuge des demografischen Wandels verschoben.

Abbildung 76: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie nach Altersgruppen 2013-2022



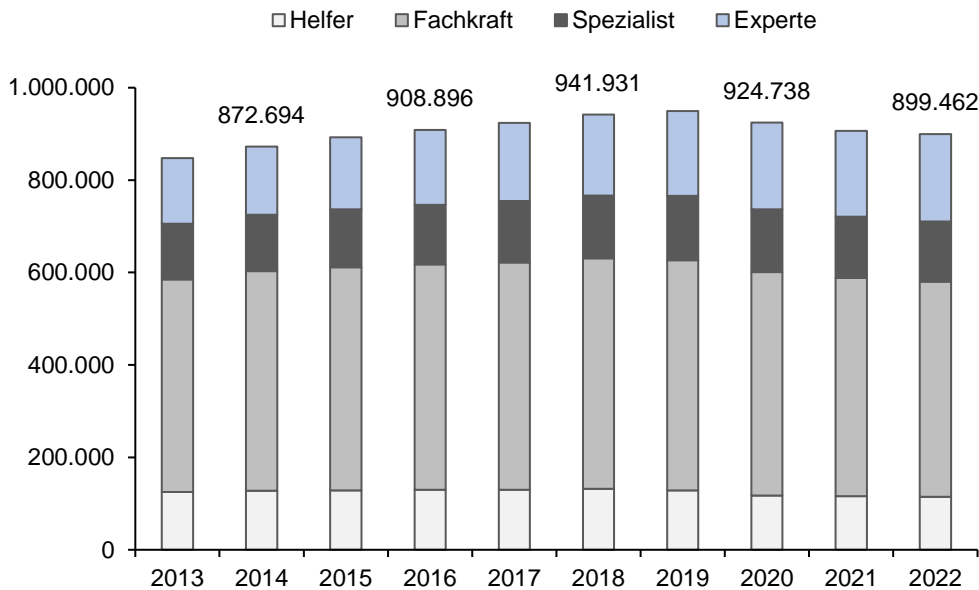
Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.; eigene Darstellung

Eine Verschiebung der Beschäftigtenstruktur zeigt sich auch mit Blick auf das Anforderungsniveau. Die Berufsstatistik der Bundesagentur für Arbeit ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Tätigkeiten der Beschäftigten nach Anforderungsniveau.

Danach werden Helfer- und Anlernertätigkeiten (Helfer), fachlich ausgerichtete Tätigkeiten (ausgebildete Fachkräfte), komplexe Spezialistentätigkeiten (Spezialisten, z. B. mit Meister- oder Techniker Ausbildung) und hochkomplexe Tätigkeiten (Experten, z. B. mit Hochschulausbildung) unterschieden. Es zeigt sich, dass die Zahl der Experten in der Automobilindustrie in den letzten 10 Jahren deutlich angestiegen ist, von rund 142.000 im Jahr 2013 auf fast 189.000 im Jahr 2022 (Abbildung 77).

Hierin kommt z.B. zum Ausdruck, dass Automobilhersteller auf die Erarbeitung automobiler Geschäftsmodelle der Tech-Firmen mit eigenen IT-Abteilungen und Kooperationen reagieren (z.B. Grimm/Pfaff 2022). Gleichzeitig hat die Zahl der Helfer abgenommen (2013: ca. 125.000; 2022: ca. 115.000), allerdings vor allem infolge der Corona-Pandemie seit 2020.

Abbildung 77: Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Automobilindustrie nach Anforderungsniveau 2013-2022



Quelle: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Beschäftigungsstatistik, Stichtag jeweils 30.06.; eigene Darstellung

7.1.5. Fachkräftesituation

Aufgrund der Transformation der Branche, der technischen Entwicklungen und des hohen Wettbewerbsdrucks besteht ein hoher Bedarf an hochspezialisierten Fachkräften. Fachkräftengpässe bestehen in allen Bereichen der Automobilindustrie, d.h. bei Herstellern (OEM) und Zulieferern gleichermaßen (z.B. ter Hauseborg 2023). Gesucht werden bspw. Arbeitskräfte in den Bereichen Forschung und Entwicklung, IT, Produktion sowie Qualitätssicherung und -management. Je nach OEM unterscheiden sich jedoch die Bedarfe in den einzelnen Arbeitsbereichen (z.B. Pertschy 2021).

Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die altersbedingte Beschäftigungsfuktuation durch einen gehäuften Renteneintritt der Babyboomer-Generation ausreichen wird, um die transformationsbedingten negativen Beschäftigungseffekte abzufedern. Das hängt laut Falck et al. (2021) im Wesentlichen davon ab, wie schnell der Umbruch vonstattengeht. Ein zentraler Treiber sind dabei die Flottengrenzwerte der EU-Verordnung (EU) 2019/631 (Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen).

Elektrofahrzeuge gehen als Fahrzeuge ohne Emission in die Rechnung ein. Über die strengeren Flottengrenzwerte wird kurz- und mittelfristig bestimmt werden, wie viele Elektrofahrzeuge die Automobilindustrie herstellen muss. 2019 betrug der Anteil elektrischer Fahrzeuge an den EU-Neuzulassungen etwa 3,5% (ebd.). Ab dem Jahr 2025 ist mit einem erforderlichen Anteil zwischen 29 und 36% zu rechnen, im Jahr 2030 zwischen 35 und 47%.

Würde sich der Produktionswert bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in Deutschland um die der EU-Verordnung entsprechenden Anteile vermindern, wären davon Falck et al. (2021) zufolge bis 2030 mindestens 215.000 Beschäftigte (davon 165.000 in der Automobilindustrie) betroffen. Laut Prognose werden bis 2030 aber nur etwa 147.000 Beschäftigte in der Automobilindustrie in den Ruhestand eintreten. Damit ergäbe sich eine beträchtliche Lücke zwischen der abzusehenden altersbedingten Fluktuation und der Anzahl der betroffenen Beschäftigten.

7.2. Die Automobilindustrie als Abnehmer von Stahl

Als der Stahlindustrie nachgelagerter Bereich spielt die Automobilindustrie in der Wertschöpfungskette eine bedeutende Rolle als Abnehmer von Stahlprodukten.

7.2.1. Stahlnachfrage insgesamt

Um die zukünftige Stahlnachfrage der Automobilindustrie abschätzen zu können, werden historische Daten zur Entwicklung der Automobilproduktion (Zahl der produzierten Pkw), Angaben zum durchschnittlichen Fahrzeuggewicht und Daten zum Stahlanteil eines durchschnittlichen Pkw herangezogen.

Zwischen 2010 und 2019 lag die Pkw-Produktion in Deutschland im Schnitt bei etwa 5,4 Mio. Fahrzeugen (eigene Berechnung auf Basis von VDA-Daten). 2016 wurden 5,8 Mio. Fahrzeuge produziert, 2019 waren es 4,7 Mio. Fahrzeuge. In den Corona-Jahren seit 2020 ist die Produktion deutlich auf unter 4 Mio. Fahrzeuge zurückgegangen (siehe Kapitel 7.1.2).

Annahme: Perspektivische Erholung des Fahrzeugmarktes

Es ist davon auszugehen, dass sich der Fahrzeugmarkt in Deutschland u.a. aufgrund der allmählichen Entspannung der Versorgungslage bei Vorprodukten perspektivisch wieder erholen wird – darauf deutet auch der positive Trend bei den Neuzulassungen im Jahr 2023 hin (z.B. Handelsblatt 2023b). Langfristig wird jedoch erwartet, dass das vor der Corona-Pandemie bestehende Produktionsvolumen der stark auf den Export ausgerichteten deutschen Automobilindustrie nicht wieder erreicht wird. Mögliche strukturelle Gründe dafür sind das sich weiter wandelnde Mobilitätsverhalten (Carsharing-Angebote etc.) und der intensive internationale Wettbewerb auf dem Automobilmarkt mit starken ausländischen Anbietern von Elektrofahrzeugen.

Angenommen, die Marktentwicklung wird langfristig auf das Niveau der Vor-Corona-Jahre seit 2010 zurückkehren, würden in Zukunft hierzulande im Schnitt 5,4 Mio. Pkw pro Jahr hergestellt.¹⁹

¹⁹ Die Ausführungen beziehen sich nur auf Zahlen zur Entwicklung der Pkw-Produktion, Daten zur Herstellung von Nutzfahrzeugen werden nicht betrachtet.

Über die Jahre hat sich die Werkstoffzusammensetzung von Pkw zugunsten leichter Materialien wie Aluminium und Kunststoffen verändert. Aufgrund einer zunehmenden Größe der Fahrzeuge – verbunden mit immer mehr Technik, Sicherheitsausstattung und Extras – ist das Leergewicht jedoch angestiegen. Der Gewichtszuwachs wird mit kräftigeren Motoren kompensiert. Noch vor einigen Jahren wog ein durchschnittlicher Pkw rund 1 Tonne, heute wiegt ein Auto im Schnitt rund 1,4 Tonnen (MeinAuto GmbH 2023).

Entscheidend dafür, wie schwer der Leerzustand ist, sind neben verbauter Technik auch Fahrzeugtyp und Größe der Karosserie. Mit einem Leergewicht von ca. 1,6 Tonnen und einem zulässigen Gesamtgewicht des schwersten Benzinmotors von etwa 2,3 Tonnen ist das C-Klasse-Modell von Mercedes im Vergleich zu Audi und BMW am schwersten. Mit dem schwersten Dieselmotor kommt die C-Klasse auf ein Gesamtgewicht von rund 2,4 Tonnen (Carwow GmbH 2023). Alles in allem liegt die aktuelle Gewichtsspanne bei PKWs daher zwischen 1 und 1,8 Tonnen (MeinAuto GmbH 2023).

Nach Herstellerangaben setzt sich eine Limousine heute im Schnitt zu 50 bis 60 % aus Stahl zusammen (z.B. Gilgen 2020). Laut der Studie „Die Rolle von Stahl in der Elektromobilität“ (Ehlert-Hoshmand et al. 2019) wird der Stahlanteil sowohl in Elektroautos als auch in konventionellen Autos bis 2035 leicht zurückgehen und sich bei etwa 50 % einpendeln. Dies ist auf die Entwicklung neuer hochfester Stähle zurückzuführen, die Fahrzeuge leichter machen.

Folglich werden in einem Pkw heute bei einem Durchschnittsgewicht von 1,4 Tonnen im Schnitt überschlägig 0,7 bis 0,8 Tonnen Stahl verbaut. Diese Annahme deckt sich mit einer Schätzung von Agora Energiewende (2019), die einen Stahlbedarf von ebenfalls 0,8 Tonnen pro Pkw annimmt. Pro Jahr ergibt sich daraus ein Stahlbedarf von 4,3 Mio. Tonnen – hochgerechnet bis 2045 entspricht dies einem Bedarf von 95 Mio. Tonnen Stahl (Tabelle 1).

Tabelle 2: Vereinfachte Hochrechnung des Gesamt- und jährlichen Stahlbedarfs der Automobilindustrie in Deutschland bis 2045 (in Mio. Tonnen)

| | |
|-------------------------------------|--------------------|
| Stahlbedarf pro Pkw | 0,8 Tonnen |
| Angenommene Pkw-Produktion pro Jahr | 5,4 Mio. Fahrzeuge |
| Stahlbedarf pro Jahr | 4,3 Mio. Tonnen |
| Zeithorizont | 22 Jahre |
| Stahlbedarf bis 2045 | 95,0 Mio. Tonnen |

Quelle: Eigene Darstellung

Bei einer jährlichen Rohstahlproduktion in Deutschland von rund 40 Mio. Tonnen entfallen dieser Berechnung zufolge fast 11% des jährlichen Stahlbedarfs auf die hierzulande ansässige Automobilindustrie. Die Berechnung

bezieht sich nur auf die Pkw-Produktion (ohne Nutzfahrzeuge). Nach Angaben von Gesprächspartnern spiegelt dieser Wert in etwa die Produktionszahlen der Flachstahlhersteller wider, die Stahlprodukte vor allem in den Bereichen Automobilfahrwerk und -karosserie herstellen.

7.2.2. Nachfrage nach grünem Stahl

Deutsche Autobauer wie BMW, Mercedes oder VW haben im Jahr 2021 angekündigt, die CO₂-Emissionen ihrer Stahllieferkette in den nächsten Jahren deutlich senken zu wollen. BMW und Mercedes wollen ab 2025 nahezu CO₂-frei hergestellten Stahl des schwedischen Start-ups H2 Green Steel beziehen, das bei der Stahlproduktion Wasserstoff und Strom aus erneuerbaren Energien einsetzt. Der Stuttgarter Autobauer ist auch an H2 Green Steel beteiligt (Automobil Produktion 2023; Handelsblatt 2021).

Ab 2026 soll bei BMW mehr als ein Drittel des nötigen Stahls durch Verfahren gewonnen werden, bei denen weniger klimaschädliches Kohlendioxid ausgestoßen wird als bei der herkömmlichen Stahlproduktion. Jährlich entspricht das einer Verringerung des CO₂-Ausstoßes um rund 900.000 Tonnen. Bis 2030 soll der Anteil von Sekundärstahl auf bis zu 50% gesteigert werden. In Europa wurde die Salzgitter AG als Partner gewonnen, mit dem entsprechende Verträge geschlossen wurden (WirtschaftsWoche 2022). Auch Volkswagen hat mit der Salzgitter AG die Lieferung von CO₂-armem Stahl ab Ende 2025 vereinbart (Volkswagen 2022). Der erwartete CO₂-Einspareffekt soll nach Abschluss der Transformation bei mehr als 95% liegen.

Neben Kenngrößen wie CO₂-Emissionen, Qualität, Verfügbarkeit (inkl. Lieferzeit) der Produkte sowie Zuverlässigkeit der Lieferanten ist der Preis (inkl. Lieferkosten) der wichtigste Faktor für die Nachfrage nach Stahl bzw. grünem Stahl. Schätzungen von Agora Energiewende (2021a) zufolge könnte der Preis für grünen Stahl um ca. 275 Euro pro Tonne im Vergleich zu herkömmlichem grauem Stahl über die Hochofenroute steigen (+ 74%).

Geringfügige Mehrkosten für Automobilindustrie durch grünen Stahl

Mit Blick auf einen durchschnittlichen Pkw würde die Umstellung deutscher Stahlwerke auf die Produktion von grünem Stahl zu zusätzlichen Kosten in Höhe von weniger als 500 Euro pro PKW führen – das entspräche einer Kostensteigerung von weniger als 1,5 % (Küster Simic/Schönfeldt 2022).

Diese Mehrkosten in geringer Größenordnung dürften keinen wesentlichen Einfluss auf die Nachfrage nach grünem Stahl durch die in Deutschland ansässige Automobilindustrie haben – zumal der Großteil des Stahls lokal bzw. regional in Deutschland gesourct wird. Der Bezug von Stahl außerhalb Europas wäre neben höheren allgemeinen Transportkosten stärker durch Preisschwankungen aufgrund von Wechselkursen, Zöllen, Handelsbeschränkungen oder anderen geopolitischen Faktoren beeinflusst.

Es ist nicht davon auszugehen, dass die Mehrkosten die Wettbewerbsfähigkeit der Automobilhersteller einschränken. Damit verbundene Auswirkun-

gen auf die Beschäftigung sind kaum zu erwarten. Wesentliche Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Primärstahlindustrie in Deutschland im Hinblick auf die Kapazitäten zur Versorgung der Automobilindustrie vollständig transformiert wird und deutsche Stahlstandorte erhalten bleiben.

Bei einer partiellen Transformation der Stahlindustrie bestünde das Risiko, dass Teile der Primärstahlproduktion verlagert würden und die Sourcingstrategien der Automobilindustrie daran angepasst werden müssten. In einigen Fällen könnten die höheren Kosten zu einer Reduzierung der Investitionen und möglicherweise zu Personalabbau führen.

Insgesamt lässt sich festhalten: Die Stahlindustrie und die Automobilindustrie sind Schlüsselindustrien in Deutschland mit wechselseitigen Verflechtungen. Beide müssen grundlegend transformiert werden, um die definierten Ziele einer CO₂-armen Produktionsweise zu erreichen. Werden bspw. Batteriezellen woanders produziert, droht eine Verlagerung von Teilen der Automobilindustrie – das würde auch Stahlstandorte gefährden. Würde umgekehrt die Transformation der Primärstahlindustrie nicht (vollständig) gelingen, hätte dies wesentliche Auswirkungen auf die Sourcingstrategien und die Kostenstrukturen der Automobilindustrie.

Vorteile von geschlossenen Wertschöpfungsketten in Deutschland liegen in engen Lieferbeziehungen und stabilen Logistikkosten. Eine geschlossene Wertschöpfungskette sichert eine zusammenhängende industrielle Basis und Beschäftigung.

Literatur und Quellen

- Agora Energiewende (2019). Wirkungsweise eines CO₂-Preises auf Endprodukte am Beispiel der Stahlverarbeitung in der Automobilindustrie. Abgerufen am 09. Juli 2023 von https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/?tx_agorathemen_themenliste%5Babbildung%5D=2104&tx_agorathemen_themenliste%5Bdateityp%5D=pdf&cHash=2843c4f52cb104370e3dc0cbf54214fa
- Agora Energiewende (2021a). Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Stahlbranche. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaschutzvertraege-fuer-die-industrietransformation-stahl/>
- Agora Energiewende (2021b). Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>
- Agora Energiewende (2023). Klimaneutrales Stromsystem 2035. Abgerufen am 17. August 2023 von https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/A-EW_264_KNStrom2035_WEB.pdf#page=24
- Agora Verkehrswende (2021). Autojobs unter Strom. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/BCG-Jobstudie/64_Jobeffekte.pdf
- ArcelorMittal Deutschland (2023). Auf dem Weg zum grünen Stahl: Unsere Strategie. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/broker.jsp?uMen=582f6fbb-a799-5199-f8b4-947d7b2f25d3&uCon=bbd463e5-b391-6714-d297-3e40f2a4a10b&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000011>
- Automobil Produktion (2023). Mercedes-Benz baut Autos mit grünem Stahl. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.automobil-produktion.de/produktion/mercedes-benz-setzt-ab-2025-auf-gruenen-stahl-fuer-autos-105.html>
- bdew, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2022). Stellungnahme zu den qualitativen Kriterien für die Ausschreibung von zentral untersuchten Flächen. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20221223_Kriterien_zentral_voruntersuchte_Flaechen.pdf

- BMF, Bundesministerium der Finanzen (2022). Förderung von Wasserstoffprojekten. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/DARP/Leuchtturm-Projekte/foerderung-wasserstoffprojekte.html>
- BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2012). Wirtschaftsfaktor Tourismus Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Tourismus/wirtschaftsfaktor-tourismus-in-deutschland-lang.html>
- BMWi (2014). Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Hintergrundinformationen/eeg-2014-infobroschuere-bf.pdf>
- BMWi (2019). Energiewende in der Industrie. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- BMWi (2021). Maritime Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland.
- BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2021. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaefigungszahlen-seit-2000.pdf>
- BMWK (2023a). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- BMWK (2023b). Häufig gestellte Fragen zum IPCEI Wasserstoff. Abgerufen am 03. Juli 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/IPCEI-Wasserstoff/faq-ipcei-wasserstoff.html>
- BMWK (2023c). Habeck legt Arbeitspapier zum Industriestrompreis vor. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/05/20230505-habeck-legt-arbeitspapier-zum-industriestrompreis-vor.html#:~:text=Bundeswirtschafts%2D%20und%20Klimaschutzminister%20Robert%20Habeck,schl%C3%A4gt%20einen%20zweistufigen%20Industriestrom>
- BMWK (2023d). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bmwk.de/Navigation/DE/Wasserstoff/wasserstoffstrategie.html>
- BMWK (2023e). Erneuerbare Energien. Abgerufen am 17. August 2023 von

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>

- BMWK (2023f). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2022.pdf>
- BMWK (2023g). Automobilindustrie. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>
- BMWK (2023h). Markthochlauf für Wasserstoff beschleunigen – Bundeskabinett beschließt Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230726-markthochlauf-fuer-wasserstoff-beschleunigen.html>
- Bundesagentur für Arbeit (2023). Statistiken nach Regionen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Statistiken-nach-Regionen/Politische-Gebietsstruktur-Nav.html>
- Bundesnetzagentur (2023). Smard Strommarktdaten. Kraftwerkskarte. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.smard.de/home/ueberblick#!?mapAttributes=%7B%22date%22:1684756800000,%22state%22:%22plant%22,%22plantState%22:%22map%22%7D&filterAttributes=%7B%22company%22:%22%22,%22region%22:%22%22,%22plant%22:null,%22resource%22:%22%22,%22searchText%22:%22>
- BWE, Bundesverband Windenergie (2022). Funktionsweise von Windenergieanlagen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/>
- BWE (2023). Windindustrie in Deutschland 2023. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.windindustrie-in-deutschland.de/f/8330/0/63726ee0e509f823bc35dbc3/BWE_WiD2023_DE.pdf
- carwow GmbH (2023). Technische Daten, Maße und Ausstattung des Mercedes-Benz C-Klasse Modells. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.carwow.de/mercedes/c-klasse/technische-daten#gref>
- dena, Deutsche Energie Agentur (2022). Entwurf einer industriepolitischen Strategie für erneuerbare Energien und Stromnetze. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/stakeholderdialog-industrielle-produktionskapazitaeten-fur-die-energiewende.pdf?__blob=publicationFile
- Deutsche Bundesregierung (2023). Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen. Abgerufen am 17. August 2023 von

<https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310>

- DIHK, Deutsche Industrie- und Handelskammer (2023). Adrian: "Brauchen niedrigere Strompreise für die ganze Wirtschaft". Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.dihk.de/de/aktuelles-und-presse/aktuelle-informationen/adrian-brauchen-niedrigere-strompreise-fuer-die-ganze-wirtschaft--98334#:~:text=%22Wir%20brauchen%20in%20Deutschland%20niedrigere,dr%C3%A4ngendsten%20Probleme%20der%20Unternehmen%20zusamme>
- Dillinger Hüttenwerke (2023). Alles dreht sich um Stahl - Stahllösungen für Offshore-Windkraftanlagen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/8966>
- DIW Econ (2015). Die Beschäftigungseffekte der Energiewende. Abgerufen am 17. August 2023 von https://diw-econ.de/wp-content/uploads/804_DIW-Econ_Besch%C3%A4ftigungseffekte-der-Energiewende_v5.0.pdf
- DIW Econ (2017). Volkswirtschaftliche Bedeutung der Gipsindustrie im Südharz. Abgerufen am 17. August 2023 von https://diw-econ.de/wp-content/uploads/812_DIW-Econ_Volkswirtschaftliche-Bedeutung-der-Gipsindustrie-im-Suedharz_v4.0.pdf
- DIW Econ (2021). Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Gipsindustrie im Harz. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://diw-econ.de/publikationen/die-volkswirtschaftliche-bedeutung-der-gipsindustrie-im-harz/>
- DIW Econ (2022). Volkswirtschaftliche Bedeutung der Baustoff-Stein-Erden-Industrie einschließlich indirekter und induzierter Effekte. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Studie_Volkswirtschaftliche_Bedeutung.pdf
- DIW Econ und Wuppertal Institut (2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>
- DIW et al. (2018): Ökonomische Indikatoren des Energiesystems. Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000 – 2016. GWS Research Report 2018/01. Abgerufen am 12. Juni 2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/oekonomische-indikatoren-und-energiewirtschaftliche-gesamtrechnung.pdf?__blob=publicationFile&v=16
- DWV, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (2019): H2-Industrie Potenzialstudie Brandenburg: Studie zur Identifizierung und Analyse der Chancen und Potenziale zur Wasserstoffnutzung und Ansiedlung einer Wasserstoffindustrie im Land Brandenburg,

insbesondere unter Beachtung der energie- und industriepolitischen Aspekte. Abgerufen am 28. Mai 2023 von https://mwae.brandenburg.de/media/bb1.a.3814.de/Wasserstoff_Industrie_Potenzialstudie_Brandenburg.pdf

- Ehlert-Hoshmand, J. et al. (2019). Die Rolle Von Stahl in der Elektromobilität. Abgerufen am 13. Juni 2023 von <https://www.voestalpine.com/blog/de/mobilitaet/automotive/die-rolle-von-stahl-in-der-elektromobilitaet/>
- Eickholt, J. (2022). Europas Energiewende: Warum wir ein kohärentes Konzept für Rohmaterialien brauchen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.linkedin.com/pulse/europas-energiewende-warum-wir-ein-koh%25C3%25A4rentes-konzept-jochen-eickholt/?trackingId=nNGMaqecX9yeD%2BvMR5u7XA%3D%3D>
- Enargus (2022). Sinteranlage. Abgerufen am 15. Juni 2023 von https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d11585-2/*/*Sinteranlage.html?op=Wiki.getwiki#:~:text=Eine%20Sinteranlage%20ist%20eine%20Anlage,und%20wird%20als%20Gangart%20bezeichnet
- ENBW, Energie Baden-Württemberg AG (2023). Wunderwerk Windkraftanlage: Interessante Fakten über einen der wichtigsten Bausteine der Energiewende. Abgerufen am 17. August 2023 von [https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/windkraftanlagen.html#:~:text=Ein%20Windrad%20ist%20im%20Durchschnitt,Meer\)%20bis%20zu%2015%20MW.](https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/windkraftanlagen.html#:~:text=Ein%20Windrad%20ist%20im%20Durchschnitt,Meer)%20bis%20zu%2015%20MW.)
- Enkhardt, S. (2019): SI Module stellt Produktion Ende März ein. pv magazine, 21. März 2019. Abgerufen am 12. Juni 2023 von <https://www.pv-magazine.de/2019/03/21/si-module-stellt-produktion-ende-maerz-ein/>
- E.ON (2023). Deutschlands Wasserstoff-Produktion im Überblick. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.eon.com/de/wasserstoff/h2-bilanz/erzeugung-verbrauch.html>
- Europäische Kommission (2022). Index für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft (DESI) 2022.
- Europäische Kommission (2023). The Net-Zero Industry Act: Accelerating the transition to climate neutrality. Abgerufen am 17. August 2023 von https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en
- EWI, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2023). Datengrundlage für die E.ON H2Bilanz 2023. Abgerufen am 28. Mai 2023 von <https://www.eon.com/de/wasserstoff/h2-bilanz/erzeugung-verbrauch.html>
- Falck, O. et al. (2021). Auswirkungen der vermehrten Produktion elektrisch betriebener Pkw auf die Beschäftigung in Deutschland. Ifo Institut.

- Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.ifo.de/DocDL/ifoStudie-2021_Elektromobilitaet-Beschaeftigung.pdf
- FAZ, Frankfurter Allgemeine Zeitung (2023). Windräder auf See beflügeln die saarländische Stahlindustrie. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/wie-windraeder-auf-see-die-saarlaendische-stahlindustrie-befluegeln-18832868.html>
- FCH 2 JU, Fuel Cells/Hydrogen 2 Joint Undertaking (2019). Hydrogen Roadmap Europe. A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Luxembourg
- Fell, H.-J. (2023): China überholt die Welt bei Elektroautos und Erneuerbaren. pv magazine, 19. April 2023. Abgerufen am 12 Juni von <https://www.pv-magazine.de/2023/04/19/china-ueberholt-die-welt-bei-elektroautos-und-erneuerbaren/>
- FNB Gas, Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V. (2021). Wasserstoffnetz für ein klimaneutrales Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/11/20211101_FNB_Gas_Erklaertext-H2_Netz_2050.pdf
- FNB Gas (2023). Wasserstoffnetz 2030: Aufbruch in ein klimaneutrales Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-netz-2030/>
- Fraunhofer ISE (2021). Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf
- Fraunhofer ISE (2023). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
- Gehrke, B. et al. (2017). Die regionalökonomische Bedeutung der Stahlindustrie in Bremen. Center für Wirtschaftspolitische Studien (CWS) des Instituts für Wirtschaftspolitik der Leibniz Universität Hannover. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.arbeitnehmerkammer.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Politik/Wirtschaft_Infrastruktur/Stahlindustrie_Bremen.pdf
- GlobalPetrolPrices (2023). Strompreise. Abgerufen am 03. Juli 2023 von https://de.globalpetrolprices.com/electricity_prices/
- Goldman Sachs (2022). Carbonomics - The clean hydrogen revolution. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution.pdf>

- Grimm, A/Pfaff, M. (2022). Transformation der Wertschöpfung in der Automobilbranche. Hans-Böckler-Stiftung. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008335/p_fofoe_WP_249_2022.pdf
- Handelsblatt (2021). BMW will ab 2025 klimafreundlichen Stahl einsetzen. Abgerufen am 15. Juni 2023 von <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autobauer-bmw-will-ab-2025-klimafreundlichen-stahl-einsetzen/27721026.html>
- Handelsblatt (2023a). Thyssen-Krupp und Salzgitter loten CO₂-freie Produktion bei HKM aus. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/stahlindustrie-thyssen-krupp-und-salzgitter-loten-co2-freie-produktion-bei-hkm-aus/29154480.html#:~:text=Die%20beiden%20deutschen%20Gesellschafter%20seien,sollen%20bis%20Ende%202023%20vorliegen.>
- Handelsblatt (2023b). Pkw-Nachfrage legt im Juni um ein Viertel zu – Elektroautos besonders gefragt. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autoindustrie-pkw-nachfrage-legt-im-juni-um-ein-viertel-zu-elektroautos-besonders-gefragt/29238990.html?tm=login>
- Heismann, G./Stölzel, T. (2023): Da macht einer Dampf. WirtschaftsWoche, 1-2, 21. April 2023
- Höpner, A. (2023). Europa könnte so eine starke Windkraftindustrie haben. Handelsblatt, 19. Juli 2023. Abgerufen am 20. Juli 2023 von <https://www.handelsblatt.com/meinung/kommentare/kommentar-europa-koennte-so-eine-starke-windkraftindustrie-haben/29264278.html>
- Hydrogen Council (2021). Hydrogen decarbonization pathways: A life-cycle assessment. Abgerufen am 17. August 2023 von https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/01/Hydrogen-Council-Report_Decarbonization-Pathways_Part-1-Lifecycle-Assessment.pdf
- Hydrogen Council/McKinsey & Company (2022). Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Abgerufen am 16. August 2023 von <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>
- IEA, International Energy Agency (2022). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>
- ifo Institut (2023). Fertigungsberufe in Autoindustrie seit 2013 um 9% zurückgegangen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.ifo.de/pressemitteilung/2023-03-17/fertigungsberufe-autoindustrie-seit-2013-zurueckgegangen>
- IHK, Industrie- und Handelskammer Rhein-Neckar (2023). CBAM – CO₂-Grenzausgleichsabgabe. Abgerufen am 17. August 2023 von

<https://www.ihk.de/rhein-neckar/international/export-import/einfuhr/cbam-co2-grenzausgleichsabgabe-4879650>

- IPE, Institut für Politikevaluation GmbH et al. (2019). Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- IW Consult (2017). Potentiale des digitalen Wertschöpfungsnetztes Stahl.
- Küster Simic, A./Schönfeldt, J. (2022). H2-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus. Hans-Böckler-Stiftung. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-008461
- Lindner, E. (2020). Der Beitrag nicht-ökonomischer Effekte des Tourismus für den ländlichen Raum. Bayrisches Zentrum für Tourismus e. V. Abgerufen am 17. August 2023 von https://partner.ostbayern-tourismus.de/wp-content/uploads/2021/06/Studie-L%C3%A4ndlicher-Raum_BZT.pdf
- Ludwig, T. et al. (2023). Branchenanalyse Windindustrie. Hans-Böckler-Stiftung. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008564/p_fofoe_WP_273_2023.pdf
- McKinsey & Company (2022a). Closing Europe's green-metallics gap. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/closing-europes-green-metallics-gap>
- McKinsey & Company (2022b). Five charts on hydrogen's role in a net-zero future. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future>
- MeinAuto GmbH (2023). Wie schwer ist ein Auto? Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.meinauto.de/lp-wie-schwer-ist-ein-auto>
- Merten, F et al. (2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH.
- Monsef, R./Wendland, F.A. (2022). Beschäftigte im Bereich erneuerbare Energien. Renaissance der beruflichen Ausbildung. IW-Report 57/2022. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.iwkoeln.de/studien/roschan-pourkhataei-monsef-finn-ard-wendland-renaissance-der-beruflichen-ausbildung.html>
- Nationaler Wasserstoffrat (2022). Fachkräfte im Bereich Wasserstoff: Handlungsbedarfe. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/2022-11-04-NWR-Grundlagenpapier_Handlungsbedarfe-Fachkraefte.pdf

- NDR, Norddeutscher Rundfunk (2022). Nordex hat sein Werk in Rostock geschlossen. Pressemeldung, 30.06.2022. Abgerufen am 4. Juli 2023 von <https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Nordex-schliesst-heute-sein-Werk-in-Rostock,nordex220.html>
- Pertschy, F. (2021). Analyse zum Fachkräftemangel: Diese Stellen sind in der Autoindustrie unbesetzt. Automobil Produktion, 25. Feb. 2021. <https://www.automobil-produktion.de/management/diese-stellen-sind-in-der-autoindustrie-unbesetzt-119.html>
- Photovoltaik One (2022). Top 10 der größten Solarmodulhersteller der Welt. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://photovoltaik.one/solarmodulhersteller>
- Preuß, O. (2021). Warum Cuxhaven das erfolgreiche Zentrum der deutschen Windkraft-Industrie ist. Welt Online, 10. August 2021. Abgerufen am 14. Juni 2023 von <https://www.welt.de/regionales/hamburg/article233017183/Ideale-Bedingungen-Warum-Cuxhaven-das-erfolgreiche-Zentrum-der-deutschen-Windkraft-Industrie-ist.html>
- Prognos AG (2019a). Jobwende. Effekte der Energiewende auf Arbeit und Beschäftigung. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://library.fes.de/pdf-files/fes/15696-20210201.pdf>
- Prognos AG (2019b). Kurzstudie: Beschäftigung und Wertschöpfung in der deutschen Onshore-Windindustrie. Szenarien zum künftigen Ausbau der Onshore-Windenergie und Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/2019-10-10_prognos_kurzstudie_windkraft.pdf
- Prognos AG (2019c). Kosten für strombasierte Energieträger. Vortragspräsentation.
- Prognos AG (2022). Strompreisprognose. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.prognos.com/de/projekt/strompreisprognose-2023>
- Reimer, N. (2019). Solarzellen. Die Hoffnung ist biegsam. Zeit Online, 29. Dezember 2019. Abgerufen am 8. Juli 2023 von <https://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2019-12/solarzellen-herstellung-deutschland-firma-heliatek/komplettansicht>
- Roland Berger (2020a). Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg. Abgerufen am 17. August 2023 von https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf
- Roland Berger (2020b). The future of steelmaking. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_future_of_steelmaking.pdf

- Roland Berger (2021). Integriertes Konzept statt Einzellösungen: Wie Unternehmen die digitale Fabrik erfolgreich umsetzen.
- S&P Global (2023). Potential US, EU clean metal cooperation still in 'early days': Aluminum Association.
- Salzgitter AG (2023a). Salzgitter AG erhält Bescheid für staatliche Förderung des SALCOS®-Programms zur CO2-armen Stahlproduktion.
- Salzgitter AG (2023b). Das Konzept für eine nachhaltige Zukunft - Unser Projekt SALCOS. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/salcos.html>
- Schwichtenberg, L. (2022). So lang braucht eine Windkraftanlage, um seine Herstellung zu kompensieren. Abgerufen am 17. August 2023 von https://efahrer.chip.de/e-wissen/so-lang-braucht-eine-windkraftanlage-um-seine-herstellung-zu-kompensieren_109972
- SHS, Stahl-Holding-Saar GmbH & Co. KGaA (2023). Investition von historischem Ausmaß für mehr Klimaschutz: Aufsichtsräte beschließen Investitionen in Höhe von 3,5 Milliarden für grünen Stahl von der Saar. Abgerufen am 25 August 2023 von <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/investition-von-historischem-ausmass-fuer-mehr-klimaschutz-aufsichtsrate-beschliessen-investitionen-in-hoehe-von-3-5-milliarden-fuer-gruenen-stahl-von-der-saar-105074.shtml>
- Spiegel Online (2023a). Berechnungen der Betreiber: Speicher drohen beim Umstieg auf Wasserstoff knapp zu werden. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/gasspeicher-drohen-beim-umstieg-auf-wasserstoff-knapp-zu-werden-a-a2009622-0713-4344-84e5-400827feceb5?sara_ref=re-so-app-sh
- Spiegel Online (2023b). Vattenfall stoppt Bau von Meereswindpark. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/vattenfall-stoppt-bau-von-meereswindpark-a-af692f86-29c2-4aed-8d4c-5e4c72cb9f57?sara_ref=re-so-app-sh
- Stadt Mülheim an der Ruhr (2023). Bevölkerungsbestand 2022. Abgerufen am 30. Juni 2023 von <https://www.muelheim-ruhr.de/cms/bevoelkerungsbestand1.html>
- Statista (2023a). Electricity prices for non-household consumers in the European Union in 2022, by country. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.statista.com/statistics/1046605/non-household-electricity-prices-european-union-country/>
- Statista (2023b). Gesamter Umsatz der Automobilhersteller aus Deutschland von 2000 bis 2022. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/234402/umfrage/umsatz-deutscher-automobilhersteller/>

- Statistisches Bundesamt (2021). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Input-Output-Rechnung. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200207005.html>
- Statistisches Bundesamt (2023). Anzahl produzierter Elektrofahrzeuge (BEV) in Deutschland von 2019 bis 2022. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1309518/umfrage/produktion-von-elektroautos-bev-in-deutschland/>
- Stecherle, P. et al. (2021b). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update November 2021: Klimaneutralität 2045. Fraunhofer ISE. Abgerufen am 14. Juni 2023 von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf>
- Steinhaus, H./Emons, O. (2023). Branchenmonitor Wasserstoff: Herstellung von Industriegasen. Hans-Böckler-Stiftung. Abgerufen am 12. Juli 2023 von <https://www.mitbestimmung.de/html/wasserstoff-23455.html>
- Steinhaus, H./Kraft, S. (2023): Branchenmonitor Automobilindustrie. Hans Böckler Stiftung. Abgerufen am 12. Juli von <https://www.mitbestimmung.de/html/automobilindustrie-droht-existenzielle-14712.html>
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2022). Branchenausblick 2030+: Automotive mit Schwerpunkt Ostdeutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/StAuU_BA_Automotive_20220308.pdf
- Stratmann, K. (2023). Klimaneutrale Industrie: Habeck will offenbar keine staatliche Wasserstoffnetzgesellschaft mehr. Handelsblatt, 02. Mai 2023. Abgerufen am 14. Juni 2023 von <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/klimaneutrale-industrie-habeck-will-offenbar-keine-staatliche-wasserstoffnetzgesellschaft-mehr/29125772.html>
- ter Hauseborg, V. (2023). So verzweifelt suchen Audi, BMW, Daimler, Porsche und VW nach Mitarbeitern. WirtschaftsWoche Online, 03. März 2023. Abgerufen am 17. Juni 2023 von <https://www.wiwo.de/my/unternehmen/auto/die-personalnot-in-vier-grafiken-so-verzweifelt-suchen-audi-bmw-daimler-porsche-und-vw-nach-mitarbeitern-/29011484.html>
- Thyssenkrupp AG (2023). thyssenkrupp Steel vergibt Milliardenauftrag für Direktreduktionsanlage an SMS group: Start eines der weltweit größten industriellen Dekarbonisierungsprojekte. Abgerufen am 17. August 2023 von

<https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/presdetailseite/thyssenkrupp-steel-vergibt-milliardenauftrag-fur-direktreduktionsanlage-an-sms-group--start-eines-der-weltweit-grossten-industriellen-dekarbonisierungsprojekte-163183>

- Todtmann (2022). Nein, eine Windkraftanlage besteht nicht aus 4000 Tonnen Stahl. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://faktencheck.afp.com/doc.afp.com.32PM4WB>
- Ulrich, P./Lehr, U. (2018). Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern – Bericht zur aktualisierten Bruttobeschäftigung 2016 in den Bundesländern. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erneuerbar-beschaeftigt-in-den-bundeslaendern.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- UM BW, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg (2020). Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg.
- Umweltbundesamt (2023a). Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2022. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-03-16_uba_hg_erneuerbareenergien_dt_bf.pdf
- Umweltbundesamt (2023b). Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2022 nach KSG. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>
- Uniper SE (2023). Von Wilhelmshaven zu den Industriezentren in NRW und Niedersachsen: Unternehmensallianz verbindet Projekte für Wasserstoffimport, -produktion, -transport und -verbrauch. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.uniper.energy/news/de/von-wilhelmshaven-zu-den-industriezentren-in-nrw-und-niedersachsen-unternehmensallianz-verbindet-projekte-fuer-wasserstoffimport--produktion--transport-und--verbrauch>
- VCI, Verband der Chemischen Industrie e.V. (2023). Chemiewirtschaft in Zahlen. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>
- VDA, Verband der Automobilindustrie e. V. (2023a). Studie: Bis 2026 drohen wegen Halbleitermangel weltweit 20 Prozent weniger produzierte Fahrzeuge. Abgerufen am 17. August 2023 von https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2023/230126_PM_Studie_Bis_2026_drohen_wegen_Halbleitermangel_weltweit-20-Prozent_weniger_produzierte_Fahrzeuge
- VDA (2023b). Anzahl der produzierten Personenkraftwagen in Deutschland von 1990 bis 2022. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75210/umfrage/produktion-von-pkw-in-deutschland-seit-1990/>

- VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2022). Fachkräftemangel bedroht Energiewende. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.vdi.de/news/detail/fachkraeftemangel-bedroht-energiewende>
- Vestas (2023). Wind-Turbine-Models. Abgerufen am 4. Juli 2023 von <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/2317-vestas-v236-15.0>
- Volkswagen AG (2022). Volkswagen AG und Salzgitter AG vereinbaren die Lieferung von CO2-armem Stahl ab Ende 2025. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-ag-und-salzgitter-ag-vereinbaren-die-lieferung-von-co2-armem-stahl-ab-ende-2025-7816>
- Vorholz, F. (2012): Energiewende: Sonnenstrom ist rot. DIE ZEIT Nr. 16/2012, 12. April 2012. Abgerufen am 15. Juni von <https://www.zeit.de/2012/16/AM-Analyse-Solar>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022a). Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.stahl-online.de/publikationen/fakten-zur-stahlindustrie-in-deutschland-2022/>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022b). Stahlstandort Deutschland. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.stahl-online.de/startseite/stahl-in-deutschland/#:~:text=Deutschland%20ist%20mit%20einer%20j%C3%A4hrlichen,gr%C3%B6%C3%9Ften%20stahlerzeugenden%20L%C3%A4ndern%20der%20Welt>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022c). Definition Grüner Stahl – Ein Labelsystem für Grüne Leitmärkte. Abgerufen am 16. August 2023 von https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2022-10-25_Papier_Definition-Gruener-Stahl_Ein-Label-System-Gruene-Leitmaerkte.pdf
- WirtschaftsWoche (2022). BMW sichert sich CO2-reduzierten Stahl. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/autoindustrie-bmw-sichert-sich-co2-reduzierten-stahl/28811014.html>
- WirtschaftsWoche (2023). Aus diesen Kraftwerken wird Strom nur 1 Cent pro Kilowattstunde kosten. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.wiwo.de/technologie/wirtschaft-von-oben/wirtschaft-von-oben-200-billige-sonnenenergie-aus-diesen-kraftwerken-wird-strom-nur-1-cent-pro-kilowattstunde-kosten/29016634.html#:~:text=Wirtschaft%20von%20oben%20%23200%20%E2%80%93%20Billige,1%20Cent%>
- Witsch, K. (2019). Windkonzern Senvion meldet Insolvenz an. Handelsblatt, 09. April 2019. Abgerufen am 12. Juni 2023 von

<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/erneuerbare-energien-windkonzern-senvion-meldet-insolvenz-an/24199014.html>

World Steel Association (2014-2023). World Steel in Figures. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures/>

Zika, G. et al. (2022). Die Folgen der neuen Klima- und Wohnungsbaupolitik des Koalitionsvertrags für Wirtschaft und Arbeitsmarkt. IAB, Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Forschungsbericht No. 3/2022. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.econstor.eu/handle/10419/253704>

zum Felde, T. (2022). Wasserstoffwirtschaft: Warum jetzt dringend Fachkräfte für den Arbeitsmarkt der Zukunft benötigt werden. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.lern-und-berufswelt.de/personalwesen/wasserstoffwirtschaft-warum-jetzt-dringend-fachkraefte-fuer-den-arbeitsmarkt-der-zukunft-benoetigt-werden/>