DIW ECON

Das Consulting-Unternehmen des DIW Berlin

Beschäftigungseffekte der Wasserstoffwirtschaft

Nettobeschäftigungseffekte in der Stahlindustrie und im Schwerlastverkehr

Ein Arbeitspapier im Rahmen des Wasserstoffatlas Deutschland

DIW Econ GmbH

Mohrenstraße 58

10117 Berlin

Kontakt:

Dr. Lars Handrich

Tel. +49.30.20 60 972 - 0

Fax +49.30.20 60 972 - 99

service@diw-econ.de

www.diw-econ.de

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

30. Juni 2024

Kurzfassung

Deutschland hat sich mit dem Klimaschutzgesetz das Ziel gesetzt, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden. Trotz der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen befinden sich diese immer noch auf einem hohen Niveau, wobei insbesondere die Grundstoffproduktion und der Straßenverkehr vor großen Dekarbonisierungsherausforderungen stehen. Da diese Sektoren zum Teil nur schwer elektrifizierbar sind, müssen hier andere technologische Lösungen gefunden sowie Prozesse auf biogene und synthetische Energieträger (PtX) umgestellt werden.

Die notwendige Transformation des deutschen Industrie- und Verkehrssektors wird gleichzeitig zu einem Wandel der Wertschöpfungsketten und des Arbeitsmarktes führen. Traditionelle Berufsfelder werden sich in Zukunft verändern, bestimmte Arbeitsplätze komplett wegfallen, aber auch neue Arbeitsplätze und Berufe entstehen. Gerade für die Automobilindustrie wird oft die Sorge geäußert, dass durch die Transformation hin zur Elektromobilität mehr bestehende Arbeitsplätze wegfallen als neue entstehen werden.

Ziel der vorliegenden Studie im Rahmen von Wasserstoffatlas Deutschland ist es daher, die Nettobeschäftigungseffekte der Dekarbonisierung für ausgewählte Industrien in Deutschland zu ermitteln. Der Fokus liegt dabei auf zwei Branchen, in denen Wasserstoff potentiell eine wichtige Rolle spielen wird: der Stahlerzeugung und dem Schwerlastverkehr (Lkw-Herstellung). Den Beschäftigungseffekten im Betrieb der Stahlwerke und in der Lkw-Herstellung werden die Beschäftigungspotentiale aus dem Aufbau der Wasserstoffwirtschaft gegenübergestellt. Für die Stahlindustrie wird zusätzlich der Nettobeschäftigungsbedarf durch Investitionen in Anlagen zur Herstellung von grünem Stahl ermittelt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die durch die Prozessumstellung ausgelösten Veränderungen in beiden Sektoren marginal sind. In der Stahlindustrie könnten bis 2045 bis zu 1,7 Tsd. Arbeitsplätze gegenüber dem heutigen Niveau verloren gehen, was 1,8 Prozent der heutigen Beschäftigung in der Stahlerzeugung entspricht. Dieser Rückgang wird jedoch durch das Beschäftigungspotential im Betrieb der PtX-Erzeugungsanlagen kompensiert. In der Schwerlastbranche kommt es nur zu einem leichten Beschäftigungsrückgang von ca. 1 Tsd. Arbeitsplätzen, wenn die Batterie- bzw. Brennstoffzellenproduktion und das prognostizierte Wachstum der Lkw-Flotte im deutschen Güterverkehr nicht berücksichtigt werden. Angesichts des Rückgangs der Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter sind diese Beschäftigungsveränderungen eher marginal. Da jedoch ein Teil der bestehenden Arbeitsplätze eine Anpassung der benötigten Kompetenzen erfordern wird, wird es in den kommenden Jahren von entscheidender Bedeutung sein, sowohl in der Erstausbildung als auch in der Weiterbildung die entsprechenden Weichen zu entwickeln.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 1
2. Sektorale Abgrenzung ... 3
2.1 Stahlindustrie: Umstellung der Stahlproduktion ... 3
2.2 Schwerlastverkehr: Umstellung auf klimaneutrale Lkw ... 9
3. Methodik ... 14
3.1 Stahlindustrie ... 15
3.2 Schwerlastverkehr ... 20
3.3 Beschäftigung aus PtX-Erzeugung ... 26
4. Ergebnisse ... 27
4.1 Stahlindustrie ... 27
4.2 Schwerlastverkehr ... 32
5. Zusammenfassung ... 34
Literaturverzeichnis ... 36
Anhang A. Beschäftigung in deutschen Stahlwerken ... 45
Anhang B. Input-Output-Analyse ... 46
Anhang C. Produktverzeichnis Lkw-Herstellung ... 47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Rohstahlproduktion in Mt nach Herstellungsroute, 2017- 2023 4
Abbildung 2-2: Rohstahlproduktion in Mt nach Regionen, 2021 5
Abbildung 2-3: Produktionskapazitäten in der Primär- und Sekundärstahlproduktion (ohne DRI-Anlagen), 2020 6
Abbildung 2-4: Zusammensetzung der Investitionskosten für DRI-EAF-Anlagen 7
Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau eines Lkw mit Diesel-, Brennstoffzellen- und batterieelektrischem Antrieb 12
Abbildung 3-1: Lernkurve des Beschäftigungsmultiplikators für EAF-Stahlwerke 17
Abbildung 3-2: Entwicklung der Stahlproduktion in Mt nach LFS-Szenario und Technologie 18
Abbildung 3-3: Unterschied in der Anzahl Beschäftigter je 1.000 mittlere und schwere Lkw im Vergleich zum Diesel-Lkw 24
Abbildung 3-4: Bestand mittlerer und schwerer Lkw in Tsd. nach Antriebsart und LFS-Szenario 25
Abbildung 4-1: Nettobeschäftigungseffekte im Betrieb der Anlagen zur Stahl- und PtX-Erzeugung 28
Abbildung 4-2: Sensitivitätsanalyse der Nettobeschäftigungseffekte im Betrieb der Stahlerzeugungsanlagen 30
Abbildung 4-3: Beschäftigung aus Investitionen in DRI-EAF- und EAF-Anlagen im Vergleich zu Reinvestition 31
Abbildung 4-4: Nettobeschäftigungseffekte aus Lkw-Herstellung im Vergleich zu Status Quo und zu Business as Usual 33
Abbildung 4-5: Nettogesamteffekte im Schwerlastverkehr (im Vergleich zu Business as Usual) 33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht über Hersteller von Direktreduktionsanlagen 7
Tabelle 3-1: Investitionskosten der Stahlerzeugungsanlagen, EUR/t Stahl 20
Tabelle 3-2: Angenommene Batteriekapazitäten in kWh für mittlere und schwere Lkw..... 23
Tabelle 3-3: Multiplikatoren für Kern- und Gesamtbeschäftigung je 1 TWh PtX..... 26

Abkürzungsverzeichnis*

CO_2	Kohlenstoffdioxid
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl. battery electric vehicle)
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMF	Bundesfinanzministerium
BOF	Hochofen / Oxygenstahlwerk (engl. basic oxygen furnace)
DAC	Kohlenstoffdioxidabscheidung aus Luft (engl.: direct air capture)
DRI	Direktreduktion von Eisenerz (engl. direct reduced iron)
EAF	Elektrolichtbogenofen (engl. electric arc furnace)
EU	Europäische Union
EUR	Euro
FCEV	Brennstoffzellen-Fahrzeug (engl. fuel cell electric vehicle)
FTE	Vollzeitäquivalente (engl. full-time equivalent)
GWh	Gigawattstunde
H_2	Wasserstoff
IEA	Internationale Energieagentur
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LFS	Langfristszenarien
Lkw	Lastkraftwagen
Mio.	Million
Mt	Million Tonnen
Pkw	Personenkraftwagen

PtG	Power-to-Gas, Bezeichnung für die Produktion gasförmiger synthetischer Energieträger aus Strom
PtL	Power-to-Liquid, Bezeichnung für die Produktion flüssiger synthetischer Energieträger aus Strom
PtX, P2X	Power-to-X, Bezeichnung für die Erzeugung synthetischer Energieträger aus Strom
THG	Treibhausgase
Tsd.	Tausend
TWh	Terrawattstunde
Wh	Wattstunde
WZ	Wirtschaftszweig

1. Einleitung

Deutschland hat sich mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (§ 3 Absatz 2) das Ziel gesetzt, schrittweise bis 2045 treibhausgasneutral zu werden (Bundes-Klimaschutzgesetz 2021). Auch wenn in den letzten Jahren viel Fortschritt in Emissionsreduktion erreicht wurde, liegt der Ausstoß der Treibhausgase (THG) in allen Sektoren weiterhin auf einem hohen Niveau. Grundstoffproduktion und Straßenverkehr stehen dabei vor besonderen Herausforderungen.

Beispielsweise war in 2021 die Stahlindustrie mit 54,5 Millionen Tonnen (Mt) CO_2-Äquivalente für ca. 7 Prozent der THG-Emissionen der deutschen Wirtschaft verantwortlich (Günther, et al. 2023). Um weiter die Stahlnachfrage zu decken und die Stahlproduktion auch in einem klimaneutralen Deutschland zu erhalten, ist eine Umstellung des Herstellungsprozesses erforderlich. Hierbei stehen die Verwendung von Wasserstoff-Direktreduktionsanlagen (DRI) und der vermehrte Einsatz von elektrischen Lichtbogenöfen (engl. electric arc furnace – EAF) im Fokus. DRI-Anlagen, ähnlich den Hochöfen entlang der Hochofenroute (engl. basic oxygen furnace – BOF), entziehen dem Eisenerz Sauerstoffmoleküle, um Roheisen zu erzeugen. Die Lichtbogenöfen übernehmen dann den letzten Schritt bei der Herstellung von Stahl aus Roheisen oder werden für das Stahlrecycling verwendet (Stahlinstitut VDEh b).

Ein weiterer relevanter Sektor ist der Schwerlastverkehr. Während die Verbrennungsmotoren immer effizienter werden, steigt das Transportaufkommen deutlich schneller, so dass die THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs zwischen 1995 und 2024 um 21 Prozent gestiegen sind (Umweltbundesamt 2024). Der Schwerlastverkehr war dabei in 2019 mit 42 Mt CO_2-Äquivalente für über drei Viertel der Emissionen des Straßengüterverkehrs verantwortlich (Biemann, et al. 2024). Während zwar die Verwendung von strombasierten synthetischen Kraftstoffen regelmäßig diskutiert wird, implizieren die von der EU kürzlich beschlossenen CO_2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge erhöhte Anforderungen an den Anteil der emissionsfreien Lkw (Wietschel, et al. 2023, Gray, McDonagh, et al. 2021, Verordnung (EU) 2024/1610). Damit liegt der Fokus auf den effizienteren batterieelektrischen und (wasserstoffbasierten) Brennstoffzellen-Lkw (Gray, McDonagh, et al. 2021). Da die Batterien nach heutigem Stand der Technik jedoch insbesondere bei Langstrecken noch keine ausreichende Reichweite für schwere Fahrzeuge bieten, wird dem Wasserstoff in den meisten Dekarbonisierungsszenarien eine wichtige Rolle zugeschrieben (Samadi 2022).

Um die Auseinandersetzung regionaler Stakeholder mit dem Aufbau der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland anzuregen, werden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung

(BMBF) finanzierten Projekts „Wasserstoffatlas Deutschland“ der Stand und die Potentiale der deutschen Wasserstoffwirtschaft analysiert.[1] Neben der Analyse der Produzenten von Wasserstoff ist auch die Betrachtung der (potentiellen) Wasserstoffnachfrager relevant. Darüber hinaus liefert das Teilprojekt Power2Jobs Analysen und Prognosen zu angrenzenden Themenfeldern, wie die Beschäftigungseffekte durch PtX-Produkte.[2]

In diesen Themenkomplex reiht sich auch die vorliegende Studie ein. Denn in beiden Sektoren Stahlerzeugung und Schwerlastverkehr wird die Dekarbonisierung zu einer Transformation der Wertschöpfungsketten führen. Entsprechend werden auch traditionelle Berufsfelder transformiert. Bestimmte Arbeitsplätze werden im Zuge der Transformation wegfallen, andere werden in anderer Art und Weise ausgeführt werden und wiederum andere Arbeitsplätze werden neu geschaffen. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, die Nettobeschäftigungseffekte[3] für die jeweilige Industrie in Deutschland zu ermitteln. Der Fokus liegt dabei auf dem Betrieb deutscher Stahlerzeugungsanlagen und inländischer Lkw-Produktion für den deutschen Schwerlastverkehr. Da die Prozessumstellung in der Stahlindustrie auch mit signifikanten Investitionen einhergeht, und diese ebenfalls Beschäftigungseffekte haben, werden die Dekarbonisierungsinvestitionen in der Stahlindustrie ebenfalls berücksichtigt.

Der Beschäftigungsänderung in Stahlerzeugung und Lkw-Herstellung selbst werden die potentiellen Beschäftigungseffekte aus heimischer Produktion von PtX-Produkten und Batterien bzw. Brennstoffzellen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass in einzelnen Bereichen zwar leichte negative Effekte durch Dekarbonisierung entstehen können, der Gesamtnettoeffekt jedoch weitgehend positiv ist.

Die Studie ist wie folgt aufgebaut: Im Abschnitt 2 wird zunächst eine Abgrenzung der Analyse für die Sektoren Stahlindustrie und Schwerlastverkehr vorgenommen. Im Abschnitt 3 wird die Berechnungsmethodik erklärt. Abschnitt 4 beschreibt die Ergebnisse für die beiden Sektoren, und Abschnitt 5 fasst die Erkenntnisse der Studie zusammen.

---

[1] www.wasserstoffatlas.de

[2] Unter PtX (Power-to-X, auch P2X geschrieben) werden Technologien zur Herstellung gasförmiger oder flüssiger stofflicher Energieträger (Wasserstoff, synthetisches Methan, Methanol, Ammoniak, synthetische Ottokraftstoff, Diesel und Kerosin) unter Einsatz von (erneuerbarem) Strom verstanden (BMBF kein Datum).

[3] Der Nettobeschäftigungseffekt in den jeweiligen Sektoren ist die Differenz zwischen der Zahl der Beschäftigten unter der Annahme der Dekarbonisierung und der Zahl der Beschäftigten, wenn die Dekarbonisierung nicht erfolgt.

2. Sektorale Abgrenzung

2.1 Stahlindustrie: Umstellung der Stahlproduktion

Die Stahlindustrie umfasst eine Wertschöpfungskette von Rohstahlerzeugung aus Eisenerz oder Stahlschrott bis hin zu Zwischenerzeugnissen, die in Walz- und Schmiedewerken hergestellt werden (Schlemme, Schimmel und Achtelik 2019). Im Fokus der Dekarbonisierung steht jedoch vor allem die Rohstahlerzeugung, die aufgrund der notwendigen hohen Temperaturen sehr energieintensiv ist, aber auch mit THG-Emissionen aus dem chemischen Prozess der Reduktion des Erzes zu Eisen verbunden ist. Grundsätzlich kann zwischen Primär- und Sekundärstahlproduktion unterschieden werden:

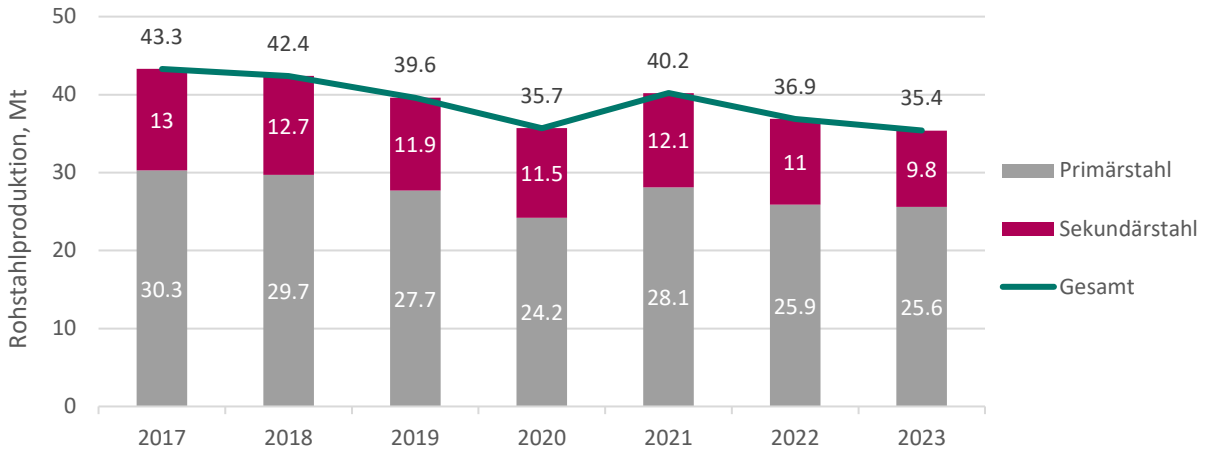
- **Primärstahl** wird durch die Verarbeitung von Eisenerz entweder in Hochöfen (BOF-Route) oder über die Eisenerz-Direktreduktion mir anschließendem Schmelzen in Elektrolichtbogenöfen (DRI-EAF-Route) hergestellt.
  - In der BOF-Route wird dem Eisenerz (Fe_2O_3) mit Hilfe von kohlenstoffhaltigem Reduktionsmittel (hauptsächlich Kohle, manchmal auch Öl oder Erdgas) der Sauerstoff entzogen, so dass flüssiges Roheisen entsteht. Anschließend werden im Oxygenstahlkonverter Verunreinigungen, wie Kohlenstoff, oxidiert, um das Endprodukt Stahl zu erhalten (Stahlinstitut VDEh a). Durch die Nutzung von Kohlenstoffträgern als Reduktionsmittel wird in diesem Prozess CO_2 emittiert, was neben dem hohen Energiebedarf der Hüttenwerke die BOF-Route sehr emissionsintensiv macht. In 2021 waren allein diese Prozessemissionen aus Primärstahlerzeugung in Deutschland für 14,2 Mt CO_2-Äquivalente, oder 2 Prozent des gesamten deutschen THG-Ausstoßes, verantwortlich (Günther, et al. 2023). Grundsätzlich könnten diese Prozessemissionen durch den Wasserstoffeinsatz in Hochöfen vermieden werden, die Technologie wird allerdings erst schrittweise in kleineren Pilotprojekten getestet und ist noch nicht marktreif (thyssenkrupp a).
  - Alternativ kann das Eisenerz in DRI-Anlagen reduziert werden. Dabei können Erdgas oder Wasserstoff als Reduktionsmittel verwendet werden. Bei der Verwendung von Erdgas wird weiterhin CO_2 emittiert, während bei der Verwendung von Wasserstoff nur Wasserdampf entsteht (Stahlinstitut VDEh b). Die Weiterverarbeitung zu Stahl erfolgt in Elektrolichtbogenöfen. Werden in der DRI-EAF-Route Strom aus erneuerbaren Quellen und mit diesem produzierter Wasserstoff eingesetzt, ist der Prozess klimaneutral. Die DRI-EAF-Route gilt daher als die Hauptroute der klimaneutralen Primärstahlerzeugung in den Dekarbonisierungsszenarien Deutschlands (Samadi 2022).

- Grundsätzlich kann Primärstahlproduktion, ähnlich der Aluminiumerzeugung, auch über Elektrolyse erfolgen. Wie es auch bei Aluminiumerzeugung der Fall ist, kann der Ersatz von Kohlestoffanoden durch inerte Anoden den CO_2-Ausstoß bei der Erzreduktion vermeiden (Boston Metal 2024). Jedoch befindet sich auch diese Technologie derzeit noch in Demonstrationsphase und wird daher noch nicht in den Dekarbonisierungsszenarien berücksichtigt.

- **Sekundärstahl** wird durch das Einschmelzen von Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen (EAF-Route) produziert. Da hier die Erzreduktion entfällt, werden auch keine Prozessemissionen verursacht. Wird für die Elektrolichtbogenöfen Strom aus erneuerbaren Quellen benutzt, kann die Sekundärstahlproduktion emissionsfrei erfolgen. Die Erhöhung des Recycling-Anteils bei Rohstahlproduktion gilt daher als eine wichtige Dekarbonisierungsroute für die Stahlindustrie (Fleiter, et al. 2023).

Abbildung 2-1 stellt die Rohstahlproduktion in Deutschland von 2017 bis 2023 dar. Die Primärstahlproduktion macht über den betrachteten Zeitraum rund 70 Prozent der gesamten deutschen Stahlproduktion aus, im Jahr 2023 entspricht das 25,6 Mt Rohstahl. Primärstahl wird in Deutschland vorrangig über die BOF-Route produziert (Schlemme, Schimmel und Achtelik 2019). Zurzeit wird in Deutschland nur eine DRI-EAF-Anlage (mit Erdgas als Reduktionsmittel) von ArcelorMittal Hamburg betrieben, in der 2019 bis zu 0,7 Mt Rohstahl produziert werden konnten (ArcelorMittal Deutschland kein Datum, ArcelorMittal Hamburg kein Datum). In den letzten Jahren wurden in Deutschland allerdings mehrere Projekte zu Wasserstoff-DRI-EAF-Anlagen angekündigt. Wenn sie wie geplant umgesetzt werden, könnten in Deutschland bereits 2026 4,25 Mt grünen Primärstahl pro Jahr produziert werden und 2033 mehr als doppelt so viel mit 9,65 Mt grünen Primärstahl pro Jahr (Hüttel und Lehner 2024).

Abbildung 2-1: Rohstahlproduktion in Mt nach Herstellungsroute, 2017- 2023



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024).

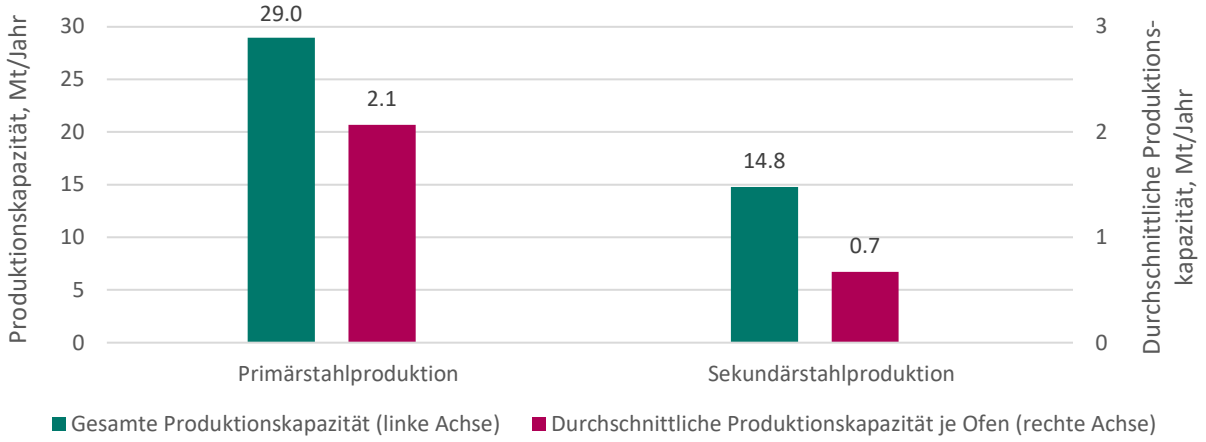
Regional ist die Rohstahlproduktion vor allem im Westen und Nordwesten Deutschlands angesiedelt (vgl. Abbildung 2-2). Nordrhein-Westfalen hat in 2021 mit 14,6 Mt Rohstahl den größten Anteil an den insgesamt 40,2 Mt deutscher Rohstahlerzeugung (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2024). Daneben stechen Bremen, Hamburg und Niedersachsen hervor, die gemeinsam 11,1 Mt Rohstahl produziert haben. Verglichen damit haben die Bundesländer Ostdeutschlands in 2021 mit 5,9 Mt Rohstahl eine deutlich geringere Menge hergestellt. Ein Ost-Westgefälle zeigt sich auch in den Standorten der integrierten Hüttenwerke mit Hochöfen. So befinden sich sieben der acht deutschen integrierten Hüttenwerke in Westdeutschland (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2024).

Abbildung 2-2: Rohstahlproduktion in Mt nach Regionen, 2021

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024).

Integrierte Hüttenwerke sind in der Regel auch größer, als die Elektrolichtbogenöfen. Abbildung 2-3 zeigt die gesamte Produktionskapazität der Primär- (BOF-) und Sekundärroute sowie die durchschnittliche Kapazität pro Ofen. Die durchschnittliche Kapazität der 14 Öfen in der Primärroute ist mit 2,1 Mt pro Jahr deutlich höher als die durchschnittliche Größe der 22 Elektrolichtbogenöfen in der Sekundärroute mit 0,6 Mt pro Jahr.

Abbildung 2-3: Produktionskapazitäten in der Primär- und Sekundärstahlproduktion (ohne DRI-Anlagen), 2020



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf European Steel Association (2020).

Die Stahlindustrie ist auch ein wichtiger Beschäftigungsfaktor in der deutschen Wirtschaft. In 2022 arbeiteten rund 80.000 Personen in der Stahlindustrie und weitere vier Millionen in stahlintensiven Branchen (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2023). In 2021, vor dem deutlichen Anstieg der Energiepreise, hat die deutsche Stahlindustrie einen Umsatz von 41,4 Milliarden Euro erwirtschaftet (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2023).

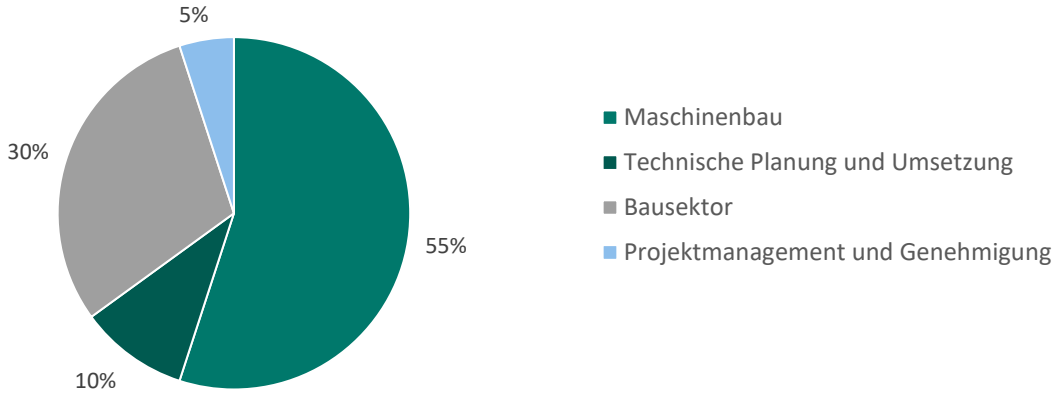
Das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärstahlproduktion zeigt sich auch in der Beschäftigung. In 2021 waren ca. 72 Prozent der Beschäftigten in der Stahlindustrie in der Primärstahlherstellung beschäftigt und 28 Prozent waren in der Sekundärstahlherstellung beschäftigt (Küster Simic und Schönfeldt 2022).

Die Transformation der Stahlindustrie wird daher auch mit einer Beschäftigungstransformation einhergehen. Durch die neuen Prozesse wird die Beschäftigung entlang der BOF-Route sinken und entlang der DRI-EAF-Route wachsen. Der Wechsel in die DRI-EAF-Route wird dabei unter Umständen den Beschäftigungsbedarf im Betrieb der Stahlwerke längerfristig reduzieren, aber kurzfristig Umschulungen und damit mehr Personal für den Erhalt des Produktionsniveaus erfordern (Küster Simic und Schönfeldt 2022). Darüber hinaus würden die Erhöhung des Sekundärstahlanteils und Effizienzmaßnahmen in anderen Sektoren, die zu einer Reduktion der Gesamtnachfrage nach Stahl führen, Beschäftigungswirkungen hervorrufen. Die (langfristigen) Nettoeffekte der Transformation hin zur klimaneutralen Stahlerzeugung auf die dauerhafte Beschäftigung in der Stahlindustrie stehen daher im Fokus der vorliegenden Analyse.

Die für die Prozessumstellungen erforderlichen Investitionen, insbesondere in den Aufbau von DRI-EAF-Anlagen, werden jedoch auch mit (temporären) Beschäftigungseffekten verbunden sein. Um diesen ebenfalls Rechnung zu tragen, ist die Betrachtung der Investitionsstruktur und der Hersteller von DRI- und EAF-Analgen erforderlich. Abbildung 2-4 zeigt die Zusammensetzung der Investitionskosten

in eine DRI-EAF-Anlage nach Aktivität. Etwa die Hälfte der Kosten fällt auf die Herstellung der Anlage, weitere 10 Prozent auf die technische Planung und Umsetzung. Diese wird in der Regel direkt von den Anlagenbauern angeboten. Rund ein Drittel der Investitionskosten fällt auf die Bauarbeiten, wie z.B. die Vorbereitung des Fundaments, und auf Projektmanagement und Genehmigungsverfahren.

Abbildung 2-4: Zusammensetzung der Investitionskosten für DRI-EAF-Anlagen



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Gérard et al. (2020).

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Anbieter von DRI- und EAF-Analgen. Es fällt sofort auf, dass der Markt für DRI-Anlagen von wenigen Akteuren dominiert wird, die außerhalb Deutschlands ansässig sind, so dass die Anlagen und die dazu gehörigen Dienstleistungen nach Deutschland importiert werden.

Tabelle 2-1: Übersicht über Hersteller von Direktreduktionsanlagen

Hersteller	Anlagetyp	Anlagen	Land
MIDREX	DRI	ca. 100	USA
Tenova*	DRI, EAF	20 DRI /ca. 2.000 EAF	Italien
Danieli*	DRI, EAF	20 DRI / unbekannt	Italien
Paul Wurth**	DRI	2	Luxemburg
SMS Group	EAF	ca. 1.400	Deutschland
Badische-Stahl-Engineering GmbH	EAF	ca. 30	Deutschland
Primetals	EAF	unbekannt	Großbritannien
Steel Plantech	EAF	unbekannt	Japan
SARRALLE	EAF	unbekannt	Spanien

Anmerkungen:

* Für DRI-Anlagen bilden Tenova und Danieli ein Konsortium, ENERGIRON. Beiden Herstellern wird daher die gleiche Anzahl der DRI-Anlagen zugeschrieben.

** Paul Wurth ist ein Unternehmen der SMS Group und arbeitet mit MIDREX als Technologiepartner zusammen, der die DRI-Anlagen produziert.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf MIDREX (kein Datum), Paul Wurth (kein Datum), Tenova (b), Danieli (kein Datum), SMS Group (kein Datum), Tenova (a), Primetals (kein Datum), Steel Plantech (kein Datum), Sarralle (kein Datum), Badische Stahlwerke (kein Datum)

Der führende DRI-Hersteller ist MIDREX aus den USA, wie die fast 100 Anlagen zeigen, die MIDREX weltweit gebaut hat oder noch in der Projektpipeline hat. In Deutschland setzen beispielsweise thyssenkrupp Steel und ArcelorMittal Hamburg auf MIDREX (MIDREX kein Datum, thyssenkrupp b). Bei Arcelor Mittal Hamburg handelt es sich dabei sowohl um die bestehende DRI-Anlage als auch um den Bau einer Demonstrationsanlage (ArcelorMittal Hamburg 2019).

Auch ein Konsortium aus Tenova und Danieli stellt mit ENERGIRON einen relevanten DRI-Anlagenbauer für die deutschen Stahlproduzenten dar. Beispielsweise soll die DRI-Anlage für das Salcos-Projekt der Salzgitter AG von tenova gebaut werden (Salzgitter AG kein Datum).

Auf dem Markt für Elektrolichtbogenöfen sind etwas mehr Unternehmen vertreten, darunter auch zwei deutsche Anlagenbauer. Bei den geplanten deutschen DRI-EAF-Anlagen hat die Salzgitter AG der Auftrag für die Elektrolichtbogenöfen an Primetals aus Großbritannien vergeben (Salzgitter AG 2022). Für die restlichen Projekte sind die Anlagenbauer jedoch nicht öffentlich bekannt, so dass keine Aussage über den Marktanteil der deutschen Anlagenbauer getroffen werden kann.

Es wird daher angenommen, dass der Anteil der Investitionen, der für Planung, Herstellung und Installation der Anlagen aufgewendet wird, außerhalb Deutschlands anfällt und damit keine Beschäftigungswirkungen in Deutschland auslöst. Dieser Anteil wird daher nicht in der Analyse berücksichtigt. Die Ausgaben für vorbereitende Bauarbeiten sowie Projektmanagement und Genehmigungsverfahren (35 Prozent der Investitionskosten) werden dagegen in Deutschland verortet und dienen als Basis für die Berechnung der temporären Beschäftigungseffekte aus dem Umbau der Stahlproduktion.

Ein weiter Aspekt der Transformation in der Stahlindustrie ist die Nachfrage nach Wasserstoff, der im Gegensatz zu anderen in der Stahlindustrie nachgefragten primären Energieträgern (Steinkohle, Erdgas) teilweise in Deutschland erzeugt werden soll.[4] Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette umfasst daher sowohl die Wasserstoffproduktion als auch die Transportinfrastruktur. Die Analyse der Beschäftigungseffekte aus der Wasserstoffproduktion wird unter Methodik (Abschnitt 3) näher erläutert. Die Transportinfrastruktur wird aufgrund der großen benötigten Wasserstoffmengen hauptsächlich über Pipelines erfolgen (Qureshi, et al. 2023). Hierfür können auch die bereits genutzten Erdgasleitungen der Stahlwerke, die Erdgas nutzen, umgewidmet werden. Überregionale Leitungen, wie z.B. die European Hydrogen Backbone (EHB 2024) sind dagegen Teil der allgemeinen Wasserstoffinfrastruktur und

[4] Das gesamte inländische Angebot an Steinkohle und über 90 Prozent des Erdgasangebots werden in Deutschland aus Importen gedeckt (AG Energiebilanzen e.V. 2024). Die Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (Die Bundesregierung 2023) sieht dagegen vor, dass in 2030 nur 50 bis 70 Prozent des deutschen Wasserstoffbedarfs durch Importe gedeckt werden sollen.

können daher keinem speziellen Sektor zugeordnet werden. Der Aufbau und der Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur werden daher in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt.

2.2 Schwerlastverkehr: Umstellung auf klimaneutrale Lkw

Der Wasserstoff-Fokus in Dekarbonisierung des Verkehrs liegt vor allem auf dem Güterverkehr mit Lastkraftfahrzeugen, häufig den Lastkraftwagen (Lkw) gleichgestellt (vgl. Begriffserklärung in Box 2-1). Als wichtigste Dekarbonisierungspfade für den Schwerlastverkehr stehen Elektrifizierung und Umstellung auf Wasserstoff da (Fleiter, et al. 2023, Samadi 2022). In manchen Szenarien wird auch Dekarbonisierung durch synthetische Kraftstoffe betrachtet (Fleiter, et al. 2023), jedoch wird die Zulassung von solchen Lkw in der EU nach jetzigem regulatorischem Stand ab 2030 nicht mehr möglich sein, auch wenn die Europäische Kommission 2027 eine mögliche Zulassung prüft (Verordnung (EU) 2024/1610). Darüber hinaus ist die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen im Straßengüterverkehr weniger effizient, als der Betrieb mit elektrischer Energie oder Wasserstoff (Gray, McDonagh, et al. 2021, Wietschel, et al. 2023, Transport & Environment 2021). Schill, Gaete Morales und Jöhrens (2024) zeigen auch aus energiesystemischer Perspektive, dass die Elektrifizierung deutlich kosteneffizienter ist, als Umstellung sowohl auf Wasserstoff als auch insbesondere auf synthetische Kraftstoffe. Dabei weisen synthetische Kraftstoffe auch die höchsten THG-Emissionen auf (Gray, O'Shea, et al. 2022). Die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen als Dekarbonisierungsoption im Schwerlastverkehr wird daher eher kritisch gesehen.

Für die vorliegende Analyse ist außerdem zu berücksichtigen, dass synthetische Kraftstoffe sich in ihrer chemischen Zusammensetzung nicht von den bereits heute genutzten fossilen Kraftstoffen unterscheiden, so dass bei dieser Route bis auf den Kraftstoffherstellungsprozess keine Transformation stattfinden würde. Aus der Beschäftigungsperspektive macht das ein Szenario der Umstellung auf synthetische Kraftstoffe im Verkehr trivial. In der vorliegenden Analyse liegt der Fokus daher auf den Szenarien der Umstellung auf batterieelektrische Lkw und (wasserstoffbetriebene) Brennstoffzellen-Lkw.

Die Wertschöpfungskette im Schwerlastverkehr kann, wie auch in der oben beschriebenen Stahlindustrie, in den Betrieb, die Herstellung der Investitionsgüter (in diesem Fall die Lkw) und die Infrastruktur unterteilt werden. Im Gegensatz zur Stahlindustrie liegt hier der Fokus allerdings auf der Lkw-Herstellung.

Box 2-1: Begriffserklärung Lkw

Im Allgemeinen werden unter Lkw alle Nutzfahrzeuge verstanden, die ihrer Beschaffenheit nach für den Transport von Gütern bestimmt sind (KBA 2023a). Dies entspricht jedoch einer großen Bandbreite an Fahrzeugen. Darunter fallen beispielsweise Transporter mit einer zulässigen Gesamtmasse von weniger als 3,5 Tonnen, aber auch Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 20 Tonnen.

In öffentlichem Diskurs und in den Dekarbonisierungsszenarien wird der Begriff Lkw in der Regel mit dem Schwerlastverkehr verbunden. Lastkraftwagen mit weniger als 3,5 Tonnen zulässiger Gesamtmasse werden dabei als leichte Nutzfahrzeuge (LNF) gewertet und ab einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen als Lkw oder mittlere und schwere Nutzfahrzeuge bezeichnet (vgl. Biemann et al. (2024), Fleiter et al. (2023)). Hierzu zählen in den Studien auch Sattelzugmaschinen samt Anhänger bzw. Sattelauflieger (in den Medien auch „40-Tonnen Lkw“ genannt). Zusammen entsprechen Lkw ab einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen und Sattelzüge der Definition von *Lastkraftfahrzeugen* (KBA 2023a). Die vorliegende Analyse befasst sich daher, strikt definiert, mit Lastkraftfahrzeugen. Einfachheitshalber wird im Folgenden aber für Lastkraftfahrzeuge (d.h. Lastkraftwagen ab einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen sowie Sattelzüge) weiter der Kurzbegriff Lkw genutzt. Aufgrund der sektoralen Abgrenzung in der amtlichen Statistik werden teilweise nur Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen betrachtet (vgl. Abschnitt 3). Die Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5-12 Tonnen werden dabei als mittlere Lkw und Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 12 Tonnen sowie Sattelzugmaschinen als schwere Lkw bezeichnet.

Der Lkw-Betrieb wird in der Analyse nicht berücksichtigt, weil durch die technologische Umstellung der Lkw-Flotte keine Veränderung des Verkehrsvolumens zu erwarten ist.[5] Damit ist auch keine bedeutende Veränderung in der Beschäftigung in Verkehrsunternehmen zu erwarten. Auch in der Wartung der Lkw sind nach jetzigem Stand keine signifikanten Beschäftigungseffekte anzunehmen. Die elektrischen Lkw sind zwar weniger wartungsintensiv, so dass die Wartungskosten ca. 30 Prozent geringer als bei Diesel- und Erdgas-Lkw sind (Basma und Rodriguez 2023), dies liegt jedoch hauptsächlich daran, dass Ersatzteile den größten Teil der Wartungskosten ausmachen und elektrische Lkw eine geringere Teileanzahl und Komplexität der Teile aufweisen (Teleroute 2018).

[5] Im Allgemeinen könnte eine Beschäftigungswirkung durch Dekarbonisierung im Verkehr entstehen, wenn ein sogenanntes Modal Shift – d.h. Verlagerung des Güterverkehrs auf Schiene und Wasser – stattfindet, so dass das Verkehrsvolumen auf Straße sinkt. Es ist jedoch noch unsicher, inwieweit eine solche Verlagerung bei wachsender Wirtschaft tatsächlich zur Senkung des absoluten Verkehrsvolumens führen würde. Außerdem ist Modal Shift nicht mit der notwendigen technologischen Umstellung der Lkw-Flotte verbunden.

Bei der Umstellung sowohl auf elektrische als auch Brennstoffzellen-Lkw müssen bei der Infrastruktur sowohl die Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw als auch Wasserstoff-Tankinfrastruktur als Ersatz für die heutige fossile Tankinfrastruktur aufgebaut werden. Bei Wasserstoff-Tankinfrastruktur wird jedoch erwartet, dass die Arbeitsintensität der von fossiler Tankinfrastruktur entspricht, da der Tankvorgang von Kund*innen selbst vorgenommen werden kann und die Anlieferung per Lkw erfolgt bzw. perspektivisch per Pipeline erfolgen kann (H2 Mobility kein Datum). Daher ist keine signifikante Beschäftigungsveränderung im Vergleich zur heutigen Infrastruktur zu erwarten. Die Ladeinfrastruktur muss dagegen parallel zur Tankinfrastruktur aufgebaut werden, ist jedoch im Betrieb wenig arbeitsintensiv. Beispielsweise rechnen Bui et al. (2024) mit einem Einsatz von nur 1,65 Arbeitstagen pro Ladepunkt auf dem US-amerikanischem Markt. Auf jährliche Vollzeitäquivalente (engl.: full-time equivalent, FTE) umgerechnet, können mit einem FTE rund 130 Ladepunkte betrieben werden. Im Vergleich dazu arbeiten an deutschen Tankstellen im Durchschnitt vier Personen pro Tankstelle.[6] Daher ist auch im Betrieb der Ladeinfrastruktur nur eine geringe Beschäftigungswirkung durch die Flottenumstellung zu erwarten, und der Betrieb der klimaneutralen Infrastruktur wird in der Analyse nicht weiter berücksichtigt.

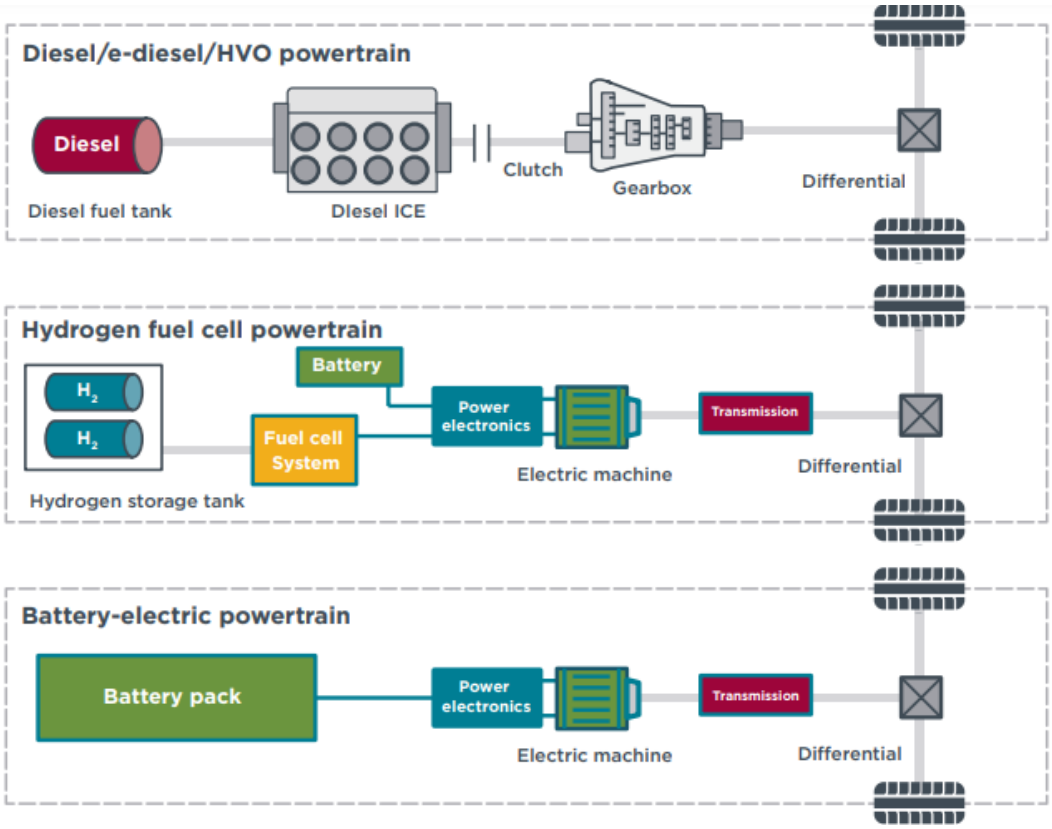
In der Herstellung der Lkw und insbesondere in den Zuliefererbranchen können dagegen durch den Umstieg auf elektrische und Brennstoffzellen-Lkw starke strukturelle Veränderungen entstehen. Der Wirtschaftszweig „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ beschäftigte in 2023 rund 900 Tsd. Personen und war damit für 2,6 Prozent der gesamten deutschen Beschäftigung verantwortlich, etwa die Hälfte davon in der Herstellung von Karosserien, Teilen und Zubehör (Bundesagentur für Arbeit 2024a). Auch wenn darunter auch die Pkw-Herstellung fällt, hat die Automobil- und Zuliefererbranche eine sehr große Bedeutung für die deutsche Wirtschaft.

Da elektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge einfacher gebaut sind und weniger Teile haben, wird insbesondere in Bezug auf die Zuliefererbranche oft die Sorge geäußert, dass Dekarbonisierung eine negative Auswirkung auf die Beschäftigung haben wird. Im Pkw-Segment wurde gezeigt, dass, wenn die Batterieherstellung nicht in Deutschland stattfindet, die Herstellung von elektrischen Pkw deutlich weniger arbeitsintensiv ist (Cotterman, et al. 2024). Der Lkw-Segment wird in der in der Regel nicht behandelt, jedoch auch elektrische und Brennstoffzellen-Lkw sind einfacher als Lkw mit Verbrennungs-

[6] Eigene Berechnung basierend auf der Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im WZ 47.3 Einzelhandel mit Motorenkraftstoffen (Tankstellen) (Bundesagentur für Arbeit 2024a) und der Anzahl der Tankstellen in Deutschland (Prof. Schramm-Klein GmbH 2024).

motoren gebaut (vgl. Abbildung 2-5). Demnach kann auch im Lkw-Segment die Beschäftigung in Zulieferbranche gefährdet sein. Die Abgrenzung und Quantifizierung potentieller Beschäftigungseffekte in der Lkw-Herstellung liegen daher im Fokus der vorliegenden Stude.

Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau eines Lkw mit Diesel-, Brennstoffzellen- und batterieelektrischem Antrieb



Quelle: Basma und Rodriguez (2023).

Die zwei größten Lkw-Hersteller in Deutschland sind Daimler Truck und MAN Truck & Bus. Außerdem gibt es auf dem deutschen Markt über 350 Kfz-Zulieferer die sich im Verband der Automobilindustrie (kein Datum) organisieren. Die Zulieferer bieten neben Kleinstteilen, wie Sensoren und Ventile, auch Dienstleistungen, Softwarelösungen und Systeme, wie Antriebsstränge, an.

Daimler Truck beschäftigt weltweit 104 Tsd. Personen (Stand 2023), davon 38 Tsd. Personen im Konzernsegment Mercedes-Benz, das auf Lkw-Herstellung in Europa fokussiert (Daimler Truck 2024). Im deutschen Werk Wörth werden mit über 11 Tsd. Beschäftigten bis zu 470 Lkw pro Tag produziert (Mercedes-Benz Trucks kein Datum). Der Konzern hat einen weltweiten Gesamtumsatz von 55,9 Milliarden Euro, davon entfallen 21,6 Milliarden Euro auf das Segment Mercedes-Benz (Daimler Truck 2024).

MAN Truck & Bus beschäftigt weltweit ca. 33 Tsd. Personen (MAN Truck & Bus b). Davon sind rund 8 Tsd. am Standort München beschäftigt, wo vorrangig Lkw produziert werden (Prem und Schmidtutz

2023). MAN Truck & Bus erwirtschaftete 2023 weltweit einen Umsatz von 14,8 Milliarden Euro (MAN Truck & Bus b).

Aus diesen Eckzahlen wird die internationale Ausrichtung der Lkw-Hersteller deutlich, die sich auch in Handels- und Zulassungszahlen widerspiegelt. In Deutschland werden jährlich (Stand 2022) ca. 29 Tsd. neue Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen zugelassen, wovon ca. 13 Tsd. eine zulässige Gesamtmasse von mehr als 20 Tonnen aufweisen (KBA 2021). Vergleicht man das mit der Anzahl importierter Lkw (Statistisches Bundesamt 2024a), beträgt der Importanteil rund 95 Prozent. Darunter können jedoch auch die Lkw deutscher Hersteller fallen, die außerhalb Deutschlands produziert werden, oder importierte beinahe fertige Lkw, die in Deutschland finalisiert und wieder exportiert werden.[7] So liegt der Anteil aller in 2022 zugelassenen Lkw, die von ausländischen Herstellern produziert und damit auf jeden Fall für den Gebrauch in Deutschland importiert werden, bei knapp über 40 Prozent (KBA 2023b). Bei den Sattelzugmaschinen wurden 2022 ca. 32 Tsd. Maschinen zugelassen, wovon ca. die Hälfte von ausländischen Herstellern stammen (KBA 2023b).

Betrachtet man die Exportseite, so ist Deutschland ein Nettoexporteur von Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 5 Tonnen und von Sattelzugmaschinen. In Verhältnis zu Produktionsmengen gesetzt, beträgt die Bruttoexportquote ca. 62 Prozent für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 5 und 20 Tonnen, 90 Prozent für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 20 Tonnen und 65 Prozent für Sattelzugmaschinen.[8]

Inwiefern jedoch die Lkw-Exporte von der Dekarbonisierung betroffen werden, hängt von den Entwicklungen in anderen Ländern ab und ist damit unsicher. Daher fokussiert sich die Analyse auf den Produktionsanteil, der für den deutschen Verkehr relevant ist und sich aus den Importquoten ergibt.

[7] Der Importanteil wurde als Verhältnis zwischen importierten und zugelassenen Lkw über 5 Tonnen Gesamtgewicht errechnet. Dieser ist mit Vorsicht zu interpretieren, denn neben den Importen von im Ausland produzierten Lkw deutscher Hersteller kann in der Außenhandelsstatistik z.B. auch der Einfuhr von beinahe fertigen Lkw, die in Deutschland finalisiert und wieder exportiert werden, in der gleichen Güterkategorie erfasst sein. Das könne einer der Erklärungsfaktoren für die höhere Importzahl als Zulassungszahl bei Lkw über 20 Tonnen Gesamtgewicht sein.

[8] Errechnet als Verhältnis von Exportmenge in der Außenhandelsstatistik zu Produktionsmenge in der Produktionsstatistik. Stand 2020 für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 20 Tonnen und Sattelzugmaschinen, geschätzte Produktionsmenge in 2022 für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 5 und 20 Tonnen.

3. Methodik

Bei der Quantifizierung der Beschäftigungseffekte sind Effekte, die aus Investitionen in die Kapitalgüter (Investitionsphase – z.B. Bau der Stahlerzeugungsanlagen) und aus der Nutzung dieser Kapitalgüter (Betriebsphase – z.B. Stahlerzeugung, Lkw-Herstellung) resultieren, zu unterscheiden.

Die Beschäftigungseffekte aus Investitionen sind zeitlich begrenzt und lösen potentiell starke einmalige Impulse entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Investition. Die daraus resultierenden direkten (aus Herstellung und Installation der Anlagen) und indirekten (entlang der Wertschöpfungskette ausgelösten) Effekte werden mit Hilfe der Input-Output-Analyse quantifiziert. Ausgangspunkt für die Analyse ist der zukünftige Aufbaupfad der Kapitalgüter nach Technologie und die Investitionskosten dieser Kapitalgüter.

Die Beschäftigungseffekte aus dem Betrieb der Anlagen sind hingegen deutlich geringer, halten aber über die gesamte Betriebsdauer der Anlage an. Diese Effekte werden mit Hilfe der Multiplikatoranalyse ermittelt, wobei die Zahl der Beschäftigten in Verhältnis zum Produktionsvolumen gesetzt wird. Hierfür sind zwei Variablen ausschlaggebend: 1) Die zukünftigen Produktionsmengen nach Technologie und 2) Beschäftigungsmultiplikatoren je Produktionseinheit.

Die Beschäftigungseffekte aus Investitionen und aus dem Betrieb sind daher nicht direkt vergleichbar und werden in dieser Studie separat betrachtet. Wie oben beschrieben, werden bei der Stahlindustrie sowohl der Aufbau (Investitionsphase) als auch der Betrieb der Stahlerzeugungsanlagen berücksichtigt. Im Schwerlastverkehr liegt der Fokus auf der Herstellung der Lkw und der Rolle der Zulieferer-branche, so dass vor allem die Betriebsphase aus der Perspektive der Lkw-Hersteller und Zulieferer betrachtet wird. Die branchenspezifischen Ansätze werden unten detailliert erläutert.

Um Nettobeschäftigungseffekte zu schätzen muss außerdem eine Vergleichsbasis gebildet werden. Dafür kann entweder der Status Quo oder ein kontrafaktisches Szenario (oft „Business as Usual“ genannt) verwendet werden. Status Quo bezieht sich auf die aktuelle Situation in der Branche, d.h. heutige Produktionsstruktur und -menge und entsprechend heutiges Beschäftigungsniveau. Ein Business as Usual Szenario projiziert die potentielle Beschäftigung, wenn in der analysierten Branche keine Dekarbonisierung stattfindet (d.h. die heutige Produktionsstruktur unverändert bleibt), aber exogene Faktoren, die die Produktionsmenge beeinflussen (wie z.B. Veränderungen in der Nachfrage), berücksichtigt werden.[9]

[9] Je nach Modellierungsansatz kann Business as Usual Szenario auch Veränderungen in der Produktionsstruktur abbilden, die sich z.B. aus der Kostenoptimierung unter heute vorhersehbaren Rahmenbedingungen (bspw.

3.1 Stahlindustrie

In der Betriebsphase werden die Beschäftigungsmultiplikatoren je Mt Stahl für die BOF-Route und die DRI-EAF-Route bei Primärstahl sowie die EAF-Route bei Sekundärstahl ermittelt. Für die DRI-EAF-Route und die BOF-Route bieten Küster Simic & Schönfeldt (2022) bereits eine geeignete Datengrundlage. Insbesondere der Fokus auf den Kernbereich, also bspw. exklusive Logistik, ist hilfreich, da die Beschäftigung außerhalb des Kernbereichs kaum durch den Transformationsprozess im Zuge der Dekarbonisierung beeinflusst wird (Küster Simic und Schönfeldt 2022). Zur Plausibilisierung der Beschäftigungseffekte, die von Küster Simic & Schönfeldt (2022) aus Experteninterviews abgeleitet wurden, werden die Multiplikatoren nochmal mit öffentlich zugänglichen Daten deutscher Stahlwerke (vgl. Anhang A) und selbst geführten Experteninterviews verglichen. Der Vergleich ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, denn in öffentlichen Quellen zu den Stahlwerken wird in der Regel die Beschäftigung im gesamten Stahlwerk und teilweise inklusive weiterer Bearbeitungsschritte (z.B. Walzwerke) angegeben, während sich Küster Simic & Schönfeldt (2022) auf die Kernbeschäftigung fokussieren. Damit ist die Beschäftigung je Mt Stahl in den öffentlichen Daten deutlich höher. Jedoch lassen sich daraus einige Schlüsse ziehen:

- Für die Gesamtbeschäftigung in Stahlerzeugung über die BOF-Route ergibt sich aus Angaben von Küster Simic & Schönfeldt (2022) die Arbeitsintensität von ca. 2,3 Tsd. Beschäftigten je Mt Stahl, was sich z.B. mit der Arbeitsintensität bei Thyssenkrupp Steel von 2,4 Tsd. Beschäftigten je Mt Stahl deckt.[10]
- Ein Vergleich zwischen der Gesamtbeschäftigung bei ArcelorMittal Deutschland und der Beschäftigung in allen deutschen Stahlwerken des Unternehmens zeigt, dass die Vertriebs-, Verwaltungs- und andere Tätigkeiten des Mutterunternehmens die Brutto-Arbeitsintensität um rund 30 Prozent erhöhen können.
- Unter der Annahme, dass ein ähnliches Verhältnis auch für Elektrostahlhersteller gilt, liegt die von Küster Simic & Schönfeldt (2022) abgeleitete Arbeitsintensität von ca. 2 Tsd. Beschäftigten pro Mt Stahl in der Sekundärstahlroute ebenfalls gut im Bereich der öffentlichen Angaben.

vorhersehbaren Preisentwicklungen, bereits angekündigten Anpassungen des regulatorischen Rahmens) ergeben und auf keine gezielte Verhaltensänderung zurückzuführen sind. Von solchen Veränderungen wird aber in dieser Analyse abstrahiert.

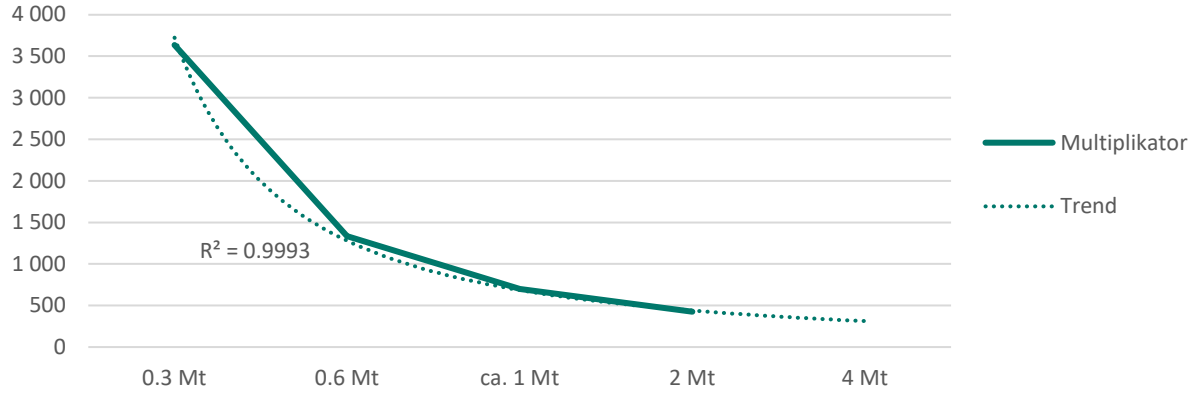
[10] ArcelorMittal Deutschland scheint dagegen eine deutlich höhere Produktivität aufzuweisen, allerdings muss hier beachtet werden, dass ArcelorMittal auch ein (weniger arbeitsintensiver) DRI-EAF-Stahlwerk gehört. Der Vergleich der BOF-Stahlwerke in Anhang A zeigt, dass die Hüttenwerke unterschiedlicher Unternehmen, für die öffentliche Daten zur Verfügung stehen, ähnliche Arbeitsintensitäten aufweisen.

- Ein Vergleich zwischen der BOF-Kernbeschäftigung, wie von Küster Simic & Schönfeldt (2022) angegeben, und der Beschäftigung in Oxygenstahlwerken, die von Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024) erfasst wird, lässt einen ähnlichen Anteil (40 Prozent) an Tätigkeiten außerhalb des Kernbereichs in Stahlwerken annehmen.
- Bei der Beschäftigung in den EAF-Stahlwerken fällt die Diskrepanz zwischen maximaler und minimaler Beschäftigung je Mt Stahl auf. Die beiden Werte repräsentieren dabei den kleinsten (ca. 300 kt Stahl pro Jahr) bzw. größten (ca. 2 Mt Stahl pro Jahr) Betrieb. Dies verdeutlicht starke Skaleneffekte in den Betrieben.

Diese Erkenntnisse werden genutzt, um den Multiplikator für Kernbeschäftigung in der Sekundärroute zu ermitteln, der nicht direkt aus der Literatur ermittelt werden konnte. Der Anteil der Kernbeschäftigung an der Gesamtbeschäftigung im (Oxygenstahl-)Stahlwerk wird auf die Beschäftigungsdaten in Elektrostahlwerken (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2024) übertragen und in Verhältnis zur Sekundärstahlproduktion gesetzt. So ergibt sich eine Arbeitsintensität von 183 Beschäftigten je Mt Sekundärstahl. Dieser Multiplikator ist etwas höher als bei den DRI-EAF-Anlagen, was u.a. aus Unterschieden in typischer Anlagengröße oder zusätzlichen Prozessschritten (z.B. Schrottaufbereitung) resultieren könnte. Der Multiplikator liegt nah an die Expertenangaben und ergibt im Vergleich zur Gesamtbeschäftigung in Elektrostahlproduktion (Küster Simic und Schönfeldt 2022) einen Anteil der Kernbeschäftigung von ca. 9 Prozent, was sich mit den Angaben von Küster Simic & Schönfeldt (2022) für BOF-Kernbeschäftigung deckt und so die interne Konsistenz der Daten bestätigt.

Die starken Skaleneffekte in EAF-Anlagen implizieren, dass die Beschäftigungsmultiplikatoren der DRI-EAF- und EAF-Anlagen mit der Zeit sinken können, wenn die Stahlwerkgröße an die Kapazität der BOF-Stahlwerke (durchschnittlich ca. 4 Mt Stahl) angenähert wird. Bei der aktuellen Kapazität der existierenden und geplanten DRI-EAF-Stahlwerke in Deutschland von ca. 2 Mt Stahl (ArcelorMittal Hamburg kein Datum, thyssenkrupp b, Salzgitter AG 2022) entspricht das einer Verdopplung der Anlagengröße. Um ein solches Szenario abzubilden, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der ein Trend der Beschäftigungssenkung durch Kapazitätsverdopplung in EAF-Anlagen extrapoliert wurde. Wie in der Stahlwerkübersicht in Anhang A zu sehen, entsprechen verfügbare Daten den Kapazitätsstufen von 0,3 bis 2 Mt Stahl mit jeweils ungefähr einer Verdoppelung der Stahlwerkgröße. Die damit einhergehende Reduktion der Arbeitsintensität folgt einer typischen exponentiellen Lernkurve bei Hochskalierung der installierten Kapazität und kann mit hoher Sicherheit auf weitere Verdoppelung extrapoliert werden (R-Quadrat der Trendapproximation beträgt beinahe 100 Prozent, vgl. Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Lernkurve des Beschäftigungsmultiplikators für EAF-Stahlwerke



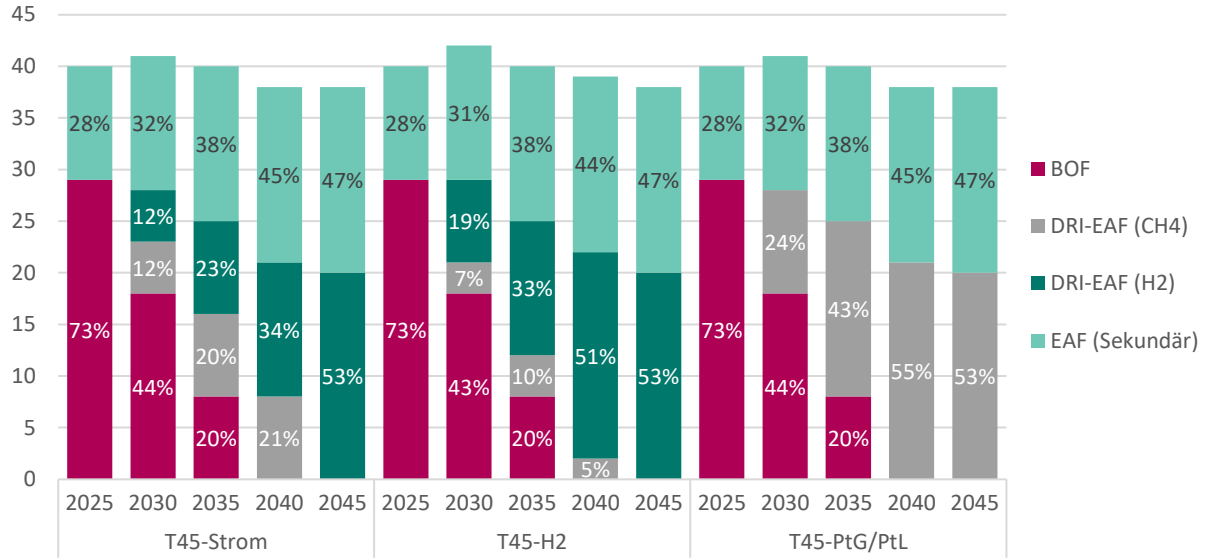
Quelle: Eigene Darstellung

Der daraus resultierende Skalierungsfaktor wird dann auf jährliche Lernrate umgerechnet, unter der Annahme, dass die Verdoppelung zum Zeitpunkt der kompletten Umstellung der Primärstahlproduktion auf DRI-EAF-Anlagen vollzogen wird. Diese Lernrate wird im Sensitivitätsszenario auf DRI-EAF- und EAF-Anlagen angewandt. Dadurch ergeben sich in 2045 Beschäftigungsmultiplikatoren von 103 Beschäftigten je Mt Stahl für DRI-EAF-Anlagen und 122 Beschäftigten je Mt Stahl für EAF-Anlagen. Da der zugrundeliegende Skalierungsfaktor aber auf der Gesamtbeschäftigung eines Stahlwerks, und nicht der Kernbeschäftigung, basiert, ist dieses Szenario sehr optimistisch bezüglich der entstehenden Skaleneffekte in der Kernbeschäftigung und bildet damit eine Untergrenze bei der Berechnung der Beschäftigungseffekte.

Um die Beschäftigungseffekte zu ermitteln, werden die Beschäftigungsmultiplikatoren an die prognostizierte Stahlproduktion nach Route angewandt. Für die Stahlproduktion bieten die Langfristszenarien (LFS) von Fleiter, Rehfeldt, Manz, Neuwirth, & Herbst (2023) eine geeignete Datengrundlage, die die gesamte Stahlproduktion nach Technologie bis 2045 in drei Dekarbonisierungsszenarien schätzt. Die Modellierung der LFS erfolgt für die gesamte deutsche Wirtschaft, so dass neben der notwendigen Transformation in der Stahlindustrie selbst auch verschiedene weitere Faktoren berücksichtigt werden, die die Produktionsmenge und -struktur beeinflussen. Dazu gehören bspw. effizienteres Bauen und Ansätze der Kreislaufwirtschaft, die die Stahlnachfrage senken und den Anteil von Sekundärstahl erhöhen. Die drei Dekarbonisierungsszenarien unterscheiden sich in der Rolle einzelner Energieträger: im Szenario T45-Strom wird in der gesamten Wirtschaft möglichst das Elektrifizierungspotential ausgeschöpft, im Szenario T45-H2 kommt Wasserstoff aktiv zum Einsatz, und im Szenario T45-PtG/PtL bleiben einige auf fossilen Energieträgern basierte Technologien im System, die aber spätestens in 2045 komplett mit biogenen und aus grünem Wasserstoff erzeugten synthetischen Energieträgern (synthetisches Methan, synthetische Kraftstoffe) betrieben werden.

Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung der Stahlproduktion in 2025-2045 nach LFS-Szenario und Herstellungsroute. Für alle drei Szenarien wird in LFS angenommen, dass der Anteil des Sekundärstahls bis 2045 von heutigen ca. 30 Prozent auf 47 Prozent ansteigt und die Primärstahlproduktion komplett auf die DRI-EAF-Route umgestellt wird. Es gibt jedoch leichte Variation in der Dynamik bis 2045 und einen wichtigen Unterschied im Reduktionsmittel, das im DRI-Prozess eingesetzt wird. Während das PtG/PtL-Szenario auf Methan (zunächst Erdgas und dann zunehmend synthetisches Methan) setzt, wird erdgasbasierte DRI im Strom- und H2-Szenario nur als Brückentechnologie genutzt und längerfristig komplett mit wasserstoffbasierter DRI ersetzt. Im H2-Szenario passiert das schneller, als im Strom-Szenario.

Abbildung 3-2: Entwicklung der Stahlproduktion in Mt (Y-Achse) nach LFS-Szenario und Technologie



Quelle: Eigene Darstellung nach Fleiter, Rehfeldt, Manz, Neuwirth, & Herbst (2023)

In der Betriebsphase wird für die DRI-EAF-Route unabhängig vom Reduktionsmittel die gleiche Arbeitsintensität angenommen, so dass hier nur die Anteile der BOF-, DRI-EAF- und EAF-Routen relevant sind. Insofern sind Strom- und PtG/PtL-Szenario identisch, und im H2-Szenario weicht die Produktionsstruktur nur in den Jahren 2030 und 2040 leicht ab. Da aber erdgasbasierte und wasserstoffbasierte DRI unterschiedliche Investitionen erfordern, unterscheiden sich die Szenarien bei der Betrachtung der Investitionsphase.

Die Analyse der Beschäftigungseffekte in der Investitionsphase basiert auf dem von DIW Econ implementierten Input-Output-Modell und der Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2020 (der aktuellsten Tabelle zum Zeitpunkt der Analyse).[11] Die Input-Output-Tabelle gibt

[11] Eine Erläuterung des Modells findet sich in Anhang B.

Auskunft darüber, ob und in welchem Umfang die einzelnen Sektoren und Produktionsbereiche Vorleistungen für andere Wirtschaftsbereiche bereitstellen bzw. von diesen nachfragen. Die durch eine Investition in einem Sektor ausgelöste Nachfragesteigerung erfordert einen Arbeitseinsatz entlang der vorgelagerten Wertschöpfungskette. Dieser wird im Modell aggregiert und zusätzlich zum direkten Beschäftigungseffekt einer spezifischen Investition als indirekter Beschäftigungseffekt ausgewiesen.

Die Investition in eine Stahlerzeugungsanlage kann, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, auf mehrere Wirtschaftssektoren aufgeteilt werden. In der vorliegenden Analyse werden die Ausgaben für vorbereitende Bauarbeiten sowie Projektmanagement und Genehmigungsverfahren (35 Prozent der gesamten Investitionskosten einer Anlage) in Deutschland verortet und im Modell berücksichtigt, während die Ausgaben für Planung und Anlagenherstellung als Importe und damit keine beschäftigungsrelevanten Ausgaben angenommen werden.

Die technologische Struktur wird aus LFS-Szenarien übernommen, jedoch zeigt der Vergleich der Produktionszahlen der letzten Jahre mit der installierten Kapazität zur Primärstahlerzeugung, dass die Kapazitäten im Durchschnitt zu 84 Prozent ausgelastet werden.[12] Es wird angenommen, dass dieser Auslastungsgrad zukünftig beibehalten wird und die neuen Kapazitäten entsprechend skaliert werden. Außerdem ist davon auszugehen, dass die Umstellung der erdgasbasierten DRI aus Wasserstoff im Strom- und H2-Szenario mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein wird. Als Umstellungskosten wird die Differenz in Investitionskosten zwischen erdgasbasierter und wasserstoffbasierter DRI angenommen. Die Prognose über die Investitionskosten für DRI-EAF- und BOF-Anlagen wurde IEA (2019) entnommen und in 2021 Euro umgerechnet.[13] Die Investitionskosten für EAF-Anlagen sind bei IEA (2019) nicht enthalten und wurden ausgehend von den Kosten der DRI-EAF-Anlagen errechnet. Basierend auf den Daten von Hüttel und Lehner (2024) betragen die Investitionskosten einer EAF-Anlage durchschnittlich ca. 70 Prozent der Kosten einer H_2-DRI-EAF-Anlage. Tabelle 3-1 gibt Überblick über die angenommenen Investitionskosten je Anlagentyp.

[12] Die Jahre 2020 und 2022 sind aus dem Vergleich ausgenommen, weil die Stahlproduktion krisenbedingt vergleichsweise gering war.

[13] Der Inflationsfaktor 2017-2021 beträgt 1,11, der durchschnittliche Wechselkurs in 2021 0,86 EUR je USD. Die Investitionskosten der H_2-DRI-EAF-Anlagen werden bei IEA inklusive Elektrolysekosten angegeben, diese wurden unter Annahme von 70 % Effizienz und 8.000 Volllaststunden abgezogen.

Tabelle 3-1: Investitionskosten der Stahlerzeugungsanlagen, EUR/t Stahl

	H_2-DRI-EAF	CH_4-DRI-EAF	BOF	EAF	Mehrkosten H_2-DRI zu CH_4-DRI
2021	608	563	573	428	45
2030	588	563	573	414	24
2045	574	563	573	404	11

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf IEA (2019), Hüttel und Lehner (2024).

Es ist darüber hinaus zu beachten, dass die bestehenden BOF-Kapazitäten relativ alt sind und in den kommenden Jahren ohnehin erneuert werden müssen. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2020) geben an, dass allein bis 2030 ca. die Hälfte der Kapazitäten in Primärstahlerzeugung erneuert werden muss. Die Erneuerung würde die Lebenszeit der Anlage um ca. 20 Jahre verlängern und kostet i.d.R. 25-50 Prozent der Neuinvestition (SteelWatch 2023). Die Beschäftigung durch Reinvestitionsbedarf wurde daher basierend auf Erneuerungsbedarfen in Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2020) und BOF-Investitionskosten von IEA (2019) errechnet und dem Beschäftigungsbedarf durch Dekarbonisierungsinvestitionen gegenübergestellt, um die Nettoeffekte zu ermitteln.

3.2 Schwerlastverkehr

Die Beschäftigungsmultiplikatoren im Schwerlastverkehr werden je 1.000 hergestellte Lkw für Lkw mit Verbrennungsmotor (engl. internal combustion engine - ICE), batterielektrische Lkw (engl. battery electric vehicle – BEV) und Brennstoffzellen-Lkw (engl. fuel cell electric vehicle, FCEV) ermittelt. Der Ansatz basiert konzeptuell auf der Studie von Falck et al. (2017) und konzentriert sich auf die Produktgruppen, die direkt für Lkw-Herstellung relevant sind und sich zwischen Diesel- und elektrischen Fahrzeugen unterscheiden, wie bspw. Zünd- und Abgassysteme in ICE und Antriebsakkumulatoren in BEV und FCEV. Die Liste der berücksichtigten Produkte auf 9-Steller Ebene der GP-19-Klassifikation ist in Anhang C zu finden.

Die Beschäftigungsmultiplikatoren je Produkt wurden als Verhältnis von Beschäftigung zu Produktionsmenge errechnet. Statistisches Bundesamt (2024b) veröffentlicht Daten zu Produktionswert und Produktionsmenge auf 9-Steller Ebene, die Beschäftigungsdaten (Bundesagentur für Arbeit 2024) liegen jedoch nur auf 4-Steller WZ-Ebene[14] vor. Die Beschäftigung je Produktgruppe wurde daher unter der Annahme gleicher Arbeitsproduktivität je Produktionswert innerhalb eines 4-Stellers geschätzt (vgl. Falck et al. (2017)). Das Bezugsjahr liegt zwischen 2020 und 2023 je nach Verfügbarkeit der Daten. Bei

[14] Klassifikation der Wirtschaftszweige WZ-2008. Bis 4-Steller Ebene entspricht GP-19 der WZ-2008. Für Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27) lagen Beschäftigungsdaten auf 3-Steller Ebene vor.

fehlenden Produktionsmengen bei Lkw-Teilen wurden diese mit Hilfe von Produktionswerten und Einheitswerten aus der Außenhandelsstatistik (Statistisches Bundesamt 2024a) geschätzt. Fehlende Produktionsmengen bei Lkw-Bau wurden anhand der Zulassungszahlen des KBA (2023c) und Nettoimporten (Statistisches Bundesamt 2024a) geschätzt.

Der Gesamtmultiplikator ergibt sich aus der Summe der Multiplikatoren für Lkw-Teile und des gewichteten Mittelwerts der Multiplikatoren für Lkw-Bau in jeweiliger Klasse. Bei mittleren Lkw liegt diesem die Herstellung der Lkw mit zulässiger Gesamtmasse von 5-20 Tonnen zugrunde und bei schweren Lkw die Herstellung der Lkw mit zulässiger Gesamtmasse von über 20 Tonnen und Herstellung der Sattelzugmaschinen. Die drei Multiplikatoren unterscheiden sich jedoch nur geringfügig (vgl. Anhang C).[15] Der Vergleich der Arbeitsintensität im Lkw-Bau zwischen Diesel- und elektrischen Lkw war aufgrund von geschwärzten Daten nur für Lkw mit zulässiger Gesamtmasse unter 5 Tonnen möglich und ergab, dass die Fertigung der e-Lkw ca. 7 Prozent weniger arbeitsintensiv ist. Dieses Verhältnis wird sowohl für mittlere als auch für schwere Lkw angenommen.

Die Brennstoffzelle in FCEV und die Batterie in BEV und FCEV werden separat betrachtet, denn die statistischen Daten liegen pro Zelle vor, während in einem Kraftfahrzeug mehrere Zellen verbaut werden.[16] Für Brennstoffzellen wurde auf Basis eigener Recherchen eine durchschnittliche Zellenleistung von 10 kW in Herstellung angenommen, um die Beschäftigung je Zelle in die Beschäftigung je kW umzurechnen. Basierend auf existierenden FCEV-Lkw-Modellen, beträgt die durchschnittliche Gesamtleistung der verbauten Brennstoffzelle 45 kW bei mittleren Lkw und 208 kW bei schweren Lkw (Leicht 2022, Quantron a, Quantron b, Volvo Trucks Deutschland 2022, Hyundai 2022, Leicht und Seibt 2023). Der daraus resultierende Beschäftigungsmultiplikator für schwere Lkw liegt knapp unter dem aus E4tech, Ecorys & Strategic Analysis (2019) errechneten Wert für Lkw und der Beschäftigungsmultiplikator für mittlere Lkw etwas über dem Wert für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und damit in plausiblem Bereich. Da die Leistung einer Brennstoffzelle mit der Motorleistung zusammenhängt und die Reichweite über ihre Effizienz und die Größe des Wasserstofftanks bestimmt wird, wird angenommen, dass die Leistung über die Zeit konstant bleibt.

Eine plausible Umrechnung des statistischen Beschäftigungsmultiplikators für Batterien in Beschäftigung je kWh ist nicht möglich, weil die Zellenkapazität je nach Zellentyp zwischen 8 Wh bei kleinsten

[15] Der Multiplikator für Lkw mit zulässiger Gesamtmasse unter 5 Tonnen wird bei mittleren Lkw nicht berücksichtigt, weil diese auch leichte Lkw (unter 3,5 Tonnen) beinhalten, welche 98 Prozent des Bestands und 99 Prozent der Lkw-Neuzulassungen unter 5 Tonnen ausmachen und in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden.

[16] Insbesondere die Kapazität einer Batteriezelle schwankt stark je nach Zellentyp, und es können Hunderte oder gar Tausende von Zellen in einem Batteriepaket zusammengeführt werden.

Flachzellen und 880 Wh bei größten prismatischen Zellen variieren kann (Epec Engineered Technologies kein Datum) und keine Informationen zur Struktur der deutschen Batterieproduktion vorliegen. Stattdessen wurden Informationen zu bereits bestehenden und geplanten Batteriefabriken in Deutschland herangezogen (Harloff, et al. 2023) und daraus ein durchschnittlicher Arbeitsbedarf je kWh ermittelt. Der resultierende Beschäftigungsmultiplikator liegt gut im Bereich der Literaturangaben nach Cotterman et al. (2024) und etwas unter dem Wert, den Cotterman et al. (2024) in Experteninterviews für Pkw in USA ermittelt haben.

Im letzten Schritt muss der Multiplikator je kWh um die durchschnittliche Batteriegröße skaliert werden, um einen Beschäftigungsmultiplikator je Lkw zu errechnen. Bei einem FCEV hat die Batterie nur eine unterstützende Funktion, wenn die Brennstoffzelle die Leistung nicht schnell genug erhöhen kann (z.B. bei Beschleunigung), daher werden in FCEV eher kleinere Batterien eingebaut. Wie bei der Brennstoffzelle selbst, wird für FCEV angenommen, dass die Batteriekapazität sich im Zeitverlauf nicht verändern wird. In einem BEV ist die Batterie aber die einzige Energiequelle für den Elektromotor, und die Reichweite eines Lkw hängt entscheidend von der Batteriekapazität und ihrem Gewicht ab. Je nach Lkw-Größe und der notwendigen Reichweite (z.B. Nutzung für regionale Fahrten oder Langstrecken) werden sehr unterschiedliche Batteriepakete eingebaut, es kann jedoch erwartet werden, dass mit zunehmender Effizienz und abnehmendem Gewicht der Batterie die Kapazität zukünftig reduziert werden kann.

Als Unter- und Obergrenze für Batteriegröße im Zeitverlauf wurden die Annahmen von Fleiter et al. (2023) und Basma und Rodriguez (2023) herangezogen. Die für mittlere und schwere Lkw gemittelten Kapazitäten sind in Tabelle 3-2 dargestellt.[17] In LFS (Fleiter, et al. 2023) wird von einer eher geringen aktuellen Batteriegröße und deren Steigerung bis 2045 ausgegangen. Während die LFS eine Hauptprognose für diese Analyse bilden, ist eine solche Annahme zur Batteriegröße jedoch eher kontraintuitiv. Gerade bei schweren Lkw und Sattelzugmaschinen übersteigen die Batteriekapazitäten in aktuellen Lkw-Modellen oft die angenommenen Werte (Volvo Trucks Deutschland 2023, MAN Truck & Bus a, Bloch, et al. 2023). Basma und Rodriguez (2023) nehmen dagegen an, dass aktuell noch eher große Batterien eingebaut werden müssen, die Kapazität aber bis 2030 insbesondere für schwere Lkw deutlich reduziert wird. Die Spanne zwischen den beiden Prognosen wird in der folgenden Analyse als Unsicherheitsinterval genutzt.

[17] In LFS werden im Strom-Szenario mittel- bis langfristig auch schwere batterieelektrische Lkw mit Oberleitung eingesetzt. Die Batteriegröße dafür wird aus LFS übernommen.

Tabelle 3-2: Angenommene Batteriekapazitäten in kWh für mittlere und schwere Lkw

Jahr	Mittlere Lkw			Schwere Lkw			
	FCEV	BEV (LFS)	BEV (Basma & Rodriguez)	FCEV	BEV (LFS)	BEV (Basma & Rodriguez)	Oberleitungs-BEV (LFS)
2024	37	134	131	88	260	605	182
2030	37	169	111	88	377	448	182
2045	37	192	111	88	596	448	182

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fleiter et al. (2023) und Basma und Rodriguez (2023).

Da die Multiplikatoren nur für die Produktgruppen errechnet werden, die sich zwischen Technologien unterscheiden, sind sie vor allem im Vergleich zwischen Diesel-Lkw und Lkw mit alternativen Antrieben sinnvoll zu interpretieren. Abbildung 3-3 zeigt den Unterschied in errechneten Multiplikatoren zwischen Diesel-Lkw und BEV bzw. FCEV, unterteilt in Lkw-Bau, Lkw-Teile und Herstellung der Batterie und Brennstoffzelle.[18] Der durch die blauen Intervalle gekennzeichnete Bereich zeigt die Unsicherheit bezüglich der Batteriegröße in BEV.

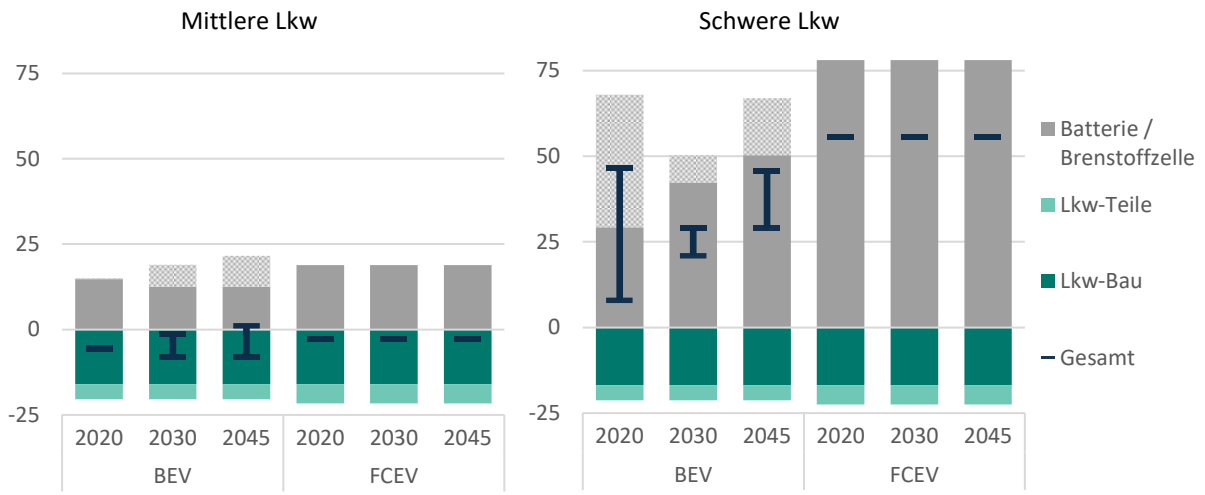
Betrachtet man nur den Lkw-Bau und die Lkw-Teile, ist die Fertigung der BEV- und FCEV-Lkw leicht weniger arbeitsintensiv ist als bei Diesel-Lkw. Der Unterschied ist vor allem auf den Lkw-Bau zurückzuführen, wo der Großteil der Beschäftigung in den betrachteten Produktgruppen entsteht. In den Liefererbranchen (Lkw-Teile), für welche die Dekarbonisierung relevant ist, ist mit 27 Prozent (BEV) bis 34 Prozent (FCEV) weniger Arbeitsbedarf im Vergleich zum Diesel-Lkw rechnen, diese machen aber nur 5-7 Prozent des Multiplikators für Lkw-Bau und sind damit absolut betrachtet weniger bedeutend.

Berücksichtigt man die Herstellung der Batterie und der Brennstoffzelle, ist die Produktion der mittleren BEV- und FCEV-Lkw fast genauso arbeitsintensiv wie bei den mittleren Diesel-Lkw. Die Senkung des Arbeitsbedarfs liegt bei 6-8 Beschäftigten je 1.000 Lkw unter der Annahme der sinkenden Batteriegröße und wird unter der Annahme der steigenden Batteriegröße bis 2045 in eine Steigerung um einen Beschäftigten je 1.000 Lkw umgekehrt. Die Produktion der schweren BEV- und FCEV-Lkw ist dagegen deutlich arbeitsintensiver, unabhängig davon, ob die Batteriegröße von niedrigem Niveau steigt oder von hohem Niveau sinkt. Das liegt daran, dass schwere Lkw wegen ihres Gewichts insgesamt eine größere Batterie (und ggf. Brennstoffzelle) benötigen, umso mehr bei den Langstrecken-Lkw, wo größere

[18] Schwere Oberleitungs-Lkw werden in der Grafik nicht angezeigt, der Gesamtmultiplikator ist auf dem Niveau eines Diesel-Lkw und bleibt über die Zeit konstant.

Reichweite notwendig ist. Dies ist auch im Einklang mit den Ergebnissen für Pkw aus anderen Studien (Cotterman, et al. 2024).[19]

Abbildung 3-3: Unterschied in der Anzahl Beschäftigter je 1.000 mittlere und schwere Lkw im Vergleich zum Diesel-Lkw



Anmerkung: Es werden nur Produktgruppen berücksichtigt, die sich zwischen den Antriebsarten unterscheiden. Nicht berücksichtigt werden z.B. Karosserie, Achsen, Räder, Betriebselektronik, etc.

Quelle: Eigene Darstellung.

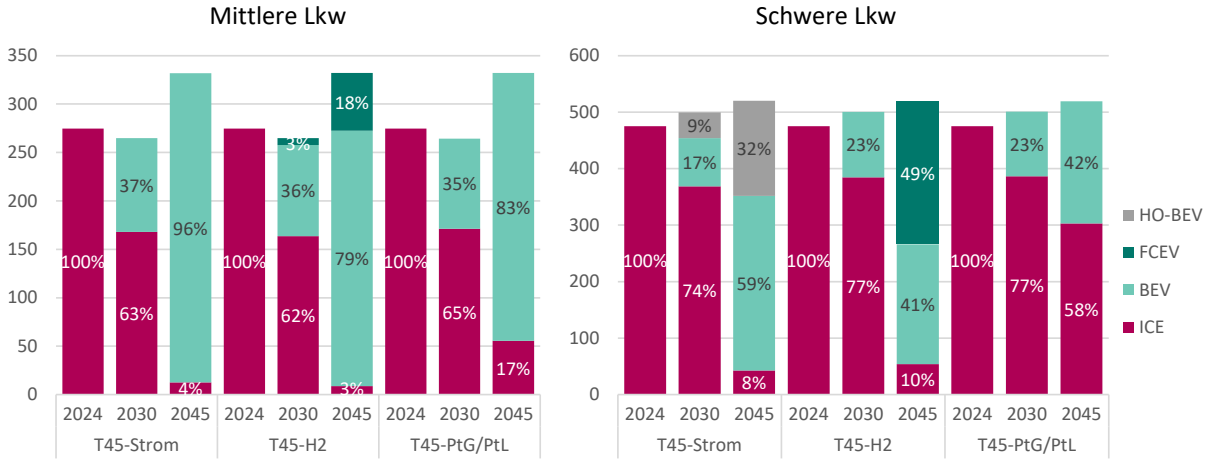
Um die Nettoeffekte zu ermitteln, dient die Entwicklung der Lkw-Flotte nach LFS (Fleiter, et al. 2023) als Grundlage. Da die Modellierungsergebnisse etwas vom tatsächlichen Bestand in 2020 abweichen, werden die Wachstumsrate und anteilige Struktur verschiedener Antriebe an den tatsächlichen Bestand angewandt. Für einen Vergleich zum Status Quo wird der Bestand zum 1. Januar 2024 (KBA 2024a) verwendet. Um die Effekte auf die Lkw-Herstellung in Deutschland für den deutschen Markt abzugrenzen, wird der Import-Anteil unter der Annahme einer konstanten Importquote abgezogen. Abbildung 3-4 zeigt den Bestand vor dem Abzug der Importe und die Struktur der Lkw-Flotte nach Antriebsart und LFS-Szenario. Allen Szenarien ist gemeinsam, dass die Lkw-Flotte sich langfristig vergrößert und BEV-Lkw eine wichtige Rolle spielen. FCEV werden nur im H2-Szenario und erst nach 2030 aktiv eingesetzt. Im PtG/PtL-Szenario bleibt insbesondere bei schweren Lkw noch ein großer Anteil der Lkw mit Verbrennungsmotoren, die spätestens 2045 mit biogenen oder aus dem Wasserstoff erzeugten synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

[19] Cotterman et al. (2024) berücksichtigen in eigenen Berechnungen und in ihrer Literaturübersicht nicht den Beschäftigungsbedarf für die Pkw-Fertigung, so dass die Arbeitsintensität für die e-Pkw-Herstellung inkl. Batterie etwa das Zwei- bis Dreifache der Arbeitsintensität für Herstellung eines Verbrenner-Pkw ausmacht. Berücksichtigt man im Lkw-Multiplikator nur Lkw-Teile und die Batterie, liegt das Ergebnis für Lkw im gleichen Bereich.

Um die notwendige Produktion aus dem Bestand in jeweiligen Jahren abzuleiten muss allerdings berücksichtigt werden, dass jedes Jahr auch ältere Fahrzeuge aus dem Bestand ausscheiden. Es wird daher wie folgt vorgegangen:

- Für die Entwicklung des Bestands zwischen den Stichjahren wird ein linearer Trend angenommen.
- Auf Basis von BMF (2000) wird eine Nutzungsdauer für Lkw von 9 Jahren angenommen. Dies entspricht einer jährlichen Ausscheidungsquote von 11 Prozent, welche an den Bestand im jeweiligen Jahr angewandt wird.
- Die Anzahl der Neuzulassungen, die für die Produktion ausschlaggebend ist, ist dann im Jahr t die Veränderung des Bestands zwischen Jahr t und Jahr $t-1$ zuzüglich der Zahl der ausgeschiedenen Lkw im Jahr t.

Abbildung 3-4: Bestand mittlerer und schwerer Lkw in Tsd. nach Antriebsart und LFS-Szenario



Anmerkungen: Hybride und Plug-in-Hybride werden zusammen mit anderen Lkw mit Verbrennungsmotor unter ICE gruppiert. HO-BEV steht für BEV mit Oberleitung.

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fleiter et al. (2023).

Die so errechnete Zahl der Neuzulassungen liegt in 2025 bei insgesamt ca. 84 Tsd. Fahrzeugen und steigt stetig an, bis in 2045 ca. 100 Tsd. Fahrzeuge jährlich zugelassen werden. Im Vergleich lag die Gesamtzahl der Neuzulassungen bei Lkw mit zulässiger Gesamtmasse über 3,5 Tonnen und Sattelzügen in 2016-2023 zwischen 80 und 85 Tsd. Fahrzeugen jährlich (KBA 2023c, 2024b, 2024c).[20]

[20] Mit Ausnahme von Krisenjahren 2020-2022.

3.3 Beschäftigung aus PtX-Erzeugung

Den Nettobeschäftigungseffekten aus dem Betrieb der relevanten Anlagen (d.h. aus Stahlerzeugung oder Lkw-Herstellung) kann die potentielle Beschäftigung aus heimischer Erzeugung von Wasserstoff oder seinen Derivaten gegenübergestellt werden. Als Grundlage dafür dienen die in LFS ermittelten PtX-Bedarfe in der Stahlindustrie und im Schwerlastverkehr.[21]

Die Beschäftigungsmultiplikatoren je 1 TWh PtX-Endprodukt wurden ebenfalls im Rahmen von Power2Jobs im Wasserstoff Atlas deutschland ermittelt und liegen für die Kernbeschäftigung und die Gesamtbeschäftigung vor.[22] Die Kernbeschäftigung entspricht z.B. dem Betrieb eines Elektrolyseurs bei Wasserstofferzeugung oder dem Betrieb eines Elektrolyseurs, einer Methanisierungsanlage und einer Direct Air Capture- (DAC-)Anlage für CO_2-Bereitstellung bei Erzeugung von synthetischem Methan. Bei der Gesamtbeschäftigung wird außerdem der Betrieb der für die Herstellung von 1 TWh PtX-Endprodukt notwendigen Anlagen zur erneuerbaren Stromerzeugung (PV und Onshore-Wind) berücksichtigt. Tabelle 3-3 bietet einen Überblick über die benutzten Beschäftigungsmultiplikatoren im Zeitverlauf.

Tabelle 3-3: Multiplikatoren für Kern- und Gesamtbeschäftigung je 1 TWh PtX

Jahr	Wasserstoff		Synthetisches Methan	
	Kern-beschäftigung	Gesamt-beschäftigung	Kern-beschäftigung	Gesamt-beschäftigung
2025	111	444	330	763
2030	89	415	293	717
2035	74	393	266	681
2040	59	371	238	645
2045	48	351	214	611

Quelle: Eigene Berechnungen, DIW Econ.

Es ist jedoch unrealistisch anzunehmen, dass der gesamte Wasserstoffbedarf durch heimische Produktion gedeckt werden kann. Für 2030 geht die Nationale Wasserstoffstrategie von einer Importquote von 50 bis 70 Prozent aus (Die Bundesregierung 2023). Auch langfristig gehen Fraunhofer ISI et al. (2024) von einer ähnlichen Importquote von 57 bis 69 Prozent je nach LFS-Szenario aus. Im Umkehrschluss werden daher die inländischen Produktionsquoten von 30 bis 50 Prozent als Unter- und Obergrenzen für die Beschäftigungseffekte aus PtX-Erzeugung gesetzt.

[21] Der Vergleich im Schwerlastverkehr kann nur stichpunktartig erfolgen, weil der Wasserstoffbedarf nur im H2-Szenario existiert und der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen nicht von fossilen und biogenen Kraftstoffen getrennt wird.

[22] Vgl. DIW Econ Arbeitspapier „Upstream Beschäftigungseffekte der P2X-Produktion“.

4. Ergebnisse

4.1 Stahlindustrie

Abbildung 4-1 bietet einen Überblick über die Nettobeschäftigungseffekte aus der Prozessumstellung in der Stahlindustrie und potentieller PtX-Erzeugung zur Deckung der Nachfrage nach Wasserstoff bzw. synthetischem Methan. Durch geringere Kernbeschäftigung in DRI-EAF- und EAF-Anlagen im Vergleich zu BOF entsteht bei der Betrachtung der Stahlerzeugung ein negativer Nettoeffekt um bis zu 1,2 Tsd. Beschäftigten im Vergleich zu Business as Usual und bis zu 1,7 Tsd. Beschäftigten im Vergleich zum Status Quo. Vom Status Quo heraus entspricht dies 1,8 Prozent der Beschäftigung in der Stahlerzeugung in 2023[23] und etwa einem Viertel des Beschäftigungsrückgangs in der Stahlindustrie zwischen 2010 und 2020 (Blöcker 2022). Im Vergleich dazu prognostiziert BMAS (2023), dass deutsche Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter bis 2040 um 4,5 Prozent zurückgehen wird. Der mäßige Effekt auf Beschäftigung in Stahlerzeugung ist im Einklang mit der Meinung der Experten aus der Stahlindustrie, dass die Umstellung auf grünen Stahl keine starke Beschäftigungswirkung auslösen würde.

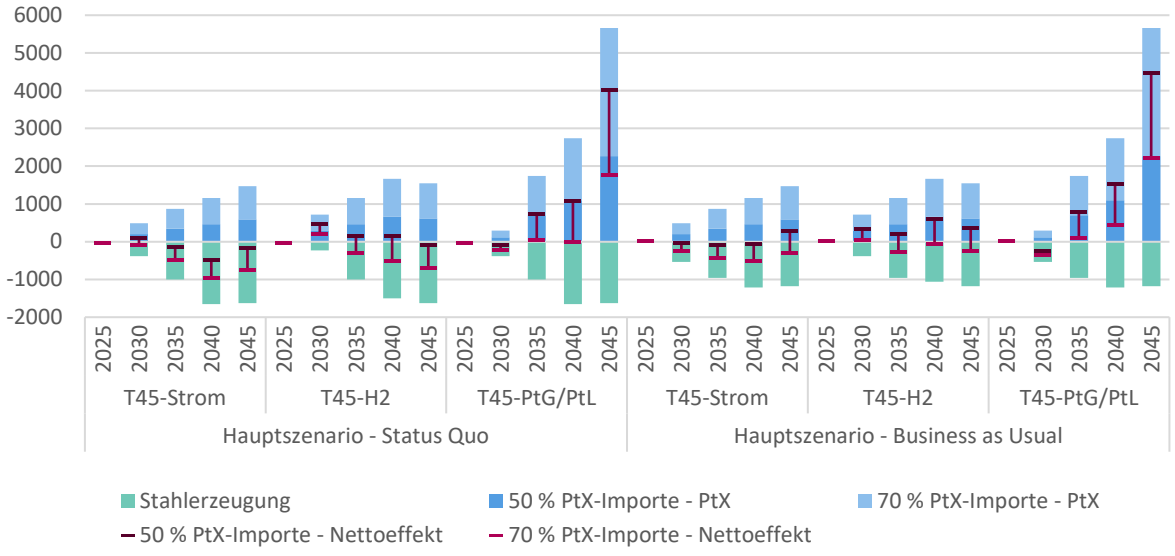
Eine etwas stärkere Beschäftigungsreduktion ausgehend vom Status Quo (im Vergleich zu Business as Usual) ist darauf zurückzuführen, dass die LFS eine Reduktion der Produktionsmenge um ca. 6 Prozent im Vergleich zum Niveau von 2021 aufgrund der erhöhten Materialeffizienz in Sektoren, die Stahl verbrauchen, vorsehen.

Die Dynamik der Beschäftigungsreduktion ist je nach LFS-Szenario leicht unterschiedlich, denn im H2-Szenario wird kurzzeitig mehr DRI-Stahl produziert, als im Strom- oder PtG/PtL-Szenario.[24] So wird der Nettoeffekt in 2030 und 2040 um ca. 150 Beschäftigte pro Jahr reduziert. In 2045 sind die Nettobeschäftigungseffekte jedoch in allen drei LFS-Szenarien gleich, weil dann eine gleiche Menge Stahl nur über die DRI-EAF-Route für Primärstahl und die EAF-Route für Sekundärstahl erzeugt wird (vgl. Abschnitt 3.1).

[23] Unter Stahlerzeugung wurden Wirtschaftszweige 24.10 und 24.20 berücksichtigt.

[24] Kurzzeitiger Überschussbedarf an Beschäftigung durch Umschulungen oder parallellaufende Stahlwerke wird in der Analyse nicht berücksichtigt. S. Küster Simic und Schönfeldt (2022) für eine Analyse dazu.

Abbildung 4-1: Nettobeschäftigungseffekte im Betrieb der Anlagen zur Stahl- und PtX-Erzeugung



Quelle: Eigene Darstellung.

Dem Nettoeffekt im Betrieb der Stahlerzeugungsanlagen kann die Kernbeschäftigung im Betrieb der PtX-Erzeugungsanlagen gegenübergestellt werden. Die in Abbildung 4-1 dargestellte Spanne entspricht den potentiellen Importquoten zwischen 50 und 70 Prozent bzw. inländischen Produktionsquoten von 30 bis 50 Prozent (vgl. Abschnitt 3.3). Im Vergleich zu Business as Usual wäre im Strom-Szenario eine inländische Produktionsquote von 50 Prozent notwendig, um die Beschäftigungsreduktion in der Stahlerzeugung auszugleichen. Im H2-Szenario wäre auch eine etwas geringere Inlandsquote ausreichend. Im PtG/PtL-Szenario ist die PtX-Produktionskette mit Elektrolyseur, Methanisierungsanlage und DAC-Anlage deutlich arbeitsintensiver, so dass je nach Importquote ein positiver Nettogesamteffekt von 2 Tsd. bis 4,5 Tsd. Beschäftigten in 2045 zu erwarten wäre.

Im Vergleich zu Status Quo entsteht im Strom-Szenario auch bei nur 50 Prozent Importen ein leichter negativer Nettogesamteffekt gegen 2040, weil hier erdgasbasierte DRI-EAF als Brückentechnologie eingesetzt wird und die Wasserstoffproduktion nicht schnell genug ansteigt, um die Beschäftigungsreduktion in der Stahlerzeugung auszugleichen. Im H2-Szenario kann mit 50 Prozent inländischer Produktionsquote die Beschäftigungssenkung in Stahlerzeugung ausgeglichen werden. Im PtG/PtL-Szenario bleibt auch eine 30-prozentige inländische Produktionsquote für den Ausgleich ausreichend.

Die PtX-Erzeugung ist damit einer der Pfade, über welche für die Beschäftigten, die durch die Transformation in der Stahlindustrie ihre Arbeitsplätze verlieren und nicht aus Altersgründen aus dem Arbeitsmarkt ausscheiden, eine neue dauerhafte Beschäftigung gesichert werden kann. Hierzu sind ggf. Umschulungen notwendig, um PtX-spezifische Kompetenzanforderungen zu erfüllen. Die durchgeführten Interviews zeigen jedoch, dass die Beschäftigten in der Stahlindustrie in der Regel gut ausgebildet sind

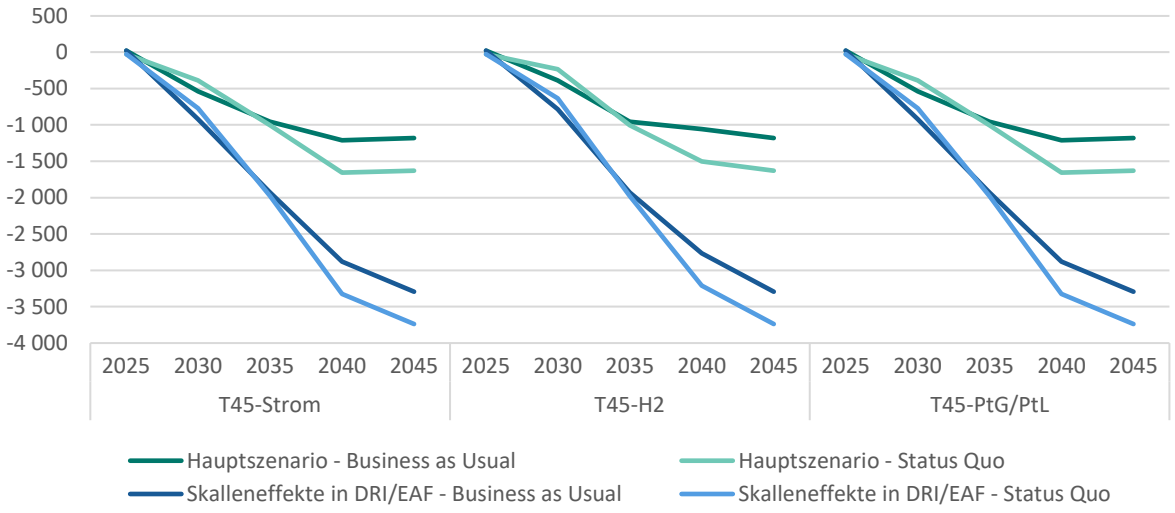
und sich der Umschulungsaufwand sowohl für den Wechsel zwischen den Stahlherstellungsrouten als auch für den Umstieg in die PtX-Erzeugung in Grenzen halten würde.

Nicht berücksichtigt ist in Abbildung 4-1 der Betrieb der erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen, um den für die Elektrolyse benötigten grünen Strom zu erzeugen bzw. Methanisierungs- und DAC-Anlagen zu betreiben. Der Beschäftigungseffekt aus dem Betrieb der Stromerzeugungsanlagen kann bei 70 Prozent Importen zusätzliche 5,6 bis 6,3 Tsd. Beschäftigte und bei 50 Prozent Importen sogar 9,4 bis 10,5 Tsd. Beschäftigte jährlich je nach LFS-Szenario betragen.

Während die positiven Beschäftigungseffekte aus PtX-Erzeugung als Gegengewicht zu der potentiellen leichten Beschäftigungsreduktion in Stahlerzeugung betrachtet werden können, zeigen sie auch den Bedarf an Fachkräften, um grüne Stahlerzeugung mit deutschem Wasserstoff zu ermöglichen. Mit Hinblick auf den steigenden Fachkräftemangel in Deutschland ist insbesondere das PtG/PtL-Szenario wegen deutlich geringerer Energie-, Kosten- und Beschäftigungseffizienz der Erzeugung von synthetischem Methan eher kritisch zu betrachten, auch wenn hier mittelfristig etwas geringere Investitionskosten zu erwarten sind (s. auch die Auswertung der Investitionsphase unten).

Dem in Abbildung 4-1 dargestellten Hauptszenario liegt die Annahme zugrunde, dass heutige Arbeitsintensität der Stahlproduktion in BOF-, DRI-EAF- und EAF-Anlagen unverändert bleibt. Nimmt man dagegen optimistisch an, dass bei einer umfassenden Umstellung auf grüne Stahlerzeugung der Beschäftigungsbedarf in DRI-EAF- und EAF-Anlagen durch Lern- und Skaleneffekte stark reduziert wird, beträgt die Beschäftigungsreduktion bis zu 3,3 Tsd. Beschäftigten im Vergleich zu Business as Usual und bis zu 3,7 Tsd. Beschäftigten im Vergleich zu Status Quo (vgl. Abbildung 4-2). Stellt man dieser Reduktion die PtX-Kernbeschäftigung gegenüber, wäre der Gesamteffekt nur im PtG/PtL-Szenario mit eher höherer Inlandsquote ausgeglichen. Berücksichtigt man aber auch den Betrieb der erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen, ist der Gesamteffekt auch bei hohen Importquoten weiterhin positiv.

Abbildung 4-2: Sensitivitätsanalyse der Nettobeschäftigungseffekte im Betrieb der Stahlerzeugungsanlagen

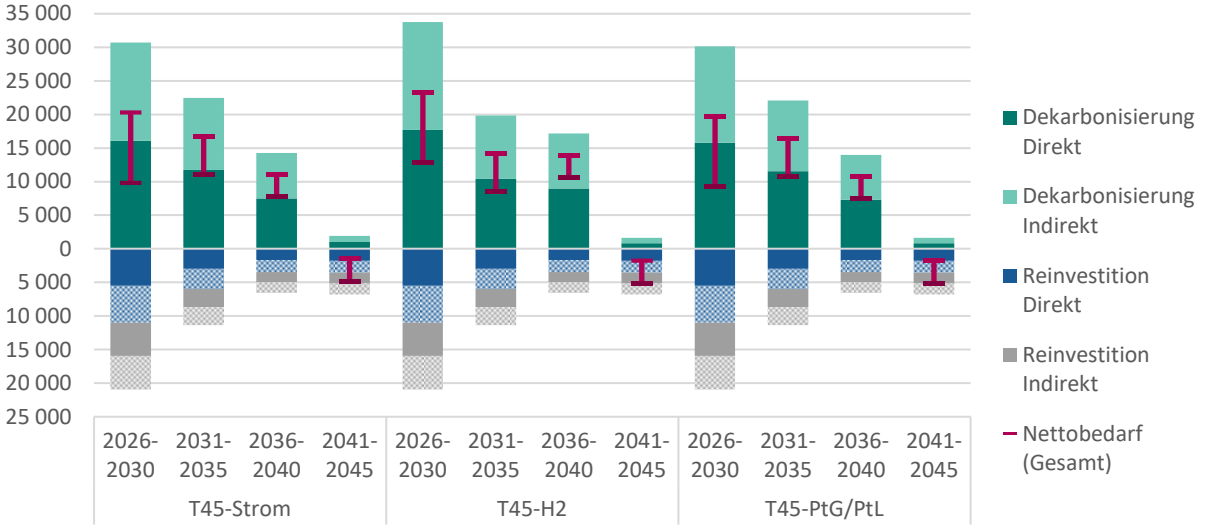


Quelle: Eigene Darstellung.

In der Investitionsphase entstehen im Aufbau von neuen DRI-EAF- und EAF-Anlagen vor allem in der Zeit zwischen 2026 und 2030 starke Beschäftigungseffekte (vgl. Abbildung 4-3). Unter Annahme, dass heutige Überkapazitäten in der Primärstahlerzeugung (ca. 84 Prozent Ausnutzung) bestehen, können bis zu 18 Tsd. Beschäftige über fünf Jahre direkt im Aufbau der Anlagen und noch bis zu 16 Tsd. Beschäftigte indirekt entlang der gesamten Lieferkette benötigt werden. Dies sind allerdings nur einmalige Effekte, die mit fortschreitendem Umbau der Stahlindustrie stetig sinken und in 2041-2045, wenn die Umstellung weitgehend abgeschlossen ist, bereits sehr gering sind.

Die größten Effekte sind im H2-Szenario zu erwarten, wo frühzeitig (derzeit noch teurere) wasserstoffbasierte DRI-EAF-Anlagen aufgebaut werden. Im Strom-Szenario werden bis 2035 noch erdgasbasierte DRI-EAF-Anlagen als Brückenlösung aufgebaut, die dann zu Wasserstoff konvertiert werden. Da aber für wasserstoffbasierte DRI noch eine Senkung der Investitionskosten erwartet wird, ist in diesem Szenario der Gesamtinvestitionsbedarf und die damit verbundenen Beschäftigungswirkungen etwas geringer. Die geringsten Effekte sind schließlich im PtG/PtL-Szenario zu erwarten, wo bereits etablierte und etwas weniger kostenintensive erdgasbasierte DRI eingesetzt wird und die Emissionsreduktion durch Nutzung von synthetischem Methan erfolgt. Über den gesamten Zeitraum von 2025 bis 2045 wären in diesem Szenario 4,5 Tsd. weniger Beschäftigte für den Umbau der Stahlerzeugung benötigt, als im H2-Szenario.

Abbildung 4-3: Beschäftigung aus Investitionen in DRI-EAF- und EAF-Anlagen im Vergleich zu Reinvestition



Quelle: Eigene Darstellung.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die bestehenden BOF-Kapazitäten in den kommenden Jahren ohnehin erneuert werden müssen (vgl. Abschnitt 3.1). Diese werden in Abbildung 4-3 nach unten abgebildet, wobei die roten Intervalle die Bandbreite der Reinvestitionskosten (25 bis 50 Prozent der Kosten einer neuen Anlage) zeigen. Stellt man die Dekarbonisierungsinvestitionen den Reinvestitionen gegenüber, reduziert sich der Nettogesamteffekt um ein bis zwei Drittel in 2026-2030 und liegt im H2-Szenario zwischen 13 Tsd. und 23 Tsd. Beschäftigten über fünf Jahre. In 2041-2045 wird der Nettogesamt sogar in allen drei Szenarien negativ, weil die alten Anlagen weiter erneuert werden müssen, die neuen Anlagen aber eine Lebensdauer von ca. 25 Jahren haben und ihre Erneuerung erst nach 2050 ansteht.

Jedoch sind auch 10-20 Tsd. zusätzliche Beschäftigte – beim linearen Aufbau 2,5-4 Tsd. Beschäftigte jährlich – nicht unbedeutend. Hinzu kommt, dass auch für den Aufbau der PtX-Infrastruktur, sollte der Bedarf teilweise mit heimisch produziertem Wasserstoff bzw. synthetischem Methan gedeckt werden, auch bei 70 Prozent Importen 1-2 Tsd. Kernbeschäftigte je fünf Jahre im Strom-/H2-Szenario und bis zu 10 Tsd. Kernbeschäftigten im PtG/PtL-Szenario sowie bis zu 30 Tsd. Beschäftigten im Aufbau der Stromerzeugungsanalgen benötigt werden könnten. Damit bedarf das PtG/PtL-Szenario, wie auch in Betriebsphase, insgesamt deutlich mehr Arbeitskräfte, als das Strom- oder H2-Szenario.

Ohne geeignete Maßnahmen zur Bereitstellung der Arbeitskräfte würden diese durch den Umbau der Stahlindustrie und Aufbau der PtX-Erzeugungskapazitäten in anderen Bereichen (z.B. Wohnungsbau, Umbau anderer Industrien) fehlen. Es ist daher entscheidend, nicht nur die geeigneten Rahmenbedingungen für die Transformation der Industrie und den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zu setzen, sondern auch die Fachkräftesicherung voranzutreiben.

4.2 Schwerlastverkehr

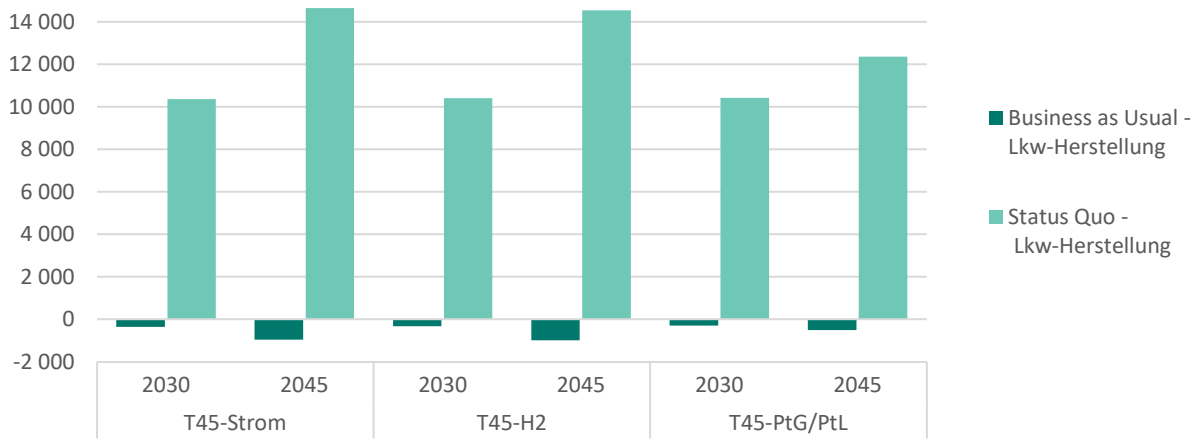
Da die Batterie- und Brennstoffzellenherstellung starke positive Beschäftigungseffekte haben aber im Gegensatz zu den traditionellen Zuliefererbranchen der Automobilindustrie eher neue Branchen für Deutschland darstellen, werden die Ergebnisse im Folgenden in die Effekte der Lkw-Herstellung (Teile und Fertigung) und die Effekte der Batterie- und Brennstoffzellenherstellung aufgeteilt.

Abbildung 4-4 zeigt die Nettobeschäftigungseffekte aus Lkw-Herstellung in 2030 und 2045 im Vergleich zu Business as Usual und im Vergleich zu Status Quo. Anders als in der Stahlindustrie, ist in der langen Frist ausgehend vom heutigen Niveau ein Beschäftigungsanstieg von bis zu 14,6 Tsd. Beschäftigten jährlich in 2045 zu erwarten. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch die wachsende Wirtschaft der Transportvolumen ansteigt. Mittelfristig kann dem teilweise durch Planungs- und Routenoptimierung sowie Verlagerung der Gütertransporte auf Schiene und Wasserwege entgegengewirkt werden. Langfristig wird aber der Transportvolumen in allen Verkehrsbereichen steigen, so dass die notwendige Lkw-Flotte auch wachsen muss. Diese ist in 2045 bei mittleren Lkw um 20 Prozent und bei schweren Lkw um 10 Prozent größer als in 2020 in allen LFS-Szenarien (vgl. Abschnitt 3.2).

Da diese Flottenerweiterung ein exogener Faktor für die Lkw-Hersteller ist, nimmt der Vergleich zu Business as Usual diesen Faktor raus und erlaubt es, auf die Effekte der technologischen Strukturveränderung zu fokussieren. Würde die Lkw-Flotte in heutiger Struktur mit gleichem Tempo wie in LFS-Szenarien wachsen, könnten 2045 bis zu 1 Tsd. mehr Personen in Lkw-Fertigung und Zuliefererbranchen beschäftigt sein, als bei der Umstellung auf BEV und FCEV, die in der Herstellung eine geringere Arbeitsintensität aufweisen.[25]

[25] Dieses Ergebnis berücksichtigt jedoch nicht, dass die Zulieferer ihre Produktion anpassen (z.B. neue Produkte einführen) und so ihren Marktanteil und das Beschäftigungsniveau erhalten können.

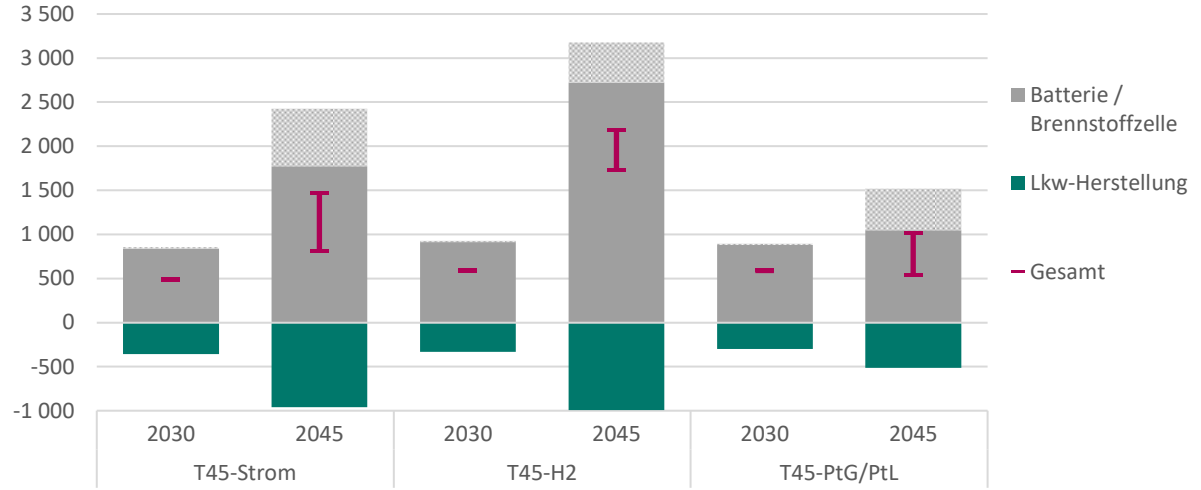
Abbildung 4-4: Nettobeschäftigungseffekte aus Lkw-Herstellung im Vergleich zu Status Quo und zu Business as Usual



Quelle: Eigene Darstellung.

Die resultierende Beschäftigungsreduktion in Dekarbonisierungsszenarien wird außerdem vollständig durch die Batterie- und Brennstoffzellenfertigung ausgeglichen, wenn diese für den heimisch produzierten Anteil der Flotte auch in Deutschland angesiedelt wird (vgl. Abbildung 4-5). In 2030 könnten je nach LFS-Szenario ca. 800-900 Arbeitsplätze durch Batterie- und Brennstoffzellenfertigung für Lkw entstehen, so dass die Beschäftigung insgesamt um ca. 500-600 Personen höher ausfallen würde, als wenn die Lkw-Flotte weiterhin aus Diesel-Lkw bestehen würde. Da der Anteil der BEV und FCEV jedoch noch gering bleibt, ändert sich dieses Ergebnis kaum mit alternativen Annahmen zur Batteriegröße.

Abbildung 4-5: Nettogesamteffekte im Schwerlastverkehr (im Vergleich zu Business as Usual)



Quelle: Eigene Darstellung.

In 2045 liegt die Beschäftigungssteigerung durch Batterie- und Brennstoffzellenfertigung zwischen 1-1,5 Tsd. Beschäftigten im PtG/PtL-Szenario, wo der Anteil der Lkw mit alternativen Betrieben am

geringsten ist, und 2,7-3,2 Tsd. Beschäftigten im H2-Szenario, wo neben den Batterien auch Brennstoffzellen benötigt werden. Der Nettogesamteffekt ist dadurch auch in 2045 in allen LFS-Szenarien positiv und beträgt 500-1.000 Beschäftigte im PtG/PtL-Szenario, 800-1.500 Beschäftigte im Strom-Szenario und 1,7-2,2 Tsd. Beschäftigte im H2-Szenario.

Der jährliche Bedarf an Batteriefertigung durch Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs beträgt je nach LFS-Szenario und Annahme zur Batteriegröße 6-8 GWh in 2030 und 9-19 GWh in 2045. Wenn alle angekündigten Pläne zum Bau der Batteriefabriken in Deutschland bis 2026 umgesetzt werden, würden bis Ende des Jahrzehnts mind. 20 Tsd. Arbeitsplätze und Fertigungskapazitäten von ca. 265 GWh, mit potentieller Erweiterung auf ca. 300 GWh, entstehen. Diese beinhalten zwar die Batterieherstellung sowohl für Lkw als auch für Pkw, wobei die letzteren den Großteil der Nachfrage bilden werden, jedoch zeigt dieser Vergleich, dass der Beschäftigungsbedarf durch Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs relativ gering und realistisch umsetzbar ist.

Ungewiss bleibt jedoch, wie auch in anderen Bereichen, das Wasserstoffangebot. Gerade im Verkehr eignen sich kleinere regionale Erzeugungspunkte gut, um das Tankstellennetz zu versorgen, während z.B. die Stahlindustrie auf Pipeline-Transporte größerer Wasserstoffmengen zu einzelnen Stahlwerken angewiesen sein wird. Abgesehen von der regionalen Verteilung, ist der Gesamtwasserstoffbedarf jedoch auch im Verkehr relativ hoch. Im H2-Szenario, wo wasserstoffbetriebene Lkw aktiv eingesetzt werden, beträgt der Wasserstoffverbrauch in 2045 ca. 60 TWh. Würde man nur 30 Prozent dieses Bedarfs aus heimischer Erzeugung decken, wären im Betrieb der Elektrolyseure und der benötigten Anlagen zur erneuerbaren Stromerzeugung weitere 6,7 Tsd. Beschäftigte notwendig.

5. Zusammenfassung

Die Transformation zur Klimaneutralität erfordert eine umfassende Umstrukturierung von Prozessen in der deutschen Wirtschaft. In vielen Branchen wird daher befürchtet, dass die Prozessvereinfachung zu Arbeitsplatzverlusten führen könnte. Insbesondere mögliche Verluste in der Automobilindustrie werden hervorgehoben (Herrmann, et al. 2020, Mönnig, et al. 2019). Ziel dieser Analyse war es daher, die potenziellen Nettobeschäftigungseffekte der Dekarbonisierung für zwei Sektoren mit besonderen Herausforderungen bei der Dekarbonisierung, nämlich die Stahlindustrie und den Schwerlastverkehr, zu analysieren und die mögliche Rolle der Wasserstoffwirtschaft als Wachstumsmotor zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass, wenn negative Effekte in den beiden Sektoren auftreten, sind diese doch eher gering, wenn die Stahl- und Lkw-Produktion langfristig in Deutschland verbleibt. Es ist

wahrscheinlich, dass diese Effekte durch Anpassungsstrategien und neue Geschäftsmodelle der Unternehmen, insbesondere der Automobilzulieferer, wie z.B. die Einführung neuer Produkte, kompensiert werden können (Capgemini 2021, The Future 2022). Betrachtet man darüber hinaus die zusätzlichen Arbeitsplätze, die durch die Dekarbonisierung im Allgemeinen und in der Wasserstoffwirtschaft im Besonderen geschaffen werden und die mit den Bedarfen in den beiden untersuchten Sektoren verbunden sind, so ergeben sich überwiegend positive Nettobeschäftigungseffekte.

Angesichts des bereits heute spürbaren Fachkräftemangels und der Alterung der Bevölkerung in Deutschland, die den Mangel in Zukunft noch verschärfen wird, bedeuten diese positiven Nettoeffekte aber auch, dass die Dekarbonisierung umfassende Strategien zur Fachkräftesicherung sowohl auf staatlicher als auch auf betrieblicher Ebene erfordert.

Darüber hinaus wird auch für die weiterbestehenden Arbeitsplätze eine Anpassung der Kompetenzprofile an die neuen Verfahren und ggf. den Umgang mit Wasserstoff erfolgen müssen. Da insbesondere die klimaneutrale Stahlerzeugung für die deutschen Unternehmen noch Neuland ist, ist diese Anpassung ein gemeinsamer Lernprozess von Führungskräften und Kernbelegschaften. Der bereits heute hohe Ausbildungsstand der Beschäftigten erleichtert zwar die Umstellung, in der Übergangsphase ist jedoch teilweise mit Weiterbildungsbedarf und auch erhöhtem Beschäftigungsbedarf zu rechnen, um die Produktion unterbrechungsfrei weiterlaufen zu lassen und gleichzeitig die Umschulungen durchzuführen.

Neben der Fachkräftesicherung im Allgemeinen und der Weiterbildung der bestehenden Arbeitskräfte in den betroffenen Branchen ist es daher von entscheidender Bedeutung, die erforderlichen Qualifikationen und Kompetenzen des Nachwuchses durch entsprechende Ausbildungsangebote zu sichern.

Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen e.V. 2024. *Energiebilanz der Bundesrepublik 2022.* 31. Januar.

Agora Energiewende und Wuppertal Institut. 2020. „Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement (Version: 1.2, August 2020).“ Berlin.

ArcelorMittal Deutschland. kein Datum. *ArcelorMittal Hamburg.* https://germany.arcelormittal.com/Standorte/Langstahl/Hamburg/.

ArcelorMittal Deutschland. 2019. „ArcelorMittal in Deutschland.“ https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/a14/a142ebbb-ab70-2714-2c48-3310c6e088a5,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf.

ArcelorMittal Duisburg. kein Datum. *Über uns - ArcelorMittal Duisburg.* Zugriff am 17. Juli 2024. https://duisburg.arcelormittal.com/Ueber-uns/ArcelorMittal-Duisburg/.

ArcelorMittal Eisenhüttenstadt. kein Datum. *Über uns - Zahlen & Fakten.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://eisenhuettenstadt.arcelormittal.com/Ueber-uns/Zahlen,-Daten,-Fakten/.

ArcelorMittal Hamburg. 2019. *ArcelorMittal beauftragt Midrex mit der Planung einer Demonstrationsanlage für die Wasserstoff-Stahlproduktion in Hamburg.* Hamburg, 16. September. Zugriff am 11. Juni 2024. https://hamburg.arcelormittal.com/icc/arcelor-hamburg-de/med/ae9/ae950d3f-5001-3d61-ca98-3d0632940ec7,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf.

ArcelorMittal Hamburg. kein Datum. *Über uns.* https://hamburg.arcelormittal.com/Ueber-uns/.

Badische Stahlwerke. kein Datum. *bsw-kehl.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://bsw-kehl.de/unternehmen/.

Basma, H., und F. Rodriguez. 2023. „A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe.“ *Working Paper 2023-28.* International Council on Clean Transportation. November.

Biemann, Kirsten, Felix Spathelf, Christoph Heidt, Viviann Bolte, Horst Fehrenbach, ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung, Daniela Kirsch, et al. 2024. *Lokaler, nationaler und internationaler umweltschonender Güterverkehr – Datenbericht zum Transformationsdialog und UBA Forum mobil und nachhaltig.* Umweltbundesamt.

Bloch, A., M. Schönfeld, L. Leicht, und U. Baumann. 2023. *MERCEDES E-ACTROS 600. Dieser Elektro-Lkw soll die Dieseldominanz brechen.* 10. Oktober. Zugriff am 18. Juli 2024. https://www.auto-

motor-und-sport.de/elektroauto/mercedes-e-actros-long-haul-elektro-lkw-fuer-den-fernverkehr-alpen-40-tonnen/.

Blöcker, A. 2022. *"Grüner Stahl" - Wie geht das? Eine Studie im Rahmen des Projekts "Sozial-ökologische Transformation der deutschen Industrie".* Berlin: Rosa-Luxemburg-Stiftung.

BMAS. 2023. *Langfristprojektion des Fachkräftebedarfs in Deutschland, 2021 - 2040. Szenario „Fortschrittliche Arbeitswelt" (Annahmensetzung nach dem Koalitionsvertrag von 2021).* Bundesministerium für Arbeit und Soziales.

BMBF. kein Datum. *P2X: Erneuerbare Energie umwandeln und speichern.* https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/p2x-erneuerbare-energie-umwandeln-und-speichern.html.

BMF. 2000. *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter ("AV").* Bundesministerium der Finanzen, 15. Dezember. Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html.

Boston Metal. 2024. *Green steel solution.* 03. Juni. Zugriff am 11. Juni 2024. https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/.

Buderus Edelstahl. kein Datum. *buderus-steel.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://www.buderus-steel.com/de/unternehmen/wir-ueber-uns/.

Bui, Anh, Logan Pierce, Pierre-Louis Ragon, Arijit Sen, Peter Slowik, und Taylor Waites. 2024. *Charging up America - The growth of United States electric vehicle charging infrastructure jobs.* Washington: The International Council on Clean Transportation.

Bundesagentur für Arbeit. 2024. *Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) (Quartalszahlen). Deutschland. Stichtag: 30. Juni 2023.* 15. Januar.

Bundesagentur für Arbeit. 2024. *Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (SvB) am Arbeitsort.* 22. Mai.

Bundes-Klimaschutzgesetz. 2021. https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/__3.html.

Capgemini. 2021. *Automobilzulieferer: Geschäftsmodelle mit Zukunft.* Mai. Zugriff am 29. Juli 2024. https://www.capgemini.com/de-de/insights/research/automotivesupplier-geschaeftsmodelle-zukunft/.

Cotterman, T., E.R.G. Fuchs, K.S. Whitefoot, und C. Combemale. 2024. „The transition to electrified vehicles: Evaluating the labor demand of manufacturing conventional versus battery electric vehicle powertrains.“ *Energy Policy* 188: 114064.

Daimler Truck. 2024. *Geschäftsbericht 2023.* Geschäftsbericht, Daimler Truck.

Danieli. kein Datum. *Electric Arc Furnaces.* https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/electric-arc-furnace_26_83.htm.

Die Bundesregierung. 2023. *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie - NWS 2023.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Juli.

Dillinger. kein Datum. *dillinger.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://en.dillinger.de/dillinger/company/facts-figures/.

E4tech, Ecorys & Strategic Analysis. 2019. *Study on Value Chain and Manufacturing Competitiveness Analysis for Hydrogen and Fuel Cells Technologies. FCH contract 192. Findings Report.* London: E4tech (UK) Ltd.

EHB. 2024. *The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative.* https://ehb.eu/.

Epec Engineered Technologies. kein Datum. *Prismatic & pouch battery packs.* Zugriff am 18. Juli 2024. https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html.

European Steel Association. 2020. „Where is steel made in Europe?“ Zugriff am 3. Juni 2024. https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/where-is-steel-made-in-europe.

Falck, O., M. Ebnet, J. Koenen, J. Dieler, und J. Wackerbauer. 2017. „Auswirkungen eines Zulassungsverbots für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Bericht im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie e.V. .“ *ifo Forschungberichte* , Juni.

Fleiter, Tobias, Matthias Rehfeldt, Pia Manz, Marius Neuwirth, und Andrea Herbst. 2023. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 -T-45-Szenarien-.* Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Karlsruhe: Fraunhofer ISI. doi:10.24406/publica-fhg-301404.

Fraunhofer ISI et al. 2024. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Vorstellung der neuen BMWK-Langfristszenarien: Orientieurngsszenarien Webinar. Energieangebot.* Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement (TU Berlin), 2. Juli. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Webinar_Energieangebot.pdf.

Gérard, Frank, Luc von Nuffel, Tycho Smit, Jessica Yearwood, Ondřej Černý, Jan Michalski, und Matthias Altmann. 2020. *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National.* Rotterdam: Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.

Gray, Nathan, Richard O'Shea, David Wall, Beatrice Smyth, Piet N.L. Lens, und Jerry D. Murphy. 2022. „Batteries, fuel cells, or engines? A probabilistic economic and environmental assessment of electricity and electrofuels for heavy goods vehicles.“ *Advances in Applied Energy*, 8 Ausg.: 100110. doi:10.1016/j.adapen.2022.100110.

Gray, Nathan, Shane McDonagh, Richard O'SHea, Beatrice Smyth, und Jerry D Murphy. 2021. „Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors.“ *Advances in Applied Energy*, 100008. doi:doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008.

Günther, Dirk, Thomas Voigt, Stephan Schiller, Robert Kludt, David Kuntze, Kevin Hausmann, Jens Langenfeld, et al. 2023. *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2021.* National Inventory reports, Umweltbundesamt.

H2 Mobility. kein Datum. *Hilfcenter.* https://h2-mobility.de/haeufige-fragen/.

Harloff, T., G. Hebermehl, H. Wittich, M. Schönfeld, und L. Leicht. 2023. *Akuzellen-Fertigung in Deutschland und Europa. Northvolt treibt Bau deutscher Gigafactory voran.* 23. Oktober. Zugriff am 18. Juli 2024. https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/batteriezellen-fertigung-deutschland-wo-elektroauto-akkus-entstehen/.

Herrmann, F., W. Beinhauer, D. Borrmann, M. Hertwig, und J. Mack. 2020. *Effects of Electric Mobility and Digitalisation on the Quality and Quantity of Emploment at Volkswagen.* Stuttgart: Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO.

Hüttel, Alexandra, und Judith Lehner. 2024. „Revisiting Investment Costs for Green Steel: Capital Expenditures, Firm Level Impacts, and Policy Implications.“ DIW Berlin, Berlin.

Hüttenwerke Krupp Mannesmann. kein Datum. *hkm.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://www.hkm.de/.

Hyundai. 2022. *Hyundai bringt Wasserstoff-Lkw XCIENT Fuel Cell nach Deutschland.* 2. August. Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/hyundai-bringt-wasserstoff-lkw-xcient-fuel-cell-nach-deutschland.html.

IEA. 2019. „The Future of Hydrogen: Assumptions annex.“

KBA. 2024a. *Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen zum 1. Januar 2024.* Mai.

KBA. 2023a. *Glossar.* Kraftfahrt-Bundesamt.

KBA. 2024b. *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Monatsergebnisse. Dezember 2023. FZ 8.* Kraftfahrt-Bundesamt, Januar.

KBA. 2024c. *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Monatsergebnisse. Juni 2024. FZ 8.* Kraftfahrt-Bundesamt, Juli.

KBA. 2023b. *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen Jahr 2022.* Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt.

KBA. 2023c. *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), Jahr 2022. FZ 26.* Kraftfahrt-Bundesamt, September.

KBA. 2021. *Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Jahr 2020.* Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt.

Küster Simic, André, und Janek Schönfeldt. 2022. *H2-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus.* Hans-Böckler-Stiftung.

Lech-Stahlwerke. kein Datum. *lech-stahlwerke.* Zugriff am 24. Mai 2024. https://www.lech-stahlwerke.de/de/unternehmen.html.

Leicht, L. 2022. *Lkw mit Brennstoffzelle. Wasserstoff-Lkw mit 500 km Reichweite.* 8. Juni. Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/wasserstoff-brennstoffzellen-lkw-500-km-reichweite/.

Leicht, L., und T. Seibt. 2023. *Mercedes GENH2 Truck Brennstoffzellen-Lkw. H2 macht Lkw auf der Langstrecke CO2-neutral.* 3. Mai. Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.auto-motor-und-sport.de/neuheiten/brennstoffzellen-lkw-mercedes-benz-genh2-truck/.

MAN Truck & Bus. a. *Elektro-Lkw von MAN: Willkommen in der Äre der eTrucks.* Zugriff am 18. Juli 2024. https://www.man.eu/de/de/lkw/elektro-lkw/uebersicht.html.

MAN Truck & Bus. b. *MAN.* Zugriff am 26. Juni 2024. https://www.man.eu/corporate/de/ueber-man/strategie/strategie.html.

Mercedes-Benz Trucks. kein Datum. *Mercedes-Benz Werk Wörth.* Zugriff am 26. Juni 2024. https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/brand/plants/plant-woerth/numbers-data-facts.html.

MIDREX. kein Datum. *MIDREX Plants.* Zugriff am 04. Juni 2024. MIDREX Plants.

Mönnig, A., C. Schneemann, E. Weber, G. Zika, und R. Helmrich. 2019. „Electromobility 2035: Economic and labour market effects through the electrification of powertrains in passenger cars.“ *IAB-Discussion Paper.*

Paul Wurth. kein Datum. *Direct Reduction.* Zugriff am 4. Juni 2024. https://www.paulwurth.com/en/technology/direct-reduction/.

Prem, Martin, und Thomas Schmidtutz. 2023. *Merkur.* 13. Juni. Zugriff am 26. Juni 2024. https://www.merkur.de/wirtschaft/man-lkw-bauer-elektro-lkw-alexander-vlaskamp-umbau-stamm-werk-muenchen-zr-91262921.html.

Primetals. kein Datum. *Elektrostahlerzeugung.* Zugriff am 4. Juni 2024. https://www.primetals.com/de/portfolio/stahlerzeugung/elektro-stahlerzeugung.

Prof. Schramm-Klein GmbH. 2024. „Branchenstudie. Tankstellenmarkt 2023. Ausgabe Nr. 2.“

Quantron. b. *QHM FCEV AERO.* Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.quantron.net/en/q-truck/q-heavy/qhm-fcev/.

Quantron. a. *QLI FCEV.* Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.quantron.net/en/q-truck/q-light/qli-fcev/.

Qureshi, Fazil, Mohammad Yusuf, Mohd Arham Khan, Hussameldin Ibrahim, Bernard Chukwuemeka Ekeoma, Hesam Kamyab, Mohammed M. Rahman, Asok Kumar Nadda, und Shreeshivadasan Chelliapan. 2023. „A State-of-The-Art Review on the Latest trends in Hydrogen production, storage, and transportation techniques.“ *Fuel*, 1. Februar: 127574. doi:10.1016/j.fuel.2023.127574.

riva. kein Datum. *rivastahl.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://www.rivastahl.com/de/standorte/hes/unternehmensprofil_und_geschichte.

Salzgitter AG. kein Datum. *SALCOS.* Zugriff am 3. Juni 2024. https://salcos.salzgitter-ag.com/de/mydral.html.

Salzgitter AG. 2022. *Salzgitter AG vergibt ersten Auftrag für SALCOS®-Anlagentechnik.* 24. August. Zugriff am 11. Juni 2024. https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/salzgitter-ag-vergibt-ersten-auftrag-fuer-salcosr-anlagentechnik-20022.html.

Salzgitter AG. 2020. „Unternehmenspräsentation.“

Samadi, Sascha. 2022. *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland.* März. Zugriff am 25. April 2023.

https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/samadi-2022-vergleich-aktueller-klimaschutzszenarien-fuer-deutschland-cr-sci4climatenrw.pdf.

Sarralle. kein Datum. *Electric Arc Furnace (EAF) Blue Efficient Arc.* https://www.sarralle.com/en/sectors/view/electric-arc-furnace.

Schill, W.-P., C.D. Gaete Morales, und J., Heining, F. Jöhrens. 2024. „Klimaschutz im Güterverkehr: Batterieelektrische Antriebe können günstiger mit erneuerbarem Strom versorgt werden als Wasserstoff-Lkw.“ *DIW aktuell*, 24. Juni. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.905778.de/diw_aktuell_94.pdf.

Schlemme, Jannik, Matthias Schimmel, und Christian Achtelik. 2019. „Energiewende in der Industrie Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie.“

SMS Group. kein Datum. *Electric Steelmaking.* Zugriff am 4. Juni 2024. https://www.sms-group.com/de-de/plants/electric-steelmaking.

Stahlinstitut VDEh. a. *Kohlenstoffbasierte Stahlerzeugung.* Zugriff am 11. Juni 2024. https://vdeh.de/stahlherstellung/kohlenstoffbasierte-stahlerzeugung/.

Stahlinstitut VDEh. b. *Wasserstoffbasierte Stahlerzeugung.* Zugriff am 11. Juni 2024. https://vdeh.de/stahlherstellung/wasserstoffbasierte-stahlerzeugung/.

Stahlwerk Thüringen. kein Datum. *stahlwerk-thüringen.* Zugriff am 28. Mai 2024. https://www.stahlwerk-thueringen.de/unternehmen/.

Statistisches Bundesamt. 2024a. *Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warenverzeichnis.*

Statistisches Bundesamt. 2024b. *Produktion im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis.*

Statistisches Bundesamt. 2023. *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Input-Output-Rechnung 2020 (Revision 2019, Stand: September 2022).*

Steel Plantech. kein Datum. *Products.* https://steelplantech.com/en/product/.

SteelWatch. 2023. „Sunsetting Coal in Steel Production.“

Teleroute. 2018. *Vom Diesel- zum Elektrofahrzeug: Der Wandel kommt.* 29. März. https://teleroute.com/de-de/blog/artikel/vom-diesel-zum-elektrofahrzeug-der-wandel-kommt/.

Tenova. a. *Electric Arc Furnaces.* Zugriff am 4. Juni 2024. https://tenova.com/technologies/electric-arc-furnaces-eaf.

Tenova. b. *ENERGIRON.* Zugriff am 4. Juni 2024. https://tenova.com/technologies/energironr.

The Future. 2022. *Zulieferer müssen neue Geschäftsmodelle finden.* 17. Mai. Zugriff am 29. Juli 2024. https://the-future.dai-labor.de/zulieferer-muessen-neue-geschaeftsmodelle-finden%EF%BF%BC/.

thyssenkrupp. a. *Sustainable steel: Review of phase 1 of the injection trials.* Zugriff am 3. Juni 2024. https://www.thyssenkrupp.com/en/stories/sustainability-and-climate-protection/green-steel-review-of-phase-1-of-the-injection-trials.

thyssenkrupp. b. *tkH2Steel®: mit Wasserstoff zur klimaneutralen Stahlproduktion.* Zugriff am 8. August 2024. https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/klimastrategie.html.

thyssenkrupp. c. *Unser Unternehmen im Überblick.* Zugriff am 8. August 2024. https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/.

Transport & Environment. 2021. *How to decarbonise long-haul trucking in Germany - An analysis of available vehicle technologies and their associated costs.* Brüssel: Transport and Environment.

Umweltbundesamt. 2024. *Emissionen des Verkehrs.* 28. März. Zugriff am 13. Juni 2024. https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klima-minderungsziele-der-bundesregierung.

Verband der Automobilindustrie. kein Datum. *VDA.* Zugriff am 17. Juni 2024. https://www.vda.de/de/mitglieder/herstellergruppe-iii.

Verordnung (EU). 2024/1610. *Verordnung (EU) 2024/1610 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Mai 2024 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten.* 14. Mai. Zugriff am 13. Juni 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024R1610.

Volvo Trucks Deutschland. 2023. *Volvo Trucks erhöht die Reichweite der mittelschweren Elektro-Lkw.* 20. Juni. Zugriff am 18. Juli 2024. https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2023/jun/volvo-trucks-erhoeht-die-reichweite-der-mittelschweren-e-lkw.html.

Volvo Trucks Deutschland. 2022. *Volvo Trucks präsentiert seinen neuen emissionsfreien Lkw mit Brennstoffzelle.* 20. Juni. Zugriff am 26. Juli 2024. https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2022/jun/volvo-trucks-praesentiert-neuen-emissionsfreien-lkw-mit-brennstoffzelle.html.

Wietschel, Martin, Patrick Plötz, Elisabeth Dütschke, Felix Neuner, Josephine Tröger, und Till Gnann. 2023. *Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023 .* Karlsruhe: Frauenhofer ISI.

Wirtschaftsvereinigung Stahl. 2023. „Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland.“

Wirtschaftsvereinigung Stahl. 2024. „Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie.“

Anhang A. Beschäftigung in deutschen Stahlwerken

Tabelle A-1: Übersicht über die Stahlwerke

Stahlwerk	Anlagen-typ	Beschäf-tigte, Tsd.	Produk-tion, Mt Stahl	Beschäf-tigte je Mt Stahl, Tsd.	Quelle
ArcelorMittal Hamburg	DRI-EAF	0,5	0,9	0,6	(ArcelorMittal Hamburg kein Datum)
ArcelorMittal Bremen	BF-BOF	3,1	3,6	0,9	(ArcelorMittal Deutschland 2019)
ArcelorMittal Eisenhüttenstadt	BF-BOF	2,7	2,4	1,1	(ArcelorMittal Eisenhüttenstadt kein Datum)
ArcelorMittal Duisburg	BF-BOF	0,9	1	0,9	(ArcelorMittal Duisburg kein Datum)
Dillinger	BF-BOF	3,5	2,3	1,5	(Dillinger kein Datum)
Hüttenwerke Krupp Mannesmann	BF-BOF	3,0	4	0,8	(Hüttenwerke Krupp Mannesmann kein Datum)
Salzgitter AG	BF-BOF	6,2	7	0,9	(Salzgitter AG 2020)
Badische Stahlwerke	EAF	0,9	2	0,4	(Badische Stahlwerke kein Datum)
Brandenburger Stahlwerke	EAF	0,8	0,6	1,3	(riva kein Datum)
Buderus Edelstahl	EAF	1,1	0,3	3,6	(Buderus Edelstahl kein Datum)
Hennigsdorfer Stahlwerke	EAF	0,7	1	0,7	(riva kein Datum)
Lech-Stahlwerke	EAF	0,8	1,1	0,7	(Lech-Stahlwerke kein Datum)
Stahlwerke Thüringen	EAF	0,7	0,9	0,8	(Stahlwerk Thüringen kein Datum)
thyssenkrupp Steel - Unternehmen	-	26,3	11	2,4	(thyssenkrupp c)
ArcelorMittal Deutschland - Unternehmen	-	9,0	8	1,2	(ArcelorMittal Deutschland 2019)
ArcelorMittal Deutschland - Summe der Stahlwerke	-	7,3	8	0,9	s.o.

Anmerkung: Nur Stahlwerke mit verfügbaren Daten zur Beschäftigung und Produktion sind aufgelistet. Bei den öffentlichen Angaben der Stahlwerke werden immer die neusten verfügbaren Daten verwendet. Die Beschäftigung je Mt Stahl wird basierend auf den Produktionsmengen und dem Personalbedarf berechnet.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A-2: Übersicht Beschäftigte je Mt Stahl

	BOF-Route	DRI-EAF-Route	EAF-Route
Gewichteter Mittelwert	959	570	832
Minimum	750	570	425
Maximum	1 533	570	3 633
Zahl der Stahlwerke	5	1	6

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Tabelle A-1.

Anhang B. Input-Output-Analyse

Die Schätzung der volkswirtschaftlichen Effekte der Investitionen in Anlagen zur Stahlerzeugung stützt sich auf das Konzept der Input-Output-Analyse

Das Konzept der Input-Output-Analyse wurde maßgeblich von Wassily Leontief (1906-1999) entwickelt. Ausgangspunkt war das Bestreben, die Volkswirtschaft, insbesondere ihre Produktionsprozesse, in geschlossener Form tabellarisch zu erfassen. Heute ist die Input-Output-Rechnung ein wichtiges Instrument der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, das intersektorale Verflechtungen der Produktionsprozesse abbildet. Grundlage ist die tabellarische Auswertung der über die Unternehmen einer Volkswirtschaft aggregierten Produktionswerte innerhalb eines festen Bezugsjahres. Diese werden untergliedert nach Produktionsbereichen und differenziert nach der Verwendung als Vorleistungsprodukte für wiederum andere Produktionsbereiche oder als Verbrauchs- bzw. Investitionsgüter. Somit lässt sich ersehen, in welcher Höhe jeder der Produktionsbereiche Vorleistungen aus anderen Produktionsbereichen bezieht. Diese Information ermöglicht es, neben Produktionswerten auch die Wertschöpfung der einzelnen Bereiche als Differenz zwischen Produktionswert und bezogenen Vorleistungen zu ermitteln. Darüber hinaus ermöglicht die Kombination mit sektoralen Beschäftigtendaten die Ermittlung von Produktivitätskennzahlen und die Anzahl der mit der Erstellung von bestimmten Gütern und Dienstleistungen verbundenen Arbeitsplätze.

Die vorliegende Analyse beruht auf dem von DIW Econ entwickelten Input-Output-Modell für Deutschland auf Basis der vom Statistischen Bundesamt (2023) veröffentlichten Input-Output-Tabelle mit dem Bezugsjahr 2020. Diese Tabelle gibt für die deutsche Volkswirtschaft die Vorleistungsverflechtungen zwischen 72 Produktionsbereichen an. Die Nutzung der Tabelle aus dem Jahr 2020 impliziert die Annahme, dass die Produktionstechnologien und der Bezug von Vorleistungen aus anderen Bereichen sich nicht signifikant verändert haben. Das heißt, dass beispielsweise ein Bäcker im Jahr 2022 im Wesentlichen Vorleistungen (wie Mehl, Energie, Buchhaltungsdienstleistungen) nach Art und Umfang bezog, wie er es im Jahr 2020 tat.

Der Gesamteffekt wird anhand der direkten und indirekten Einzeleffekte ermittelt:

- Der ***direkte Effekt*** erfasst die unmittelbare Wirkung der Planung, Herstellung und Installation von Stahlerzeugungsanlagen auf die Beschäftigung.
- Der ***indirekte Effekt*** erfasst die Beschäftigungseffekte, die sich aus der Nachfrage der Unternehmen, die solche Anlagen planen, herstellen und installieren, nach Diensten und Zulieferungen ergeben (bspw. durch Ausgaben für Metallerzeugnisse oder Transportleistungen).

Anhang C. Produktverzeichnis Lkw-Herstellung

Tabelle C- 1: Produktverzeichnis für den Beschäftigungsmultiplikator im Schwerlastverkehr

Beschreibung	GP-19-Code	Produktionswert in 2023, Mio. EUR (1)	Produktionsmenge, Tsd. Stück (2)	Beschäftigung (geschätzt) (3)	Beschäftigung je Tsd. Stück (4)	Bezugsjahr (2)-(4) (5)
Diesel-Lkw						
Kolbenverbrennungsmotoren mit Selbstzündung (Diesel- oder Halbdiesel-motoren)	2910 13 000	1.394	524	3.491	6,7	2023
Lkw mit Kolbenverbrennungsmotoren mit Selbstzündung						
mit einem zulässigen Gesamtgewicht von <=5 t	2910 41 100	6.671	199	15.829	80	2022
mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 5-20 t	2910 41 300	1.515[a]	21[d]	4.628	222	2022
mit einem zulässigen Gesamtgewicht von >20 t	2910 41 400	2.091[b]	27	6.624	245	2020
Sattelzugmaschinen	2910 43 000	2.866[b]	41	9.081	223	2020
Zündkabelsätze	2931 10 003	579	26.248[d]	6.909	0,1	2023
Anlasser und Licht-Anlasser	2931 22 300	71	459[d]	850	1,9	2023
Andere Lichtmaschinen	2931 22 500	137[d]	588[d]	1.637	2,8	2023
Teile für elektrische Zündapparate, Anlasser, etc.	2931 30 300	1.395	53.843[d]	16.637	0,3	2023
Schaltgetriebe	2932 30 330	8.843	27.746	36.942	1,3	2023
Auspufftöpfe und Auspuffrohre	2932 30 630	4.083	75.151	17.058	0,2	2023
Schaltkupplungen und Teile dafür	2932 30 650	2.982	20.725[d]	12.456	0,6	2023
Brennstoffbehälter	2932 30 902	534	6.511	2.230	0,3	2023
Stangen, Kolben, Ringe für Kolbenverbrennungsmotoren mit Selbstzündung	2811 42 001	507	15.278[d]	985	1,0	2023
Einspritzungssysteme für Kolbenverbrennungsmotoren mit Selbstzündung	2811 42 005	99	974[d]	192	0,2	2023
Kraftstoff-, Öl- oder Kühlmittelpumpen für Kolbenverbrennungsmotoren	2813 11 650	1.143	39.134	4.079	0,1	2023
Abgasreinigungssysteme	2825 14 450	1.556	6.430	5.131	0,8	2023
Alternative Antriebe						
Lkw mit Elektromotoren						
mit einem zulässigen Gesamtgewicht von <=5 t	2910 42 001	378[a]	16	1.156	74	2022
mit einem zulässigen Gesamtgewicht von >5 t	2910 42 003	-[c]	-[c]	-[c]	-[c]	-[c]
Wechselstrommotoren für den Antrieb von Kraftwagen	2711 25 402	855	438	2.784	6,4	2023
Wechselrichter	2790 41 539	798	1.238	4.623	3,7	2023
Antriebsakkumulatoren	2720 22 001	508	4.799[d]	1.008	0,1[e]	2023
Kreiselpumpen	2813 14 200	36	2.018[d]	129	0,1	2023

Nur BEV						
Akkumulatorenladegeräte	2711 50 900	370	685	1.204	1,8	2023
Nur FCEV						
Brennstoffzellen	2790 42 000	113	200	657	3,3	2023
Brennstoffbehälter	2932 30 902	534	6.511	2.230	0,3	2023
Auspufftöpfe und Auspuffrohre	2932 30 630	4.083	75.151	17.058	0,2	2023

Anmerkungen:

[a] Wert für 2022

[b] Wert für 2020

[c] Zahl geschwärzt für alle Jahre

[d] Geschätzt

[e] Beschäftigungsfaktor je MWh basierend auf Harloff et al. (2023)

Quelle: Statistisches Bundesamt (2024b), Bundesagentur für Arbeit (2024b, 2024a), eigene Berechnungen.