DIW ECON

Das Consulting-Unternehmen des DIW Berlin

Upstream Beschäftigungseffekte der P2X-Produktion

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

15. Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 1
2. Grundlagen der P2X-Technologien ... 2
2.1 Begriffsklärung P2X-Technologien und P2X-Wertschöpfungskette ... 2
2.2 Einsatzgebiete von P2X-Produkten ... 3
2.3 P2X-Technologien ... 4
3. Methodik ... 10
3.1 Investition, Produktionswert und Beschäftigung ... 11
3.2 Sektorale Aufteilung der Investitionen ... 13
3.3 Direkte vs. indirekte Beschäftigungseffekte ... 14
3.4 Input-Output Modell zur Bestimmung der Beschäftigungseffekte ... 15
3.5 Ökonomische und technische Parameter der P2X-Wertschöpfung ... 16
4. Ergebnisse ... 18
4.1 Ergebnisse für Deutschland ... 19
4.2 Quantitative Einordnung ... 21
4.3 Regionale Unterschiede ... 23
4.4 Unsicherheit und Sensitivität ... 26
5. Zusammenfassung ... 29
Literaturverzeichnis ... 31
Anhang A. Input-Output-Analyse ... 36
Anhang B. Technische Annahmen ... 38
Anhang C. Ergebnisse für Deutschland nach Jahren ... 40
Anhang D. Ergebnisse regionales Benchmarking ... 42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: P2X-Technologien 4
Abbildung 2: Wasserstofferzeugungskosten in Abhängigkeit vom Strompreis 6
Abbildung 3: Übersicht Beschäftigungseffekte 11
Abbildung 4: Produktionswert und Wertschöpfung je Erwerbstätigen in ausgewählten Sektoren, Euro 12
Abbildung 5: Beispiel für eine sektorale Aufteilung der Investitionen in eine Windkraftanlage 13
Abbildung 6: Beispielhafter Ausschnitt einer Wertschöpfungskette des Sektors Maschinenbau 15
Abbildung 7: Sektorale Anteile am CAPEX der Anlagen in der P2X-Wertschöpfung 18
Abbildung 8: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen und zeitlichen Vergleich 23
Abbildung 9: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen und zeitlichen Vergleich 25
Abbildung 10: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2020 42
Abbildung 11: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2030 42
Abbildung 12: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2040 43
Abbildung 13: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2020 43
Abbildung 14: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2030 44
Abbildung 15: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2040 44
Abbildung 16: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2020 45
Abbildung 17: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2030 45
Abbildung 18: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2040 46
Abbildung 19: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2020 46

Abbildung 20: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2030 47
Abbildung 21: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2040 47
Abbildung 22: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2020 48
Abbildung 23: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2030 48
Abbildung 24: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2040 49
Abbildung 25: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2020 49
Abbildung 26: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2030 50
Abbildung 27: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2040 50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technoökonomische Parameter der Anlagen in P2X Wertschöpfungsketten 16
Tabelle 2: Volllaststunden der PV- und Windkraftanlagen nach Region 17
Tabelle 3: Annahmen zur Beschäftigung in Betrieb und Wartung der Anlagen entlang der P2X-Wertschöpfungsketten 18
Tabelle 4: Investitionen und Beschäftigungseffekte der P2X-Wertschöpfungsketten – ungewichteter Durchschnitt 2020 - 2040 20
Tabelle 5: Quantitative Bespiele für einen Einsatz von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern 21
Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse, Reduktion des Nutzungsgrades der P2X-Anlagen 28
Tabelle 7: Zuordnung der Bundesländer nach Sonnen- und Windverhältnissen 38
Tabelle 8: Zuordnung der Kreise in ausgewählten Bundesländen nach Windverhältnissen 38
Tabelle 9: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von Wasserstoff 2020 - 2040..... 40
Tabelle 10: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von synthetischem Methan 2020 - 2040 40
Tabelle 11: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von synthetischen Liquids 2020 - 2040 41

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
AEL	Alkalische Elektrolyse
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BF-BOF	Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace, Verfahren der Stahlerzeugung
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BWMi, BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CaO	Brantkalk
$CaCO_3$	Kalk
CAPEX	Kapitalinvestitionen (engl.: capital expenditure)
CCUS	CO_2-Abscheidung, Nutzung und Speicherung (engl.: Carbon Capture, Use and Storage)
CH_3OH	Methanol
CH_4	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DAC	Direct Air Capture, Kohlenstoffabscheidung aus der Umgebungsluft
DEA	Dänische Energieagentur
FTE	Vollzeitäquivalent (engl.: full-time equivalent)
GW	Gigawatt
H_2	Wasserstoff
IEA	Internationale Energieagentur
kg	Kilogramm
kt	Kilotonne
LH_2	Flüssiger Wasserstoff

Mio.	Million
Mol-%	Prozentualer Stoffmengenanteil in Gasen
Mrd.	Milliarde
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
N_2	Stickstoff
NH_3	Ammoniak
OPEX	Betriebskosten (engl.: operational expenditure)
P2X, PtX	Power-to-X, Bezeichnung für die Erzeugung synthetischer Energieträger aus Strom
P2L	Power-to-Liquid, Bezeichnung für die Produktion von flüssigen synthetischen Energieträgern aus Strom
PEM	Proton Exchange Membrane (Elektrolysetyp)
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgase
Tsd.	Tausend
TWh	Terrawattstunde
WZ	Wirtschaftszweig

1. Einleitung

Das Ziel der Dekarbonisierung Deutschlands bis 2045 erfordert eine umfangreiche Transformation des Energiesystems, sowohl im Angebot (Upstream[1]), der Distribution und Speicherung (Midstream) als auch in den Anwendungen auf Nachfrageseite (Downstream). In der klimaneutralen Zukunft werden bisher genutzte fossile Primärenergieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl nicht weiter als Energiequellen zur Verfügung stehen können. Hierfür sind Alternativen zu finden, und gegenwärtig herrschen Ambiguitäten hinsichtlich der genauen Verhältnisse zwischen den ‚neuen' Energieträgern vor. Trotzdem ist weitgehend klar, dass zukünftig (a) Strom und Wärme aus erneuerbaren Quellen, (b) biogene Brennstoffe sowie (c) Wasserstoff und (d) aus Wasserstoff erzeugte synthetische Energieträger (e-Fuels) das Angebot an Endenergie bestimmen werden (vgl. hierzu u.a. Sensfuß et al. (2022) oder Kopernikus-Projekt Ariadne (2021)). Wasserstoff und seine Derivate können jedoch nur dann als Klimaneutral angesehen werden, wenn sie ohne den Ausstoß der Treibhausgase in die Atmosphäre hergestellt werden, zum Beispiel durch Nutzung von erneuerbarem Strom für Herstellung der Gase (Wasserstoff, synthetisches Methan), Chemikalien oder flüssigen Kraftstoffe. Für diese unterschiedlichen Prozesse wird der Sammelbegriff Power-to-X, oder auch P2X oder PtX, verwendet (BMBF kein Datum).

Mit der erforderlichen Transformation werden technische und strukturelle Veränderungen in bekannten Wertschöpfungsketten einhergehen, die auch ökonomische Effekte hervorrufen, denn sie führen zu Bedarfen an Investitionen und Nachfrage nach Beschäftigung. Die Nachfrage nach Beschäftigung bedeutet einerseits Chancen, lokale Wirtschaft zu stärken und den negativen Trends wie Arbeitsplatzverluste im Zuge der Digitalisierung und Dekarbonisierung entgegenzuwirken. Andererseits gehören die entsprechenden Berufe wie „Energietechnik" oder „Elektrotechnik" zu Berufsgruppen mit zunehmenden Fachkräfteengpässen (BMAS 2022). Werden ungenügend Fachkräfte gesichert, kann der Ausbau der heimischen P2X-Produktion nicht voranschreiten.

Der hier vorliegende Bericht fokussiert auf die Frage, welche Beschäftigungswirkungen durch den Aufbau und Betrieb der Infrastrukturen zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern – entlang von Upstream P2X-Wertschöpfungsketten – in Deutschland zu erwarten sind. Die Studie wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „Wasserstoffatlas Deutschland", Teilprojekt Power2Jobs, durch die DIW Econ GmbH erstellt. Die Studienergebnisse sind in den online nutzbaren Wasserstoffatlas Deutschland eingeflossen.[2] Der Fokus der Untersuchung liegt auf drei möglichen P2X-

[1] Die Bezeichnungen Up-, Mid- und Downstream sind für den Energiesektor gebräuchliche Unterscheidungen zwischen Ebenen der Wertschöpfungsstufen (vgl. u.a. (Energy HQ 2019)).
[2] https://wasserstoffatlas.de/

Wertschöpfungsketten: (1) der Erzeugung von ('grünem') Wasserstoff aus erneuerbarem Strom, (2) der Erzeugung von synthetischem Methan aus grünem Wasserstoff sowie (3) der Erzeugung synthetischer flüssiger Energieträger aus grünem Wasserstoff.

Die zur Bestimmung der Investitions- und Beschäftigungswirkung berücksichtigte P2X-Wertschöpfung umfasst die Produktion und Installation aller notwendigen technischen Anlagen von der (erneuerbaren) Stromerzeugung über Wasserstoffproduktion bis zur Umwandlung in das jeweilige P2X-Endprodukt. Weiterhin wird die resultierende Beschäftigung aus Betrieb und Wartung dieser Anlagen bestimmt. Dabei werden die Brutto-Effekte bestimmt, also nicht berücksichtigt, welche Beschäftigung eventuell in den gleichen Sektoren durch Transformationsprozesse entfällt. Nach einer Übersicht über die relevanten P2X-Technologien folgt in Abschnitt 3 eine Erläuterung der angewendeten Methodik, während die Ergebnisse in Abschnitt 4 vorgestellt und eingeordnet werden.

2. Grundlagen der P2X-Technologien

2.1 Begriffsklärung P2X-Technologien und P2X-Wertschöpfungskette

Power-to-X, kurz PtX oder P2X, beschreibt Technologien zur Herstellung gasförmiger oder flüssiger, stofflicher Energieträger unter zu Hilfenahme von (erneuerbarem) Strom (BMBF kein Datum). Hierzu zählen die beiden Gase Wasserstoff (H_2) und synthetisches Methan (CH_4) sowie die flüssigen synthetischen Energieträger Methanol (CH_3OH), Ammoniak (NH_3) und synthetische Ottokraftstoff, Diesel und Kerosin. Diese können allerdings nur dann als klimaneutral angesehen werden, wenn sowohl die Energieträger als auch der für deren Erzeugung eingesetzter Strom ohne THG-Ausstoß produziert werden. Daher werden in der vorliegenden Analyse nur solche P2X-Technologien berücksichtigt, die auf einer Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse aus regenerativ erzeugtem Strom aufbauen.[3] Zur Erzeugung gasförmiger sowie flüssiger synthetischer Energieträger auf Wasserstoffbasis werden unterschiedliche Technologien eingesetzt, die in Abschnitt 2.3 kurz erläutert werden.

Upstream P2X-Wertschöpfungsketten umfassen in dieser Analyse die Produktion von Kapital- und Verbrauchsgütern sowie die Erbringung von Dienstleistungen, die direkt mit der Produktion von Wasserstoff oder anderen P2X-Energieträgern verbunden sind oder ihr vorgelagert sind. Dies umfasst die Wirtschaftszweige, die an der Herstellung und Installation der in der jeweiligen P2X-Wertschöpfungskette eingesetzten Anlagen (wie z.B. PV-Analgen und Elektrolyseure) beteiligt sind, wie z.B. den

[3] In anderen Worten, Wasserstofferzeugung aus Erdgas oder Kohle sowie Elektrolyse mit Strom aus fossilen Energiequellen werden nicht berücksichtigt.

Maschinenbau (WZ 28) oder die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27). Darüber hinaus wird auch die Beschäftigung in der Betriebsphase – der Erzeugung von Strom, Wasserstoff und synthetischen Energieträgern – berücksichtigt, die üblicherweise dem Energiesektor (WZ 35) oder der chemischen Industrie (WZ 20) zugeordnet wird.

2.2 Einsatzgebiete von P2X-Produkten

P2X-Energieträger stellen mögliche Substitute (Ersatzprodukte) für fossile Energieträger dar und können so in einer Reihe von Sektoren in verschiedenen Anwendungsbereichen genutzt werden. Bei Wasserstoff ist grundsätzlich eine energetische von einer nicht-energetischen Nutzung zu unterscheiden.

Wasserstoff kann energetisch durch Oxidation (durch thermische Verbrennung oder in Brennstoffzellen) Verwendung finden. In Verbrennungsprozessen wird der Wasserstoff in Wärme und ggf. weiter in Bewegungsenergie (in Motoren und Generatoren) umgewandelt. Ein möglicher thermischer Einsatz für Wasserstoff besteht in technischen Prozessen, die hohe Temperaturen erfordern, aber prinzipiell auch in Niedertemperaturprozessen wie u.a. in der Nahrungsmittelindustrie oder der Raumwärmeerzeugung in Gebäuden. Bei der energetischen Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle erfolgt die Stromerzeugung durch die chemische Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff – ein umgekehrter Prozess zur Elektrolyse. Der so entstehende Strom kann dann z.B. in Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Weiterhin kann Wasserstoff als saisonaler Speicher genutzt werden und bei Bedarf sowohl durch Verbrennung in Gaskraftwerken als auch durch Nutzung in Brennstoffzellen in Strom zurückgeführt werden.

Nicht-energetisch ist Wasserstoff bereits heute Grundstoff in der chemischen Industrie u.a. zur Produktion von Stickstoffdünger. In der Stahlproduktion wird Wasserstoff zukünftig als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Hier wird Wasserstoff Kohlenstoff (Kokskohle) ersetzen, die benötigt wird, um den im Eisenerz enthaltenen Sauerstoff zu binden und so Roheisen zu erzeugen.

Aus Wasserstoff erzeugte synthetische Energieträger – flüssige und gasförmige – können prinzipiell äquivalent zu fossilen Substituten eingesetzt werden. Synthetische Ottokraftstoffe, Diesel und Kerosin stellen Alternativen zu fossilen Treibstoffen dar und werden zukünftig dort zum Einsatz kommen können, wo eine Elektrifizierung von Antrieben technisch oder ökonomisch schwierig umzusetzen ist, wie z.B. im Flug- und Schiffsverkehr und ggf. im Schwerlastverkehr.

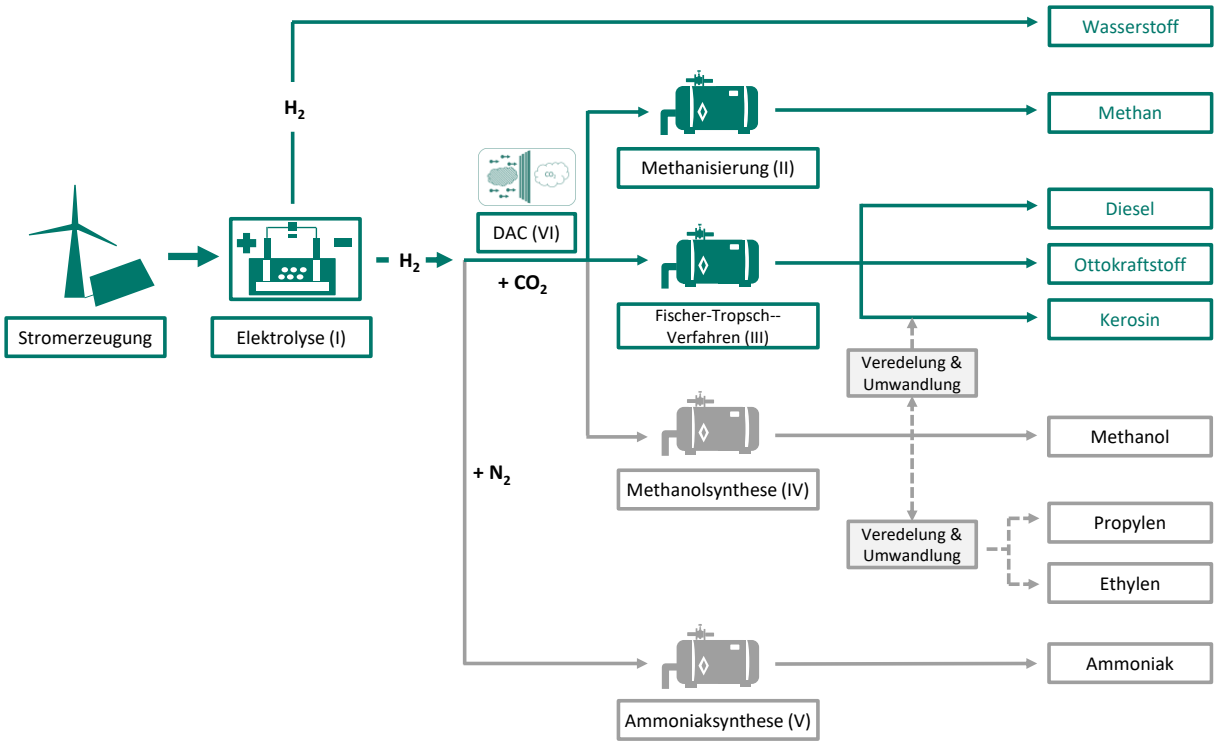
Methanol, Ammoniak sowie die Olefine Propylen und Ethylen werden in der chemischen Industrie eingesetzt und können dort Produkte aus Erdgas und Erdöl ersetzten. Methanol und Ammoniak können

zusätzlich in der chemischen Industrie genutzt werden, um Wasserstoff in gebundener Form in Schiffen und LKWs zu transportieren und zu speichern.

2.3 P2X-Technologien

Grundlage der in dieser Analyse betrachteten P2X-Technologien ist Wasserstoff, der über Elektrolyse durch regenerativen Strom erzeugt wird. Wird Wasserstoff in synthetische Energieträger weiterverarbeitet, erfolgt dies durch Methanisierung, das Fischer-Tropsch-Verfahren, die Methanolsynthese oder die Ammoniaksynthese (vgl. Abbildung 1). Im Folgenden werden diese Verfahren kurz erläutert. In Abschnitt 3 und 4 werden die Elektrolyse, die Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu synthetischem Methan über die Methanisierung sowie die Weiterverarbeitung zu flüssigen synthetischen Energieträgern – Power-to-Liquids (P2L) – über das Fischer-Tropsch-Verfahren weiter hinsichtlich ihrer Beschäftigungswirkungen analysiert (vgl. grün markierte Pfade in Abbildung 1).

Abbildung 1: P2X-Technologien



Anmerkung: Die in dieser Studie analysierten Pfade sind grün markiert, die nicht berücksichtigten Pfade – grau.
Quelle: DIW Econ nach DENA (2018).

Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse (I)

Bei der (Wasser-)Elektrolyse wird durch Anlegen einer Stromquelle Wasser in seine chemischen Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Neben weiteren sind drei Elektrolyseverfahren von Bedeutung:

Alkalische Elektrolyse (AEL): In der alkalischen Elektrolyse wird Wasser mit Hilfe eines alkalischen Elektrolyten (meistens Kaliumhydroxid) und Strom in Wasserstoff (entsteht an der Kathode) und Sauerstoff (entsteht an der Anode) aufgespalten. Diese Methode ist bewährt und wird in der Industrie weltweit eingesetzt. Ihre Effizienz liegt bei ca. 65 % und es kann eine Lebensdauer bis zu 90.000 Betriebsstunden (ca. 10 Jahre) erreicht werden. Der Leistungsbereich der Anlagen liegt bei bis zu 130 MW (DiLiCo 2023).

Proton Exchange Membrane (PEM) Elektrolyse: Die PEM-Elektrolyse ist eine relativ neue Technologie im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse (BDEW 2020). Bei der PEM-Elektrolyse wird Wasser durch eine Polymer-Elektrolyt-Membran geleitet, die den Wasserstoff und den Sauerstoff voneinander trennt. Je nach Anlagenkonfiguration kann das Verfahren bereits heute effizienter als die alkalische Elektrolyse betreiben werden (BDEW 2020). Entscheidend ist vor allem, dass PEM-Elektrolyseure innerhalb weniger Sekunden starten und ihre Leistung anpassen können. Damit sind sie gut für die Aufnahme des fluktuierenden erneuerbaren Stroms geeignet. Gegenwärtig liegt der Leistungsbereich der Anlagen jedoch bei gegenüber AEL relativ bescheidenen 6 MW (DiLiCo 2023).

Hochtemperatur-Elektrolyse: Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse wird Wasser bei Temperaturen zwischen 700 °C und 1.000 °C gespalten. Dieses Verfahren benötigt weniger Strom als die anderen beiden Verfahren und ist daher effizienter, wenn eine externe Wärmequelle zur Verfügung steht. Unter Verwendung von Abwärme aus der Stahlproduktion der Salzgitter AG wurde z.B. ein Wirkungsgrad von 84 % erreicht (Edisom 2022). Diese Art der Elektrolyse steht am Übergang von der Forschung hin zu einer industriellen Anwendung. Der bisherige Leistungsbereich ist damit noch gering und die Lebensdauer der Anlagen ist mit 20.000 Stunden begrenzt (EMCEL 2021). Ein Massenmarkt für diese Form der Elektrolyseure gibt es noch nicht, was zu hohen Fertigungskosten führt.

Die durchschnittliche Effizienz von verschiedenen Elektrolyseurtypen liegt bei ca. 70 %. Das bedeutet, dass rund 30 % des eingesetzten Stroms energetisch in Form von Wärme verloren gehen und nicht als Wasserstoff zur Verfügung stehen.

Elektrolyseure können zentral und dezentral betrieben werden und dabei entweder mit dem Stromnetz verbunden sein oder an eigens für die Wasserstofferzeugung installierten Stromerzeugungsanlagen angeschlossen werden. Die Kosten der Wasserstofferzeugung werden im Wesentlichen durch die spezifischen Anlagenkosten der Elektrolyseure und die Kosten für den genutzten Strom bestimmt und liegen derzeit deutlich über den Kosten der „traditionellen“ Wasserstofferzeugung aus fossilen Quellen. Laut Solarenergie.de (2022) liegen die Kosten für aus Solarstrom erzeugtem Wasserstoff bei ca. 6 Euro/kg (bzw. 180 Euro/MWh), während die Kosten bei Nutzung von Windstrom bei nur 4 Euro/kg lägen. Grund hierfür sind Unterschiede in der zeitlichen Verfügbarkeit, wobei regional in Zeiten hohen

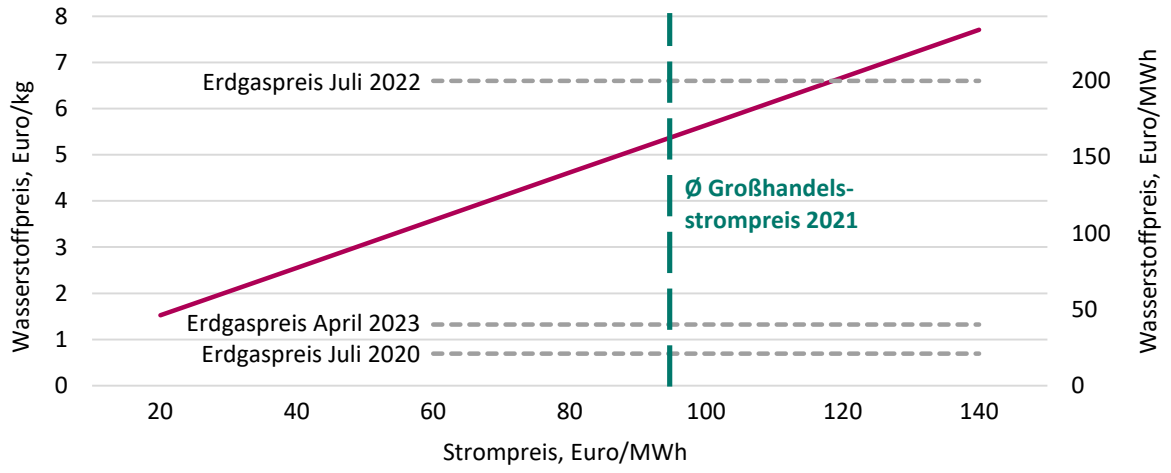
Angebots an erneuerbarer Energie Kosten von 2,5 Euro/kg möglich werden. Im Vergleich hierzu liegen die Preise für blauen Wasserstoff (über Reformationsverfahren aus Erdgas gewonnen) bei nur 1,6 bis 2,5 Euro/kg. Die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff und damit die Skalierung der Erzeugung sowie entsprechende Investitions- und Beschäftigungsbedarfe hängen damit stark von der Entwicklung der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten in Europa ab (vgl. Box 1).

Box 1: Auswirkungen des Strompreises auf Wasserstoffkosten

Die Auswirkungen des Preises für erneuerbaren Strom sind in Abbildung 2 dargestellt. Während mit Stromkosten von 20 Euro/MWh ein Wasserstoffpreis von unter 50 Euro/MWh zu erzielen ist, steigt der Preis mit den Stromkosten linear an.[4] Mit einem durchschnittlichen Großhandelsstrompreis von ca. 97 Euro/MWh in 2021 (Bundesnetzagentur 2022) würde ein (ebenfalls durchschnittlicher) Wasserstoffpreis von mindestens 166 Euro/MWh resultieren. Wie Abbildung 2 zeigt, liegt dieser Preis weit über den Erdgasimportpreisen für 2020 und 2023 in der EU und ist damit nicht wettbewerbsfähig.

Zukünftig wird der Preis für grünen Wasserstoff also maßgeblich vom Angebot und Preis an erneuerbaren Strom abhängen und somit durch die Ausbaugeschwindigkeit der Wind- und Solarkapazitäten in Europa mitbestimmt sein.

Abbildung 2: Wasserstofferzeugungskosten in Abhängigkeit vom Strompreis



Quelle: DIW Econ basierend auf eigenen Berechnungen und Trading Economics (2023).

Eine Speicherung von Wasserstoff kann oberirdisch stationär oder mobil sowie unterirdisch erfolgen (TÜV Nord kein Datum). Dabei hängt die Wahl der Speicherung von den zu speichernden Mengen, der weiteren Nutzung, dem Einsatzort und der geplanten Speicherdauer ab. Oberirdisch wird Wasserstoff unter hohem Druck (bis zu 1.000 bar) und als flüssiger Wasserstoff (LH_2) bei Temperaturen von -253 °C in großen Behältern mit leistungsfähigen Isolierungen gespeichert. Wird Wasserstoff gasförmig gespeichert, so erfolgt auch das unter hohem Druck in zylindrischen Behältern aus Stahl. Für eine unterirdische Speicherung können Hohlräume von Salzstöcken, poröses Gestein in ehemaligen Gas- und

[4] Basierend auf den in Tabelle 1 für das Jahr 2020 angenommenen Parametern der Elektrolyse, einem Kapitalzins von 7 % und einer Nutzungsdauer der Elektrolyseure von 10 Jahren.

Öllagerstätten, sowie wasserführende Aquifere genutzt werden (TÜV Nord kein Datum). Die Speichervolumen solcher Lagerstätten sind umfangreicher als die oberirdischen Speicher und haben geringere Anforderungen an Druck und Temperatur. Sie eignen sich daher für die saisonale Speicherung von Strom in Form von Wasserstoff.

Methanisierung (II)

Bei der Methanisierung (auch Sabatier-Prozess oder die Sabatier-Reaktion nach dem französischen Chemiker Paul Sabatier benannt[5]) wird dem aus Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff Kohlenstoffdioxid (CO_2) zugeführt. Aus jeweils vier Wasserstoffmolekülen und einem Kohlenstoffdioxidmolekül resultiert ein Methanmolekül (CH_4) sowie Wasser. Die Reaktion ist exotherm, was einen Verlust der im Wasserstoff enthaltenen Energie bedeutet. Die Effizienz der Methanisierung liegt so bei ca. 80 % (RP-Energie-Lexikon 2023), wobei eine Nutzung der Abwärme möglich ist. Technisch können verschiedene Verfahren der Methanisierung zum Einsatz kommen. Karlsruher Institut für Technik (KIT) unterscheidet die „Wabenmethanisierung“ und die „Dreiphasen-Methanisierung“, die sich in der Wahl der Katalysatoren unterscheiden. Beide Verfahren laufen in Anlagen ab, die in Standard-Containern verbaut werden können. Synthetisch erzeugtes Methan ist verarbeitetem Erdgas weitgehend äquivalent. Für das in München in 2020 verteilte Erdgas lag der Methangehalt z.B. im Jahresschnitt bei 95,9 Mol-% (SWM 2021). Damit stellen synthetisches Methan und Erdgas technisch dasselbe Gut dar. Die Bereitstellung des erforderlichen CO_2 kann über unterschiedliche Wege erfolgen und wird im Abschnitt Direct Air Capture (DAC) unten beschrieben.

Power-to-Liquids (P2L) über das Fischer-Tropsch-Verfahren (III)

Das Fischer-Tropsch-Verfahren ist ein vor bereits ca. 100 Jahren entwickeltes Verfahren zur Erzeugung flüssiger und gasförmiger Kohlenwasserstoffe, synthetischer Öle und Rohstoffe für die chemische Industrie aus einem Synthesegas. Synthesegas ist eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (CO) und lässt sich aus kohlenstoffreichen Rohstoffen wie Kohle, Erdgas oder Biomasse erzeugen (Max-Plank-Gesellschaft 2017). Das Fischer-Tropsch-Verfahren erzeugt eine Reihe von Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Kettenlänge, und das Reaktionsprodukt enthält neben Gasen (Propan und Butan) 50 % Ottokraftstoff, 28 % Kerosin, 6 % Weichparaffin und 2 % Hartparaffine (Chemie Schule 2023). Im gewissen Maße lässt sich die Zielproduktzusammensetzung über Prozessparameter wie Temperatur, Verweilzeit, Druck und Synthesegaszusammensetzung (H_2/CO-Verhältnis) sowie den Katalysatoreinsatz steuern (Wiley Online Library 2019).

[5] Sabatier sowie Jean Baptiste Senderens entwickelten 1902 die katalytische Umwandlung von CO_2 und H_2 in CH_4. Sabatier erhielt hierfür den Nobelpreis (Cosmos 2023).

Während dieses Verfahren vor allem ökonomische Bedeutung für die Herstellung von flüssigen Kraftstoffen in Ländern ohne eigene Erdöl- und Erdgasvorkommen aber mit eigenen Kohlevorkommen hatte, wird es zukünftig für die Produktion der Kraftstoffe direkt aus Wasserstoff interessant. Auf Grund verfahrenstechnischer Erfordernisse im Katalysatoreinsatz haben sich sehr große Reaktorkolonnen und Fischer-Tropsch-Anlagen mit Kapazitäten bis zu 120.000 Barrel pro Tag durchgesetzt. Diese Größe, so Wiley Online Library (2019), wird im Betrieb mit erneuerbar erzeugtem Wasserstoff nicht realistisch einsetzbar sein, da es einer installierten Leistung von 15 GW erneuerbaren Stroms (oder über 1000 Offshore-Windrädern[6]) an der Elektrolyse entspräche. Zukünftig werden modulare und damit in ihrer Größe skalierbare Anlagen (mikrostrukturierte Reaktoren) zum Einsatz kommen müssen, die dezentral betrieben werden können.

Methanolsynthese (IV)

Methanol (CH_3OH) ist der in seiner ökonomischen Bedeutung wichtigste Alkohol, der als Basischemikalie für die Erzeugung organischer Stoffe wie z. B. der Grundstoff Formaldehyd, Essigsäure oder Kunststoffe benötigt wird oder als Lösungsmittel für Lacke und Farben sowie als Kraftstoff(-zusatz) Verwendung findet. Über Methanol in flüssiger Form ließe sich Wasserstoff auch wesentlich einfacher lagern und speichern. Dabei kann Methanol etwa dreimal so viel „Wasserstoff-Energie“ im Vergleich zu komprimiertem Wasserstoff (700 bar) bei gleichem Tankvolumen speichern (Cleanthinking.de 2020).

Gegenwärtig wird Methanol aus Synthesegas erzeugt. Ziel ist es, zukünftige Methanolproduktion auf Basis von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und CO_2 einzusetzen, wobei das CO_2 über Direct Air Capture (siehe unten) erzeugt wird (Solarenergie Förderverein 2007).

Ammoniaksynthese (V)

Ammoniak (NH_3) hat eine sehr große wirtschaftliche Bedeutung als Ausgangsstoff für stickstoffhaltige Produkte, insbesondere Düngemittel. Die Ammoniaksynthese erfolgt nach dem Haber-Bosch-Verfahren, das bereits vor mehr als 100 Jahren entwickelt wurde und damals die großtechnische und kostengünstige Umwandlung von Luftstickstoff zu Ammoniak unter Zugabe von Wasserstoff ermöglichte (Umweltbundesamt kein Datum).

Noch heute dominiert das Haber-Bosch-Verfahren die Stickstoffproduktion in Deutschland und weltweit. Ammoniak ist heute aber nicht nur als stickstoffhaltiger Grundstoff interessant, sondern auch als mögliches Bindemittel für Wasserstoff, um Wasserstoff kostengünstig und mit etablierten Technologien über längere Land- und Wasserwege zu transportieren oder Wasserstoff zu speichern. Darüber

[6] Laut EnBW (2023) hat ein durchschnittliches Offshore-Windrad eine Nennleistung von bis zu 15 MW.

hinaus kann Ammoniak potentiell als Schiffstreibstoff eingesetzt werden, allerdings ist eine solche Anwendung noch mit erheblichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken verbunden (NABU 2021).

Bereitstellung von CO_2 über Direct Air Capture (DAC, VI)

Für die Erzeugung synthetischer Energieträger aus Wasserstoff ist CO_2 erforderlich. Es stehen unterschiedliche Quellen zur Verfügung, wobei deren Relevanz entscheidend von den Emissionsminderungszielen abhängt. Im Folgenden werden einige Beispiele vorgestellt:

- **Stationäre Verbrennungsprozesse fossiler Energieträger**: bei stationären Verbrennungsprozessen kann CO_2 mittels Abscheidungstechnologien (engl. carbon capture, use and storage – CCUS) größtenteils jedoch nicht komplett abgefangen werden. Unter anderem weil der THG-Ausstoß dadurch nicht komplett verhindert wird, gilt es die stationäre Verbrennung fossiler Energieträger bis zur Mitte des Jahrhunderts vollständig zu überwinden, so dass sie als CO_2-Quelle nicht langfristig zur Verfügung stehen.
- **Stationäre Verbrennungsprozesse regenerativer Energieträger**: hierzu zählt die Verbrennung von Biogas und biogenen Feststoffen zur Strom- und Wärmeerzeugung. Das in diesen enthaltene CO_2 entstammt der natürlichen Umwelt und wurde über Fotosynthese zuvor in Pflanzen gebunden, bevor es seinen Weg in die energetische Verwertungskette fand. Diese CO_2-Quelle wird langfristig zur Verfügung stehen können, allerdings sind die Mengen auf nachhaltige Nutzung der Biomasse begrenzt.
- **Stationäre Verbrennungsprozesse aus synthetischen Energieträgern**: hier würde eine Schließung eines Kreislaufes der CO_2-Entnahme und Nutzung erfolgen. CO_2 würde (einmalig) aus einer exogenen Quelle wie der Luft entnommen werden müssen, in der Produktion synthetischer Energieträger Verwendung finden und dann fortlaufend bei der thermischen Verwendung dieser – z.B. in Rückverstromung oder Wärmeerzeugung – neu anfallen und mit CCUS abgeschieden werden. Der Kreislauf ist jedoch insofern nicht perfekt, als CCUS – wie oben beschrieben – nicht alle THG-Emissionen absorbieren kann. Eine gewisse Menge an CO_2 muss daher immer wieder aus einer exogenen Quelle zugeführt werden.
- **Metallerzeugung und Zementproduktion**: bei beiden Verfahren entsteht CO_2 aus nicht-energetischen Prozessen. Bei der Metallerzeugung wird CO_2 freigesetzt, wenn Kohlenstoff zur Bindung von Sauerstoff in Metallerzen verwendet wird. Mittel- bis langfristig werden die Verfahren zur Erzreduktion auf dekarbonisierte Lösungen umgestellt werden, sodass diese CO_2-Quelle für eine Produktion synthetischer Energieträger nicht mehr zur Verfügung stehen

wird.[7] Bei der Zementherstellung werden große Mengen CO_2 bei der Produktion von Brantkalk (CaO) aus Kalk ($CaCO_3$) frei. Weltweit resultieren hieraus jährlich 2,7 Mrd. Tonnen CO_2, wobei neue Produktionsverfahren angestrebt werden, um den Ausstoß signifikant zu reduzieren (Johannes Gutenberg-Universität Mainz 2021).

- **Direct Air Capture (DAC)**: Bei diesem Verfahren wird CO_2 direkt aus der Luft entzogen. Umgebungsluft wird über ein Bindemittel (Filter) geleitet und anschließend verflüssigt. Um Filter wiederverwerten zu können, müssen diese bei Temperaturen von 80-800 °C regeneriert werden, was einen hohen Energieeinsatz voraussetzt. Derzeit gibt es weltweit nur 27 Anlagen, meist mit geringen Kapazitäten, mit einer Gesamtkapazität von 10 kt CO_2 pro Jahr. Etwa 130 größere Anlagen (über 1 kt CO_2 pro Jahr) befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, meist jedoch noch in der Konzeptionsphase oder in Machbarkeitsstudien (IEA 2024).

Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist ein drastischer Ausbau der DAC-Kapazitäten erforderlich, wenn man bedenkt, dass allein für eine Dekarbonisierung des deutschen Flugverkehrs mit einem Kerosinverbrauch von ca. 10 Mrd. Tonnen (TAZ 2023) bzw. 110 TWh jährlich 23 Mio. Tonnen CO_2 benötigt würden.[8]

3. Methodik

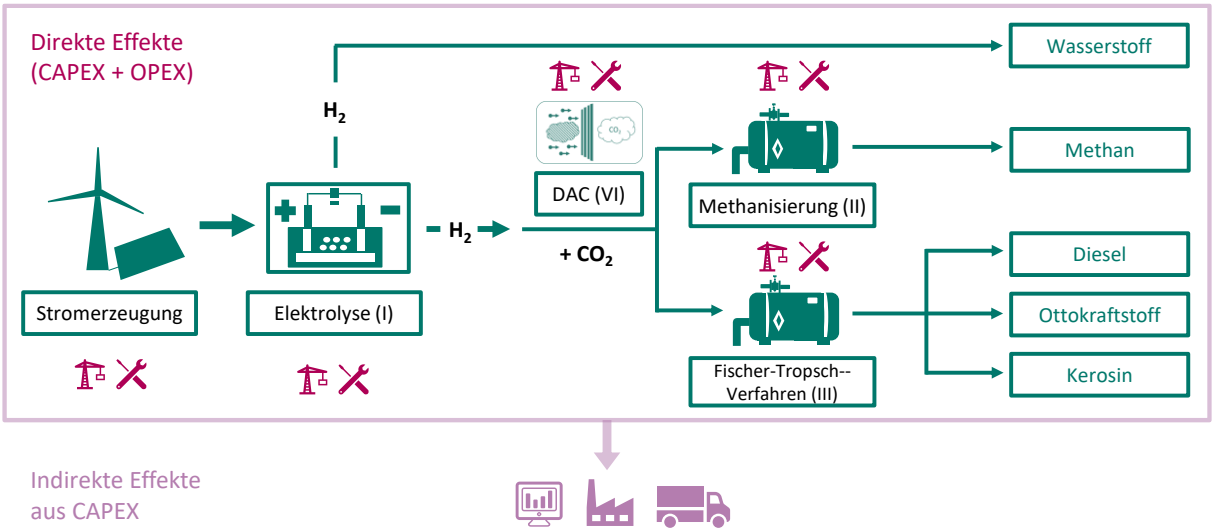
Unser Interesse gilt den möglichen Beschäftigungseffekten in Deutschland, die sich aus der inländischen Produktion von Wasserstoff bzw. synthetischen Energieträgern auf dessen Basis ergeben können. Die Upstream-Beschäftigungseffekte in den wesentlichen P2X-Technologiepfaden umfassen alle Beschäftigungseffekte, die aus der Herstellung, Installation („CAPEX"-Phase[9]) und dem Betrieb („OPEX"-Phase) der für die Produktion von erneuerbarem Strom, Wasserstoff daraus bzw. synthetischen Energieträgern benötigten Maschinen und Anlagen resultieren (vgl. Abbildung 3). Auch die sogenannten indirekten Effekte werden ermittelt, die sich aus den in der CAPEX-Phase ausgelösten Vorleistungen ergeben (s. auch Abschnitt 3.3). Nicht berücksichtigt werden Beschäftigungseffekte aus der Speicherung und Transport der Energieträger (Midstream) sowie aus deren Nutzung in den Sektoren Verkehr und Industrie (Downstream).

[7] Zum Beispiel bei der Stahlerzeugung gibt es bereits ein Verfahren der Direktreduktion (DRI), das zukünftig durch Umstellung auf Wasserstoff komplett ohne Prozessemissionen von CO_2 stattfinden kann. In Aluminiumerzeugung werden die ersten Projekte angestoßen, die auf kohlenstoffhaltige Anoden verzichten und so die Prozessemissionen vermeiden (Rio Tinto 2022).

[8] Dass es in Zukunft auch Flugzeuge mit Wasserstoff- oder Batterieantrieb geben könnte, ist hier noch nicht berücksichtigt.

[9] Vom Englischen CAPital EXpenditure, während in der Betriebsphase „OPEX" für OPerational EXpenditure steht.

Abbildung 3: Übersicht Beschäftigungseffekte



Quelle: DIW Econ.

Im Folgenden wird zunächst die grundlegende Methodik zur Ermittlung der Beschäftigungseffekte aus der Produktion und Installation von P2X-Technologien beschrieben. In Abschnitt 3.1 wird erläutert, wie das sektorale Verhältnis von Beschäftigung zu Produktionswert verwendet wird, um die Beschäftigung aus den Investitionswerten zu ermitteln. In Abschnitt 3.2 wird dann gezeigt, wie der Investitionswert der Anlagen technologiespezifisch auf die einzelnen Wirtschaftssektoren aufgeteilt wird, um Heterogenitäten in den Faktorproduktivitäten berücksichtigen zu können. In Abschnitt 3.3 wird die Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Beschäftigungseffekten erläutert, die mit Hilfe des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Input-Output-Modell ermittelt werden können. Abschließend werden in Abschnitt 3.5 alle relevanten technischen und ökonomischen Parameter der Berechnungen erläutert.

3.1 Investition, Produktionswert und Beschäftigung

Da keine expliziten Daten über den tatsächlichen Arbeitseinsatz bei der Produktion der Anlagen entlang der P2X-Wertschöpfungskette vorliegen, wird der Beschäftigungsbedarf auf sektoraler Ebene der Kapitalgüterproduktion mit Hilfe von Investitionswerten abgeschätzt.[10]

Grundsätzlich wird für die Produktion von Gütern neben Maschinen und Vorprodukten auch Arbeit eingesetzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der für die Produktion einer Anlage erforderliche Arbeitseinsatz und die Produktionskosten bzw. der Anschaffungspreis (Investition oder CAPEX) dieser Anlage in einem festen (funktionalen) Zusammenhang stehen.

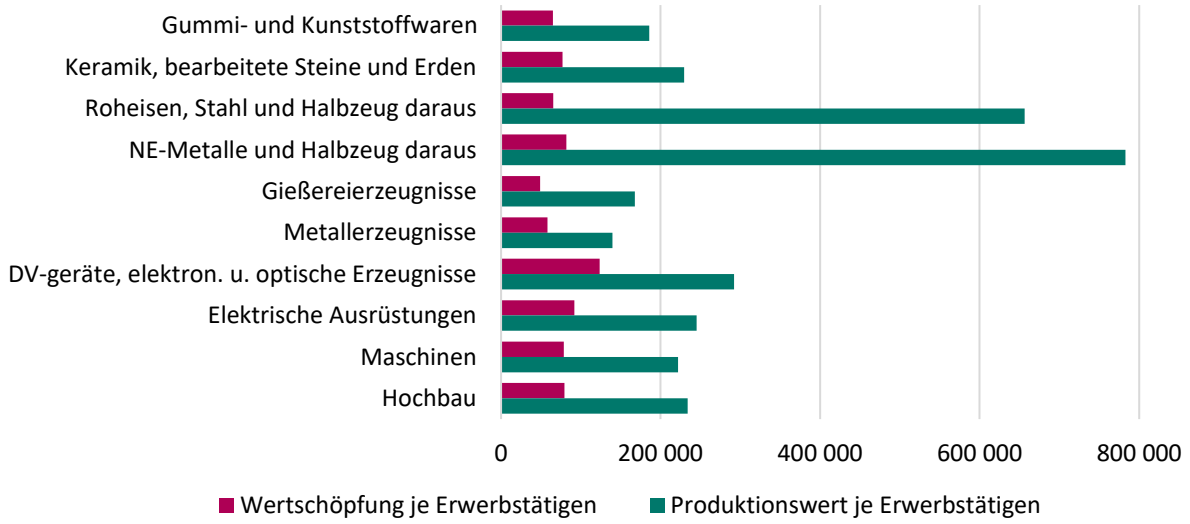
[10] Im Folgenden wird nur von Wirtschaftssektoren in der Wirtschaftszweigklassifikation 2008 (WZ 2008) gesprochen, und Produktionsbereiche, wie in der Input-Output-Analyse genutzt, werden hierunter subsumiert.

Unter der weiteren Annahme, dass dieser funktionale Zusammenhang für alle Güter eines Sektors gilt, kann die Kenntnis des gesamtwirtschaftlichen Zusammenhangs zwischen Arbeitseinsatz und Produktionswert[11] (bzw. Wertschöpfung[12]) eines Sektors genutzt werden, um den Arbeitsbedarf für eine konkrete Produktion dieses Sektors zu ermitteln.

Die Informationen zu diesem gesamtwirtschaftlichen Zusammenhang stehen mit der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung zur Verfügung, die für alle Wirtschaftszweige das Verhältnis von Produktionswert (bzw. Wertschöpfung) und Beschäftigung ausweist. Sie enthält somit Informationen darüber, wie viel Beschäftigung (in Personenjahren) notwendig ist, um einen bestimmten Produktionswert (bzw. eine bestimmte Wertschöpfung) in einem bestimmten Sektor zu erzeugen, bzw. wie hoch der Produktionswert oder die Wertschöpfung je Erwerbstätigen ist.

Für die deutsche Wirtschaft ergibt sich ein durchschnittlicher Produktionswert je Erwerbstätigen von rund 143 Tsd. Euro pro Jahr und eine durchschnittliche Wertschöpfung von rund 69 Tsd. Euro. Die sektoralen Unterschiede sind sehr groß und auch das Verhältnis von Wertschöpfung je Erwerbstätigen zu Produktionswert je Erwerbstätigen ist heterogen (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 4: Produktionswert und Wertschöpfung je Erwerbstätigen in ausgewählten Sektoren, Euro



Quelle: DIW Econ nach Destatis (2023).

Um die Beschäftigungseffekte durch die Herstellung und Installation der Anlagen entlang der P2X-Wertschöpfungsketten zu bestimmen, nutzen wir dieses Verhältnis von sektoralem Produktionswert und Arbeitseinsatz und bestimmen die Beschäftigungseffekte über die für eine bestimmte Anlage

[11] Der Produktionswert ist das sektorale Aggregat des Wertes der Produktion aller Güter und Dienstleistungen und entspricht (weitgehend) dem Umsatz und damit den Verkaufserlösen.

[12] Die Wertschöpfung ist die in den einzelnen Wirtschaftszweigen (bzw. Unternehmen) erbrachte wirtschaftliche Leistung, die als Summe der in diesen Wirtschaftszweigen entstandenen Einkommen dargestellt wird.

notwendigen Investitionen. Dafür müssen allerdings die für eine Anlage anfallenden Gesamtinvestitionen auf die Wirtschaftszweige aufgeteilt werden.

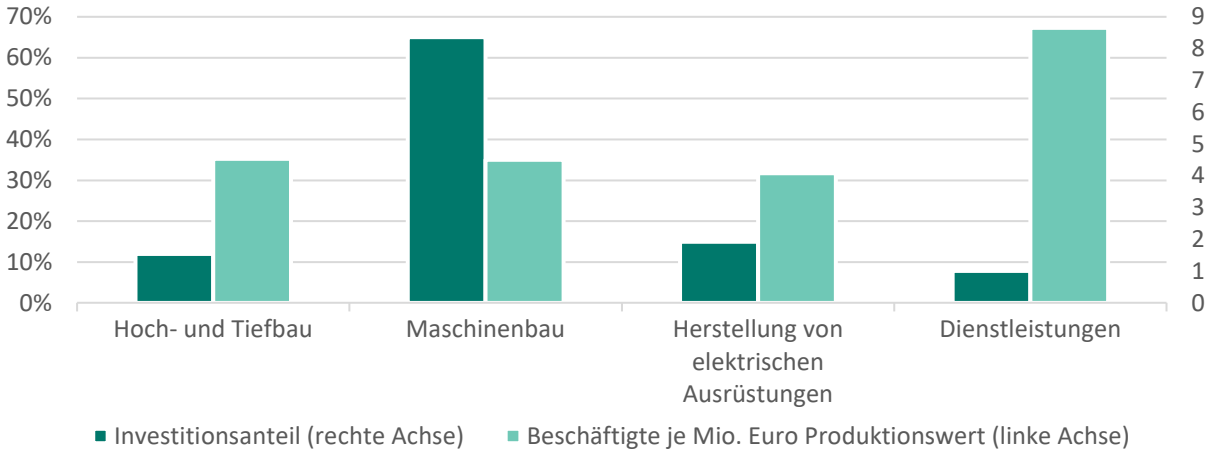
3.2 Sektorale Aufteilung der Investitionen

Im Allgemeinen kann eine technische Anlage, wie eine Windkraftanlage, in ihrer Herstellung dem Sektor des Maschinenbaus zugeordnet werden. Um aber die Heterogenität der Wertschöpfung je Beschäftigten (vgl. Abschnitt 3.1) zwischen Sektoren berücksichtigen zu können, werden verfügbare Informationen zu sektoralen Anteilen an der Fertigung von (Teil-)Produkten in der Analyse genutzt. Darüber hinaus beinhaltet die Anlageninvestition nicht nur die Herstellung, sondern auch die gesamte Planung und Installation der Anlage.

Für eine Windkraftanlage können daher den verschiedenen Komponenten der Gesamtanlage einzelne Wirtschaftszweige zugewiesen werden: Der Bausektor fertig das Fundament, der Maschinenbau liefert die Gondel sowie die Rotoren, und der Sektor „Herstellung elektrischer Ausrüstungen“ liefert den Generator, während der Dienstleistungssektor die Planung durchführt und die Finanzierung bereitstellt. Wie in Abbildung 5 zu erkennen, benötigt der Dienstleistungssektor dabei einen höheren Einsatz an Arbeit für die Produktion als z.B. der Maschinenbau.

Für jede der berücksichtigten Anlagen wird daher eine sektorale Aufteilung basierend auf Informationen in der Literatur vorgenommen, wie exemplarisch in Abbildung 5 für eine Windkraftanlage gezeigt (vgl. hierzu Abschnitt 3.5).

Abbildung 5: Beispiel für eine sektorale Aufteilung der Investitionen in eine Windkraftanlage



Quelle: DIW Econ nach ETUI (2021, 65) und Destatis (2023).

3.3 Direkte vs. indirekte Beschäftigungseffekte

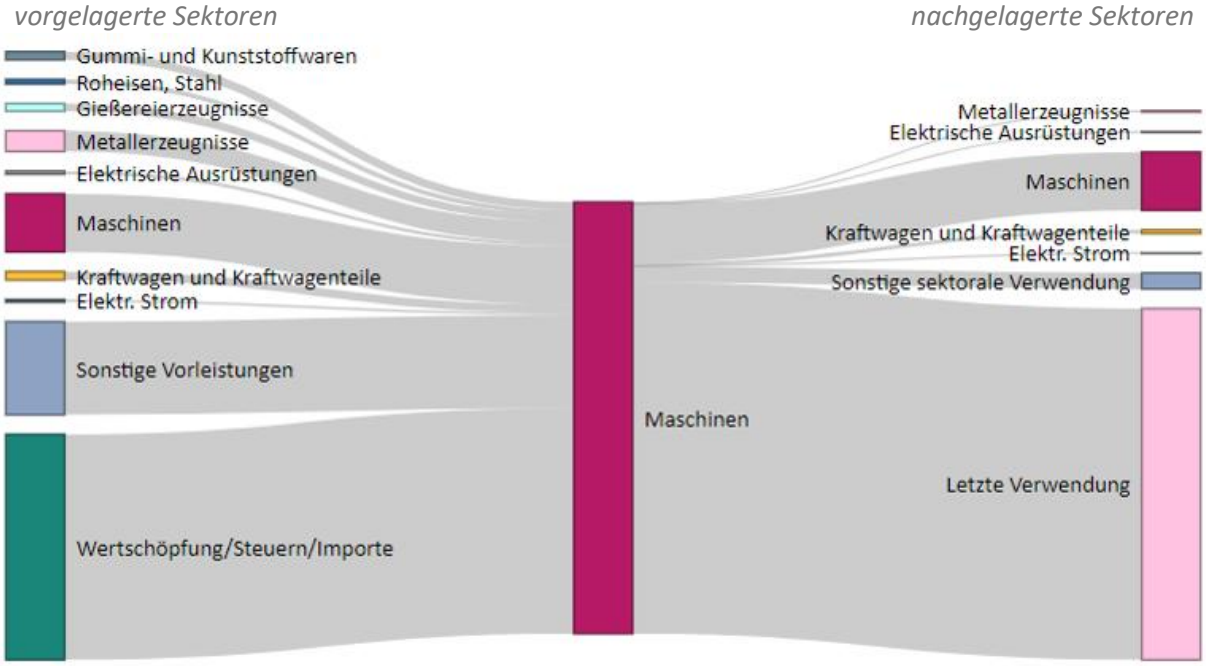
Es wird zwischen direkten und indirekten Beschäftigungseffekten unterschieden. Direkte Beschäftigungseffekte beziffern die Beschäftigung, die durch eine Investition im Endproduktsektor geschaffen wird. Ein Endproduktsektor ist z.B. bei einer Investition in eine PV-Anlage vor allem die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen und bei einer Investition in einen Elektrolyseur der Maschinenbau. Indirekte Beschäftigung entsteht dagegen dadurch, dass der Sektor, der ein Endprodukt herstellt, Vorprodukte aus anderen Sektoren bezieht. Wie viel Beschäftigung – direkt und indirekt – jeweils in welchem Sektor entsteht, hängt von der Art der Investition (dem Endproduktsektor), der Höhe der Investition, der Struktur der Vorleistungsverflechtungen und der jeweiligen sektoralen Arbeitsproduktivität ab.

Alle Wirtschaftssektoren einer Volkswirtschaft sind in Wertschöpfungsketten miteinander verbunden. So werden z.B. für die Produktion einer Windkraftanlage im (Endprodukt-)Sektor „28 Maschinenbau“ Vorprodukte aus dem Sektor „25 Herstellung von Metallerzeugnissen“ benötigt, der wiederum vom Sektor „24 Metallerzeugung und -bearbeitung“ beliefert wird.[13] Der Kreis schließt sich, wenn man berücksichtigt, dass auch der Sektor 24 den in Windkraftanlagen erzeugten Strom nutzt.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch für einen Teil der Sektoren der deutschen Wirtschaft die vor- und nachgelagerten Produktionen des Maschinenbaus, wobei die jeweilige Größe der Balken die Relation der zu- bzw. abfließenden Produktionswerte wiedergibt. Der Produktionswert eines Sektors (hier des Maschinenbaus in der Mitte von Abbildung 6) ergibt sich (vereinfacht) aus dem Bezug von Vorleistungen (aus dem Inland und durch Importe), der Bruttowertschöpfung und den Gütersteuern des Sektors (linker Teil von Abbildung 6). Der Produktionswert wird wiederum als Vorleistung in anderen Sektoren und in der letzten Verwendung durch private Haushalte und den Staat sowie durch Investitionen und Exporte verwendet (rechter Teil von Abbildung 6).

[13] Es wird hier davon abstrahiert, dass Produktion aus Vorleistungen zu einem anderen Zeitpunkt als die Produktion der Vorleistungen erfolgt.

Abbildung 6: Beispielhafter Ausschnitt einer Wertschöpfungskette des Sektors Maschinenbau



Quelle: DIW Econ nach Destatis (2023).

3.4 Input-Output Modell zur Bestimmung der Beschäftigungseffekte

Zur Ermittlung der direkten und indirekten Beschäftigungseffekte einer Investition in eine Anlage innerhalb der P2X-Wertschöpfungskette wird ein von DIW Econ implementiertes Input-Output-Modell verwendet. Zur Abschätzung der Beschäftigungseffekte wird dabei die offizielle Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes verwendet.[14]

Die für Deutschland vorliegende Input-Output-Tabelle gibt 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.

Für die Analyse wird die derzeit aktuellste Input-Output-Tabelle für das Jahr 2020 (Statistisches Bundesamt 2023) verwendet und darauf aufbauend die zusätzlichen Beschäftigungseffekte zukünftiger Investitionen in der Upstream P2X-Wertschöpfungskette in Deutschland prognostiziert. Dabei wird angenommen, dass die intersektoralen Güter- und Produktionsverflechtungen und die daraus abgeleiteten Multiplikatoren im Jahr 2020 auch mittel- und langfristig gültig sind.

[14] Eine Erläuterung des Modells findet sich in Anhang A.

3.5 Ökonomische und technische Parameter der P2X-Wertschöpfung

Die für die Ermittlung der Beschäftigungseffekte relevanten technischen und ökonomischen Parameter der P2X- und Stromerzeugungsanlagen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Da diese Studie ein Teilprojekt des Wasserstoffatlas Deutschland ist, sind die Annahmen mit Vorarbeiten der OTH Regensburg abgestimmt und basieren auf technischen Daten von PyPSA, dem Open Source Modell zur Simulation und Optimierung von Strom- und Energiesystemen.[15] Eine Abweichung von diesen Annahmen stellen regional variable Parameter dar, die unten näher erläutert werden.

Grundsätzlich wird in den zugrundeliegenden Quellen davon ausgegangen, dass die Wirkungsgrade der Umwandlung von Energieträgern steigen und die Kapitalkosten pro installierte Einheit sinken werden. In welchem Umfang dies geschehen wird, ist jedoch weitgehend unsicher, insbesondere bei neuen Technologien wie Direct Air Capture.

Für die Entwicklung der Wind- und PV-Kapazitäten werden zwei vereinfachende Annahmen getroffen: (a) es werden nur Onshore-Windkraftanlagen berücksichtigt und (b) es wird nicht zwischen Dach-PV und PV-Freiflächenanlagen unterschieden, wobei die Investitionskosten in PyPSA als Mittelwert zwischen den beiden Technologien berechnet werden.

Tabelle 1: Technoökonomische Parameter der Anlagen in P2X Wertschöpfungsketten

Parameter		Einheit	2020	2030	2040
Wirkungsgrad	Elektrolyse	Prozent	65%	67%	69%
	Methanisierung	Prozent	80%	80%	80%
	Fischer-Tropsch	Prozent	80%	80%	80%
Inputs	CO_2 für Methanisierung	kg/kWh	0.198	0.198	0.198
	CO_2 für Fischer-Tropsch	kg/kWh	0.36	0.33	0.3
	Strom für Direct Air Capture	kWh/t CO_2	400	400	400
Investitionskosten	Elektrolyse	Euro/kW H_2	736	510	340
	Methanisierung	Euro/kW CH_4	719	629	555
	Fischer-Tropsch	Euro/kW Liquid	757	651	566
	Direct Air Capture	Euro/t CO_2	896	751	626
	PV	Euro/kW	733	492	408
	Wind Onshore	Euro/kW	1119	1036	978

Quelle: OTH Regensburg basierend auf PyPSA.

Für alle P2X-Erzeugungsanlagen wird eine Auslastung von 91% (8.000 Volllaststunden) angenommen, wie sie von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018) diskutiert wurde. Da die Sonnen- und Windverhältnisse jedoch regional sehr unterschiedlich sind, wird der Nutzungsgrad der PV- und Windkraftanlagen auf Kreisebene ermittelt. Fraunhofer ISE (2021b)

[15] https://github.com/PyPSA/PyPSA

unterscheidet jeweils drei regionale Gruppen für den Nutzungsgrad der PV- und Windkraftanlagen (vgl. Tabelle 2). Die Bundesländer bzw. Kreise wurden diesen Gruppen durch eigene Recherchen auf Basis von Fraunhofer ISE (2021b) und GWA (2023) zugeordnet (vgl. Tabelle 7und Tabelle 8 in Anhang B).

Tabelle 2: Volllaststunden der PV- und Windkraftanlagen nach Region

PV		Wind Onshore	
Norden	935	Binnenland	1800
Mitte	1105	Norddeutschland	2500
Süden	1280	Küstennahe und windreiche Standorte	3200

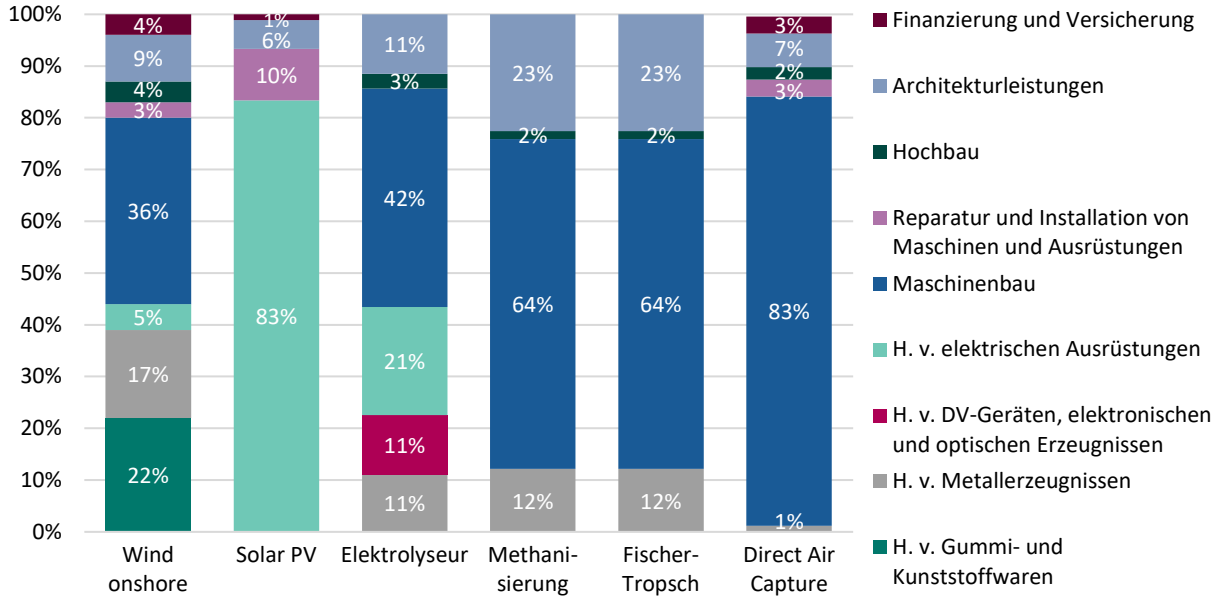
Quelle: (Fraunhofer ISE 2021b).

Auch das Verhältnis von Wind und PV beim Zubau von Stromerzeugungsanlagen variiert je nach regionalen Wetterverhältnissen und Flächenverfügbarkeit. Es wird daher ebenfalls auf Kreisebene ermittelt und ergibt sich aus den im Wasserstoffatlas Deutschland (Schumm, et al. 2024) erfassten Erzeugungspotenzialen für PV und Onshore-Wind.

Für die in Abschnitt 3.2 beschriebene Aufteilung der Investitionskosten auf die Wirtschaftssektoren werden die in Abbildung 7 dargestellten Werte verwendet. Die Annahmen für PV und Onshore-Wind stammen aus Trinomics & LBST (2020), für Elektrolyse aus Fraunhofer ISE (2021a) als Mittelwert zwischen PEM und alkalischen Elektrolyseuren, für Fischer-Tropsch-Verfahren aus Zang et al. (2021) und für DAC aus Young et al. (2023). Die Aufteilung der Investitionskosten in der Methanproduktion erfolgt auf Basis der Daten für das Fischer-Tropsch-Verfahren. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, werden die direkten und indirekten Beschäftigungseffekte aus der Produktion und Installation der P2X- und Stromerzeugungsanlagen auf Basis der Investitionskosten und deren sektoraler Verteilung mit Hilfe des Input-Output-Modells berechnet.

Die Beschäftigungseffekte aus Betrieb und Wartung werden mit Hilfe der Multiplikatoranalyse ermittelt. Tabelle 3 zeigt die dafür verwendeten Multiplikatoren. Die Multiplikatoren für PV und Onshore-Wind stammen aus Cameron & Zwaan (2015). Da die beiden Technologien bereits gut etabliert sind, werden hier keine Lernkurven mehr erwartet, so dass die Multiplikatoren über die Zeit konstant bleiben. Die Multiplikatoren für die Elektrolyse wurden auf Basis von Experteninterviews ermittelt, die im November 2023 von DIW Econ durchgeführt wurden. Die Multiplikatoren für die Methanisierung und das Fischer-Tropsch-Verfahren basieren auf den Multiplikatoren für die Elektrolyse sowie dem Verhältnis des Beschäftigungsbedarfs für die Methanisierung bzw. das Fischer-Tropsch-Verfahren und die Elektrolyse und den Lernraten aus McCoy et al. (2022). Die DAC-Multiplikatoren für 2020 stammen von Rhodium Group (2020) und werden mit Lernraten aus McCoy et al. (2022) über die Zeit skaliert. Für alle vier Technologien wird erwartet, dass der Beschäftigungsbedarf für Betrieb und Wartung im Laufe der Zeit aufgrund von Lern- und Skaleneffekten abnimmt.

Abbildung 7: Sektorale Anteile am CAPEX der Anlagen in der P2X-Wertschöpfung



Quelle: DIW Econ.

Tabelle 3: Annahmen zur Beschäftigung in Betrieb und Wartung der Anlagen entlang der P2X-Wertschöpfungsketten

Technologie	Einheit	2020	2030	2040	Quelle
Wind	FTE/MW	0.3	0.3	0.3	Cameron & Zwaan (2015)
PV	FTE/MW	0.3	0.3	0.3	Cameron & Zwaan (2015)
Elektrolyse	FTE/MW	1.07	0.71	0.48	Experteninterviews
Methanisierung	FTE/MW	1.16	1.05	0.95	Elektrolyse + McCoy et al. (2022)
Fischer-Tropsch	FTE/MW	1.52	1.38	1.24	Elektrolyse + McCoy et al. (2022)
Direct Air Capture	FTE/Mt CO2/a	278	253	228	Rhodium Group (2020), McCoy et al. (2022)

Quelle: DIW Econ.

4. Ergebnisse

Um die Beschäftigungseffekte der P2X-Wertschöpfungskette aussagekräftig darstellen zu können, wird eine Bezugsgröße für die P2X-Produktion benötigt. In dieser Studie wird ein Benchmarking-Ansatz gewählt, bei dem alle Bedarfe pro 1 TWh Endenergieträger errechnet werden. Diese Menge entspricht in etwa dem heutigen Brennstoffbedarf eines Stahlwerks, das 200 Tsd. Tonnen Primärstahl produziert[16], oder dem Bedarf an synthetischem Kerosin im deutschen Luftverkehr, um bei einem Verbrauch auf dem Niveau vor der COVID-19-Pandemie das EU-Ziel für die Beimischung von e-Fuels im Jahr 2030 zu erreichen[17].

[16] Eigene Schätzung basierend auf Navigant Energy Germany (2020).

[17] Das EU-Ziel für 2030 ist die 5 % Beimischung von nachhaltigen Treibstoffen, davon 0,7 % synthetische Treibstoffe. Der Energieverbrauch im deutschen Luftverkehr betrug ca. 120 TWh in 2019 (EASA kein Datum, AG Energiebilanzen 2021).

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse zu den durchschnittlichen Beschäftigungseffekten in Deutschland für die Jahre 2020-2040 dargestellt und deren quantitative Einordnung im Kontext der Dekarbonisierung von Industrie und Verkehr diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse auf regionaler Ebene dargestellt. Darüber hinaus werden auch die Unsicherheiten in den Annahmen und Sensitivitätsanalysen diskutiert.

4.1 Ergebnisse für Deutschland

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse für Deutschland als Durchschnitt über alle Kreise und über die Jahre 2020-2040. Ergebnisse für die einzelnen Jahre 2020, 2030 und 2040 finden sich in Anhang C.

Für die drei dargestellten P2X-Wertschöpfunsgketten – Wasserstofferzeugung, Produktion von synthetischem Methan sowie Produktion von flüssigen synthetischen Kraftstoffen – ergeben sich die Gesamtinvestitionen in der jeweiligen Anlagenkonfiguration in Höhe von 0,8 Mrd. Euro bis 1,4 Mrd. Euro pro 1 TWh Endenergieträger. Maßgeblich für die Höhe der Investitionen ist der Ausbau der Wind- und PV-Kapazitäten. Diese machen ca. 92 % der Investitionen aus, wenn Wasserstoff als Endprodukt erzeugt wird. Dies entspricht in etwa den Ergebnissen von Trinomics und LBST (2020). Da die Produktion von synthetischem Methan und synthetischen Liquids einen weiteren Schritt nach Wasserstofferzeugung und damit zusätzliche Investitionen erfordert, ist der Anteil der Investitionen in die Stromerzeugung mit 75 % bzw. 70 % etwas geringer, aber immer noch dominierend. Im Durchschnitt wird dreimal so viel PV-Kapazität zur Stromerzeugung installiert wie Windkapazität, aber da PV-Anlagen wesentlich günstiger sind, machen sie ca. 60 % der Strominvestitionen aus. Ein weiterer wichtiger Kostenfaktor bei der Methanisierung und der Produktion von synthetischen Liquids ist Direct Air Capture. DAC-Investitionen machen bei der Methanisierung 12 % und beim Fischer-Tropsch-Verfahren 18 % der Gesamtinvestitionen aus.

Die mit der Produktion und Installation der Anlagen verbundenen Beschäftigungseffekte resultieren, wie in Abschnitt 3.1 erläutert, aus der Wertschöpfung in verschiedenen Sektoren der deutschen Wirtschaft (wie angenommen erfolgt kein Import von Komponenten). Im Wesentlichen sind dies die Sektoren Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Herstellung von Metallerzeugnissen, Maschinenbau und Baugewerbe. Im Gegensatz zur Beschäftigung in Betrieb und Wartung der Anlagen, die über die gesamte Nutzungsdauer der Anlagen anfällt, wird Beschäftigung in Produktion und Installation genau einmal induziert. Eine Aussage über die Schaffung von Arbeitsplätzen ist daher nur möglich, wenn eine Annahme über die Zubaurate des Anlagenbestandes getroffen wird.

Tabelle 4: Investitionen und Beschäftigungseffekte der P2X-Wertschöpfungsketten – ungewichteter Durchschnitt 2020 - 2040

Durchschnitt für 2020 - 2040		Einheit	Wasserstoff	Synthetisches Methan	Synthetische Liquids
Erzeugung	Endprodukt	TWh	1.0	1.0	1.0
	Wasserstoff (Input)	TWh	-	1.3	1.3
	Strom Input	TWh	1.5	1.9	2.0
	CO_2 Input	kt	-	198	330
Kapazitäten	Fischer-Tropsch	MW	-	-	125
	Methanisierung	MW	-	125	-
	Elektrolyse	MW	125	156	156
	Wind Onshore	MW	276	360	370
	PV	MW	809	1 055	1 083
Investitionen	Fischer-Tropsch	Mio. Euro	-	-	82
	Methanisierung	Mio. Euro	-	79	-
	Direct Air Capture	Mio. Euro	-	150	253
	Elektrolyse	Mio. Euro	66	83	83
	Wind Onshore	Mio. Euro	290	377	388
	PV	Mio. Euro	443	577	594
	Gesamt	**Mio. Euro**	**799**	**1 267**	**1 399**
Beschäftigung aus Produktion und Installation	Fischer-Tropsch	FTE	-	-	916
	Methanisierung	FTE	-	883	-
	Direct Air Capture	FTE	-	1 525	2 569
	Elektrolyse	FTE	674	843	843
	Wind Onshore	FTE	3 025	3 942	4 050
	PV	FTE	4 091	5 329	5 479
	Gesamt	**FTE**	**7 790**	**12 521**	**13 857**
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung	Fischer-Tropsch	FTE	-	-	172
	Methanisierung	FTE	-	132	-
	Direct Air Capture	FTE	-	50	84
	Elektrolyse	FTE	94	118	118
	Wind Onshore	FTE	83	108	111
	PV	FTE	243	316	325
	Gesamt	**FTE**	**420**	**724**	**810**

Quelle: DIW Econ.

Davon abgesehen, liegen die Gesamtbeschäftigungseffekte durch die Produktion und Installation der Anlagen in den jeweiligen Konfigurationen zwischen 7,8 und 13,9 Tsd. Auch hier gilt, dass die Produktion von 1 TWh synthetischem Methan und 1 TWh synthetischen Liquids deutlich mehr Beschäftigte erfordert als die Produktion von 1 TWh Wasserstoff. Da die Anlagen für Elektrolyse, Methanisierung, Fischer-Tropsch-Verfahren und DAC etwas arbeitsintensiver sind als insbesondere die PV-Anlagen, ist ihr Anteil an der Gesamtbeschäftigung um einen Prozentpunkt höher als der Anteil an den Investitionen.

Diese Anlagen sind auch in Betrieb und Wartung deutlich arbeitsintensiver als die Stromerzeugungsanlagen. So erfordert die Produktion von 1 TWh synthetischen Liquids mit 810 Beschäftigten etwa doppelt so viele Arbeitskräfte wie die Produktion von 1 TWh Wasserstoff (420 Beschäftigte), wobei

mehr als die Hälfte der zusätzlichen Arbeitsplätze (256) auf Fischer-Tropsch-Verfahren und DAC entfallen. Dies spiegelt sich auch in den Beschäftigungsanteilen nach Technologie wider: Bei der Erzeugung von Wasserstoff entfallen 78 % der Gesamtbeschäftigung in Betrieb und Wartung auf die Stromerzeugung, bei synthetischem Methan 59 % und bei synthetischen Liquids nur 54 %.

4.2 Quantitative Einordnung

Die oben dargestellten Ergebnisse wurden einheitlich für die Produktion von 1 TWh Endenergieträger ermittelt und angegeben. Zur besseren quantitativen Einordnung werden im Folgenden drei Beispiele für aktuelle und zukünftige Anwendungsfälle im Kontext der Dekarbonisierung in Deutschland dargestellt. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Ergebnisse für diese Anwendungsfälle.

Tabelle 5: Quantitative Bespiele für einen Einsatz von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern

	100 TWh Wasserstoff in der Stahl- und Chemieindustrie	60 TWh synthetisches Methan in der Glasindustrie	120 TWh synthetisches Kerosin in der Luftfahrt
Wasserstoff Input, TWh	-	75	150
Strom Input, TWh	149	117	240
CO_2 Input, Mio. Tonnen	-	12	40
Kapazitäten, MW			
Fischer-Tropsch Synthese	-	-	15 000
Methanisierung	-	7 500	-
Elektrolyse	12 500	9 375	18 750
Wind Onshore	27 627	21 598	44 376
PV	80 947	63 286	130 007
Investitionen 2025 - 2045, Mio. Euro	**79 889**	**75 990**	**167 860**
Ø bei Aufbau bis 2045, Mio. Euro pro Jahr	3 994	3 800	8 393
Beschäftigung aus Produktion und Installation, FTE	**779 019**	**751 265**	**1 662 858**
Ø bei Aufbau bis 2045, FTE pro Jahr	38 951	37 563	83 143
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung ab 2045, FTE	**41 984**	**43 441**	**97 202**

Quelle: DIW Econ.

Dekarbonisierung der Stahl- und Chemieindustrie mit 100 TWh Wasserstoff

Gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi 2020) werden für die Dekarbonisierung der stofflichen Nutzung fossiler Energieträger in der Grundstoffindustrie (Stahl und Chemie) ca. 100 TWh Wasserstoff benötigt. Diese Wasserstoffmenge würde ausreichen, um ca. 60 Mio. Tonnen Stahl zu dekarbonisieren, was ca. 170 % der Produktion (35 Mio. Tonnen) im Jahr 2020 entspricht (BMWK 2023).

Würde diese Menge Wasserstoff, der dafür benötigte regenerative Strom und die Anlagen vollständig im Inland produziert werden – was in der Nationalen Wasserstoffstrategie allerdings nicht unterstellt wird –, wären damit Investitionen in Höhe von ca. 80 Mrd. Euro verbunden, die über 20 Jahre kontinuierlich verteilt 39 Tsd. direkt und indirekt Beschäftigte erfordern (vgl. Tabelle 5). Dies entspricht 0,1 %

der Gesamtbeschäftigung in Deutschland im Jahr 2020. Durch den hohen Ausbaubedarf der regenerativen Stromerzeugung ist dabei vor allem die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (4,5 % der Beschäftigung im Sektor) betroffen, aber auch der Maschinenbau (0,7 %), die Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen (1 %) sowie die Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren (0,7 %). Durch den Betrieb und die Wartung der Anlagen entstehen weitere 42 Tsd. Arbeitsplätze entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Strom zu Wasserstoff.

Dekarbonisierung des Erdgaseinsatz in der Glasindustrie von gegenwärtig 60 TWh

Die deutsche Glasindustrie hat einen Energiebedarf von 80 TWh, wovon rund 75 % durch Erdgas gedeckt werden. Erdgas wird größtenteils in der Prozesswärmeerzeugung zur Glasschmelze eingesetzt (Zukunft Gas 2023). Die dort zu erzeugenden Temperaturen reichen bis zu 1.600 °C, und die Anlagen müssen ununterbrochen weiterbetrieben werden, weil sie beim Erkalten der Schmelze beschädigt werden. Die Dekarbonisierung der Glasindustrie kann grundsätzlich über den Einsatz von Strom, Wasserstoff oder synthetischem Methan erfolgen. Für das hier gezeigte Beispiel wird exemplarisch unterstellt, dass eine vollständige Substitution der rund 60 TWh Erdgas durch synthetisches Methan erfolgt. Hierfür ist eine Produktion von rund 75 TWh Wasserstoff sowie 117 TWh Strom erforderlich. Dies führt zu Investitionen von rund 76 Mrd. Euro und einer Beschäftigung in der Anlagenproduktion von rund 38 Tsd., oder 0,1 % der deutschen Gesamtbeschäftigung über einen Zeitraum bis 2045. In Betrieb und Wartung ergäben sich beim Erreichen der vollen Kapazität ab 2045 rund 43 Tsd. Beschäftigte entlang der P2X-Technologiekette.

Dekarbonisierung des Kerosinbedarfs von gegenwärtig 10 Mrd. Tonnen

Insbesondere die Dekarbonisierung des Luftverkehrs ist mit technischen Herausforderungen verbunden, da Batterien eine geringe Energiedichte aufweisen und Wasserstoff hohe Anforderungen an Lagerung und Transport stellt. Synthetisches Kerosin kann hier ein Treiber der Dekarbonisierung sein.

Im Jahr 2019, dem letzten Jahr vor der COVID-19-Pandemie, erreichte der Kerosinbedarf im deutschen Luftverkehr mit 10 Mrd. Tonnen bzw. ca. 120 TWh ein Allzeithoch. Aufgrund von Reiseeinschränkungen im Jahr 2020 betrug der Verbrauch nur noch etwa ein Drittel des Niveaus von 2019 und liegt trotz der anhaltenden Erholung des Flugverkehrs derzeit noch unter dem Niveau vor der Pandemie (Umweltbundesamt 2024). Der kontinuierliche Anstieg des Verbrauchs in den letzten Jahrzehnten lässt jedoch erwarten, dass das Niveau von 2019 in den kommenden Jahren wieder erreicht und übertroffen wird. Daher wird diese Referenzmenge für den Anwendungsfall angenommen.

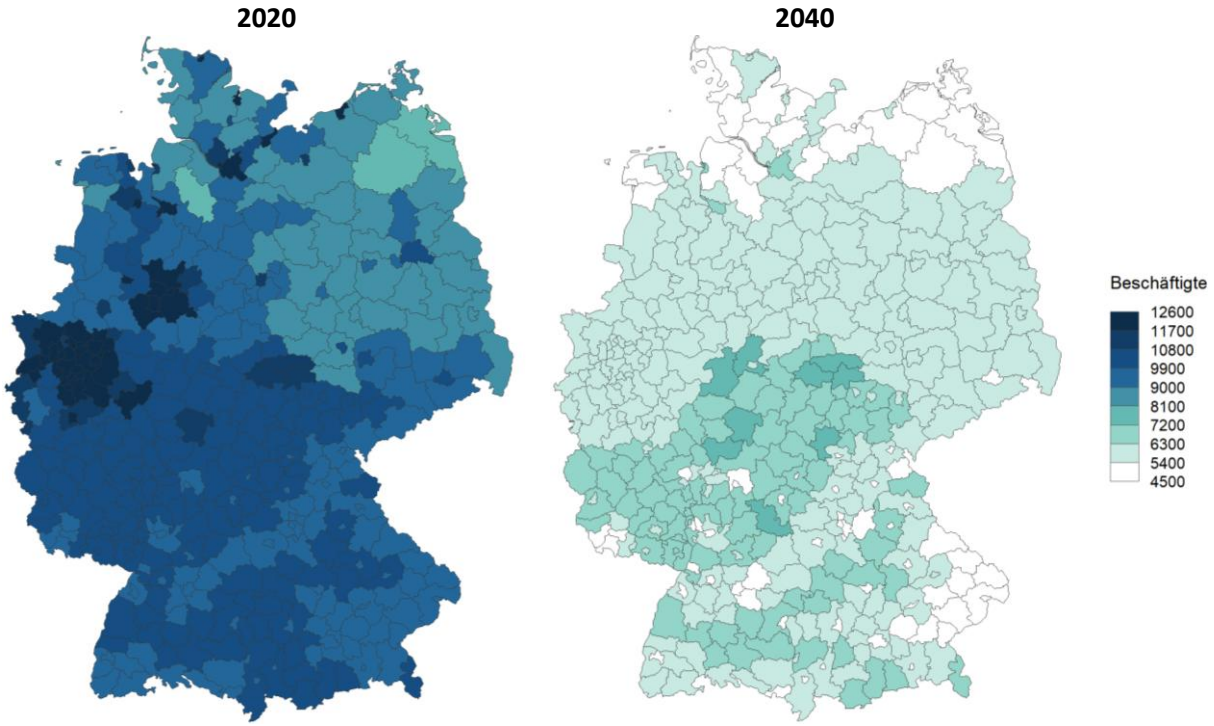
Wie Tabelle 5 zeigt, wären für die Produktion von 120 TWh synthetischem Kerosin Investitionen in Höhe von 168 Mrd. Euro erforderlich, um bis 2045 die P2X-Technologiekette aufzubauen. Besonders

auffällig sind die zu installierenden Wind- und PV-Kapazitäten von über 170 GW, die die heute installierte Gesamtleistung von ca. 150 GW noch übertreffen.[18] Allein die Dekarbonisierung des deutschen Luftverkehrs durch heimisch erzeugtes synthetisches Kerosin würde jährlich rund 83 Tsd. Beschäftigte in der Produktion und Installation und ab 2045 knapp 100 Tsd. Beschäftigte in Wartung und Betrieb der P2X-Technologiekette erfordern. Der Beschäftigungsbedarf in der Investitionsphase entspricht 0,2 % der Beschäftigung in Deutschland und ist vor allem in der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (7,3 % der sektoralen Beschäftigung in 2020), im Maschinenbau (2,7 %) und in der Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen (1,7 %) spürbar.

4.3 Regionale Unterschiede

Abbildung 8 zeigt den regionalen Beschäftigungsbedarf für die Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff in 2020 und 2040. Zwei Ergebnisse fallen sofort ins Auge: (a) es gibt eine große Spanne von ca. 4 Tsd. Beschäftigten pro 1 TWh Wasserstoff im jeweiligen Jahr und (b) der Beschäftigungsbedarf nimmt mit der Zeit stark ab.

Abbildung 8: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen und zeitlichen Vergleich



Quelle: DIW Econ.

[18] Gesamtleistung Ende 2023 ergibt sich aus 61 GW Onshore-Wind, 8,5 GW Offshore-Wind und 82,2 GW PV (BMWK 2024).

Regionale Unterschiede im Beschäftigungsbedarf ergeben sich aus der regional unterschiedlichen Auslastung von PV- und Windkraftanlagen und dem Verhältnis von Wind- und PV-Potenzial zur Stromerzeugung. Windkraftanlagen sind insgesamt kostenintensiver pro MW installierter Leistung und werden im Vergleich zu PV von arbeitsintensiveren Sektoren beliefert. Im Schnitt benötigt es in 2020 zwölf Beschäftigte, um 1 MW an Windkraftanlagen zu installieren, während für 1 MW PV nur die Hälfte erforderlich ist.

Andererseits haben Windkraftanlagen auch deutlich höhere Auslastung (Volllaststunden), insbesondere in windreichen Regionen im deutschen Norden, so dass für die gleiche Erzeugung deutlich weniger Kapazität installiert werden muss. Sind dagegen sowohl PV- als auch Winderträge in der Region gering, muss insgesamt deutlich mehr Leistung installiert werden, was höhere Investitionen und Beschäftigungsbedarfe bedeutet.

Die relativen Potentiale wiederum werden nicht nur von den meteorologischen Bedingungen, sondern auch von verfügbaren Flächen bestimmt (z.B. ist das Windkraftpotential in dicht besiedelten Regionen in der Regel geringer als das PV-Potential).

Aus dem Zusammenspiel dieser Faktoren ergibt sich eine Verteilung, in der windreiche Regionen mit hohem Windpotential im deutschen Norden am wenigsten Beschäftigte pro 1 TWh Endprodukt benötigen. Mit ca. 8 Tsd. Beschäftigten pro 1 TWh Wasserstoff in 2020 weisen die Kreise Mecklenburgische Seenplatte, Vorpommern-Greifswald in Mecklenburg-Vorpommern und Rotenburg (Wümme) in Niedersachsen die geringsten Werte auf. Auch in sonnenreichen Regionen Bayerns gibt es Kreise, die mit ca. 9 Tsd. Beschäftigten pro 1 TWh Wasserstoff im Jahr 2020 im unteren Bereich der Verteilung liegen, darunter z.B. Freyung-Grafenau und Cham.

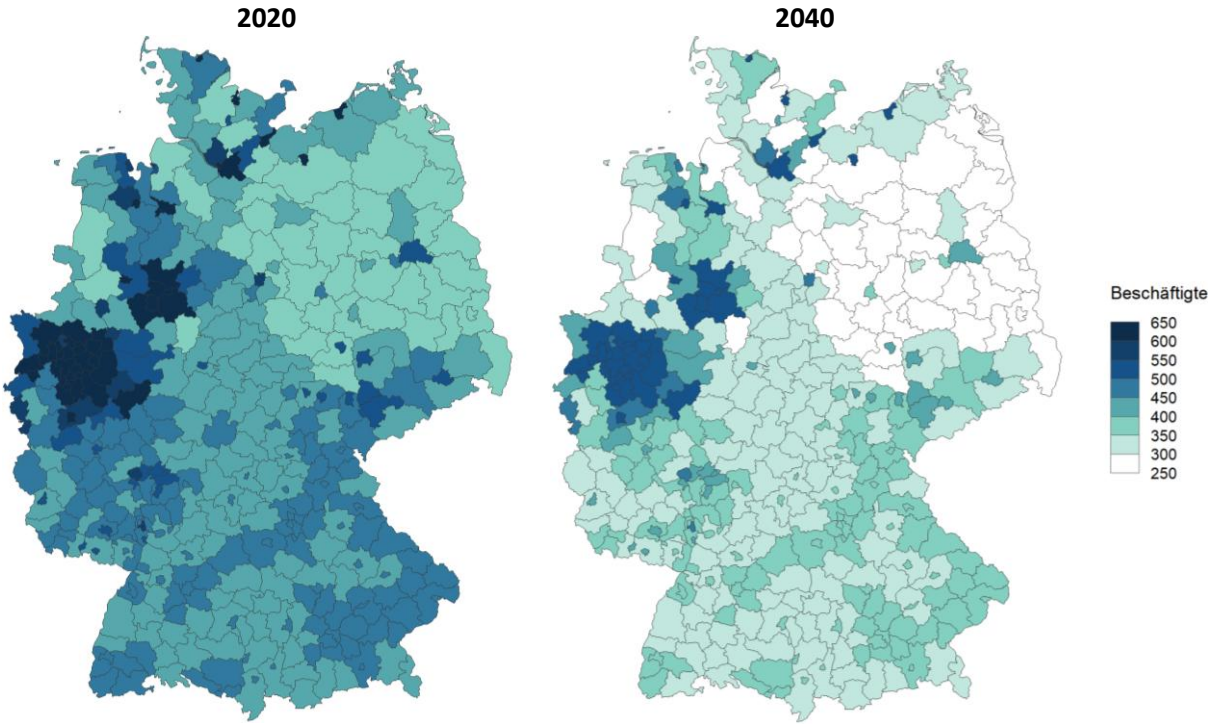
Auf der anderen Seite haben Kreise in Nordrhein-Westfalen geringere Windpotentiale im Vergleich zu PV, allerdings auch geringe Sonneneinstrahlung und geringe bis mittlere Windstärke, so dass für die benötigte Stromerzeugung besonders viel Kapazität installiert werden muss. Dort können heute insgesamt bis zu 12,1 Tsd. Beschäftigte für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff erforderlich sein, wie z.B. in Düsseldorf, Duisburg, Essen oder im Rheinisch-Bergischen Kreis und im Kreis Gütersloh.

Die regionale Verteilung verschiebt sich über die Zeit durch Effizienzsteigerung der Windkraftanlagen und starke Kostenreduktion und damit Reduktion der Beschäftigungsbedarfe bei den PV-Anlagen. Die windreichen Regionen im Norden und die sonnenreichen Regionen im Süden treten noch stärker durch ihre geringe Beschäftigungsbedarfe hervor, während die Beschäftigungseffekte in Nordrhein-Westfalen im Kreisvergleich abgeschwächt werden. Die Kreise mit höchsten Bedarfen sind in 2040 vor allem diejenigen, die relativ hohen Anteil an Stromerzeugung aus Windkraftanlagen bei geringem Ertrag pro 1 MW installierte Leistung aufweisen, wie z.B. Unstrut-Hainich-Kreis und Sömmerda in Thüringen. Mit

je 7,3 Tsd. Beschäftigten pro 1 TWh Wasserstoff liegen jedoch auch diese Kreise unter dem geringsten Wert für 2020.

Für die Beschäftigung aus Betrieb und Wartung wird für Wind- und PV-Anlagen der gleiche Multiplikator angenommen (vgl. Abschnitt 3.5), der auch über die Zeit konstant bleibt. Damit wird die regionale Verteilung ausschließlich durch die benötigten Stromerzeugungskapazitäten bestimmt, und die relativen Positionen der Regionen bleiben über die Zeit nahezu unverändert (vgl. Abbildung 9). Der Gesamtbedarf sinkt im Zeitablauf, jedoch nicht so stark wie bei Produktion und Installation. Während in den Kreisen mit dem höchsten Bedarf in 2020 knapp 630 Beschäftigte pro 1 TWh Wasserstoff benötigt werden, sind es in 2040 noch rund 520 Beschäftigte. In den effizientesten Kreisen sinkt der Bedarf von ca. 360 Beschäftigten pro 1 TWh Wasserstoff in 2020 auf knapp 260 Beschäftigte in 2040.

Abbildung 9: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen und zeitlichen Vergleich



Quelle: DIW Econ.

In der regionalen Verteilung fallen die Kreise in Nordrhein-Westfalen, in denen weder die Wind- noch die Sonnenverhältnisse besonders gut sind, noch stärker auf als bei der Beschäftigung aus Produktion und Installation. Da aber Wind- und PV-Anlagen den gleichen Multiplikator pro installierte Leistung haben und die Anlagenkosten keine Rolle mehr spielen, kommt auch der geringere Nutzungsgrad und damit der höhere Kapazitätsbedarf der PV-Anlagen voll zum Tragen. Die sonnenreichen Kreise in Süddeutschland liegen damit in der Mitte der Verteilung, während die windreichen Kreise mit relativ höheren Windpotentialen im Nordosten den geringsten Beschäftigungsbedarf aufweisen.

Da die regionale Verteilung des Beschäftigungsbedarfs durch die Stromerzeugung bestimmt wird, sind die regionalen Ergebnisse für synthetisches Methan und synthetische Liquids nahezu identisch mit den Ergebnissen für Wasserstoff. Aufgrund des höheren Strombedarfs sind die regionalen Unterschiede mit einer Spanne von ca. 5 Tsd. Beschäftigten für die Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von synthetischem Methan und ca. 5,5 Tsd. Beschäftigten für die Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von synthetischen Liquids noch deutlicher. Abbildungen zur regionalen Verteilung für alle Endenergieträger und alle Jahre finden sich in Anhang D.

4.4 Unsicherheit und Sensitivität

Die P2X-Technologiepfade befinden sich heute meist in einem frühen Stadium ihrer Entwicklung bzw. Implementierung. Das Kopernikus-Projekt „Power-to-X“ (2019, 133) kommt zu dem Schluss, dass der „technische Entwicklungsgrad der Gesamtverfahrenskette häufig noch bei TLR [sic] 2-4“ liegt [19]. Damit sind wesentliche Parameter wie Produktionskosten, typische Anlagenkonfiguration und Größe, Umfang der Automatisierung in Produktion und Betrieb sowie Effizienzen der Konversion von Energien entlang der P2X-Technologiepfade noch unsicher.

Im Folgenden wird für einige der in Abschnitt 3.5 dargestellten Parameter analysiert, wie eine Veränderung der Werte zu Veränderungen des Beschäftigungsbedarfs führen kann. Die Analyse erfolgt jeweils im Vergleich zum deutschen Durchschnitt 2020-2040.

Wirkungsgrad der Elektrolyse

Für diese Studie wurde ein konservativer Anstieg des Wirkungsgrades bei Elektrolyse von 65 % in 2020 auf 69 % in 2040 angenommen. IEA (2019) geht von einer schnelleren Effizienzsteigerung, so dass der Wirkungsgrad der Elektrolyse bereits 2030 69 % erreicht und bis 2040 auf 74 % steigt. Unter der Annahme dieser schnelleren Effizienzsteigerung reduziert sich der Strombedarf für 1 TWh Endenergieträger um 3 %. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, entfällt der größte Teil des Investitions- und Beschäftigungsbedarfs auf die Stromerzeugung, so dass sich diese Einsparung in einer Verringerung des Investitionsbedarfs, des Beschäftigungsbedarfs für Produktion und Installation sowie des Beschäftigungsbedarfs für Betrieb und Wartung um jeweils 2 % niederschlägt.

[19] Technologiereifegrade werden wie folgt definiert: TRL 1 – Grundprinzipien beobachtet, TRL 2 – Technologiekonzept formuliert, TRL 3 – Experimenteller „Proof of Concept“, TRL 4 – Technologie im Labor validiert, TRL 5 – Technologie in relevantem Umfeld validiert (industriell relevantes Umfeld bei Schlüsseltechnologien), TRL 6 – Technologie demonstriert in relevanter Umgebung (industriell relevante Umgebung im Fall von Schlüsseltechnologien), TRL 7 – Systemprototypdemonstration in Betriebsumgebung, TRL 8 – System vollständig und genehmigt, TRL 9 – Tatsächliches System, das sich in seiner Betriebsumgebung bewährt hat. Übersetzt nach Raffaini & Manfredi (2022).

Nutzungsgrad der P2X-Anlagen

Während Abweichungen in der tatsächlichen Entwicklung der Wirkungsgrade der P2X-Anlagen nur zu geringen Änderungen des Investitions- und Beschäftigungsbedarfs führen würden, haben die Annahmen zum Nutzungsgrad bzw. zur Auslastung der Anlagen (Volllaststunden) deutlich größere Auswirkungen.

Volllaststunden sind ein Maß für die Auslastung einer Anlage und bezeichnen die kumulierte Anzahl der Stunden, in denen eine Anlage rechnerisch mit voller Kapazität (ihrer Nennleistung) betrieben wird. Dabei ist der Betrieb einer Anlage über zehn Stunden mit 50 % der Leistung identisch mit einem Betrieb über fünf Stunden mit voller Nennleistung.

Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, folgen die Berechnungen der Annahme von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018) und unterstellen für alle P2X-Anlagen (Elektrolyse, Methanisierung und Fischer-Tropsch-Verfahren) einen Nutzungsgrad von 8.000 Volllaststunden, was einer Auslastung von 91 % bzw. einem ununterbrochenen Betrieb über das ganze Jahr bis auf geplante Wartungen und (wenige) ungeplante Ausfälle entspricht.[20]

In der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi 2020) wird dagegen von einer Auslastung der Elektrolyseure von 4.000 Volllaststunden ausgegangen. Unter der gleichen Annahme für die Elektrolyse, die Methanisierung und das Fischer-Tropsch-Verfahren müssen die entsprechenden Anlagenkapazitäten verdoppelt werden, um die Produktion von 1 TWh Endenergieträger zu erreichen. Dies hat Auswirkungen auf Investitionen und Beschäftigung, allerdings nur in begrenztem Umfang, da der Großteil der Investitionen auf die Stromerzeugung entfällt (vgl. Tabelle 6). Die Gesamtinvestitionen steigen für Wasserstoff um 8 %, für synthetisches Methan um 13 % und für synthetische Liquids um 12 %. Die Auswirkungen auf die Beschäftigung in der Produktion und Installation sind ähnlich: der Bedarf steigt um 9 % für Wasserstoff, um 14 % für synthetisches Methan und um 13 % für synthetische Liquids. Trotz des insgesamt höheren Investitions- und Beschäftigungsanteils der P2X-Phase bei der Produktion von synthetischen Liquids ist der Bedarfsanstieg etwas geringer als bei synthetischem Methan, weil der Großteil des Bedarfs auf die DAC-Anlagen entfällt.

Da die P2X-Anlagen in Betrieb und Wartung arbeitsintensiver sind, steigt der Gesamtbeschäftigungsbedarf für Betrieb und Wartung stärker an: bei der Wasserstofferzeugung um 22 %, bei der Produktion von synthetischem Methan um 34 % und bei der Produktion von synthetischen Liquids um 36 %.

[20] Ein Normaljahr hat 8760 Stunden.

Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse, Reduktion des Nutzungsgrades der P2X-Anlagen

Durschschnitt für 2030 - 2040		Einheit	Wasser-stoff	Synth. Methan	Synth. Liquids	Wasser-stoff	Synth. Methan	Synth. Liquids
				Ergebnisse			Abweichung von Referenz	
Kapazitäten	Fischer-Tropsch	MW	-	-	250	-	-	100%
	Methanisierung	MW	-	250	-	-	100%	-
	Elektrolyse	MW	250	313	313	100%	100%	100%
	Wind Onshore	MW	276	360	370	-	-	-
	PV	MW	809	1 055	1 083	-	-	-
Investitionen	Fischer-Tropsch	Mio. Euro	-	-	164	-	-	100%
	Methanisierung	Mio. Euro	-	159	-	-	100%	-
	Direct Air Capture	Mio. Euro	-	150	253	-	-	-
	Elektrolyse	Mio. Euro	132	165	165	100%	100%	100%
	Wind Onshore	Mio. Euro	290	377	388	-	-	-
	PV	Mio. Euro	443	577	594	-	-	-
	Gesamt	**Mio. Euro**	**865**	**1 428**	**1 564**	**8%**	**13%**	**12%**
Beschäftigung aus Produktion und Installation	Fischer-Tropsch	FTE	-	-	1 832	-	-	100%
	Methanisierung	FTE	-	1 766	-	-	100%	-
	Direct Air Capture	FTE	-	1 525	2 569	-	-	-
	Elektrolyse	FTE	1 349	1 686	1 686	100%	100%	100%
	Wind Onshore	FTE	3 025	3 942	4 050	-	-	-
	PV	FTE	4 091	5 329	5 479	-	-	-
	Gesamt	**FTE**	**8 465**	**14 247**	**15 616**	**9%**	**14%**	**13%**
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung	Fischer-Tropsch	FTE	-	-	345	-	-	100%
	Methanisierung	FTE	-	264	-	-	100%	-
	Direct Air Capture	FTE	-	50	84	-	-	-
	Elektrolyse	FTE	188	235	235	100%	100%	100%
	Wind Onshore	FTE	83	108	111	-	-	-
	PV	FTE	243	316	325	-	-	-
	Gesamt	**FTE**	**514**	**974**	**1 100**	**22%**	**34%**	**36%**

Quelle: DIW Econ.

Anlagenpreise (CAPEX) für Direct Air Capture

Wie in Abschnitt 3 erläutert, erfolgt die Bestimmung der Beschäftigungswirkung aus der Produktion und Installation der Anlagen über ein Input-Output-Modell. Zwischen der Höhe der Investitionen und der Beschäftigung wird damit ein linearer Zusammenhang unterstellt: eine Verdopplung der notwendigen Investitionen je Anlage bedeutet auch eine Verdoppelung der für die Produktion und Installation der Anlage benötigten Beschäftigung.

Projektionen zukünftiger Anlagepreise, die heute einen sehr geringen technischen Reifegrad aufweisen, sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Aufgrund von Lern- und Skaleneffekten hangt die Entwicklung der Anlagenpreise wie bei allen Produkten von der kumulierten Produktionsmenge ab. Jede zusätzliche produzierte Einheit löst einen Lernprozess und damit eine Rationalisierung der Produktion und ein „learning-by-doing“ aus, abgebildet durch die Lernrate oder die sogenannte Progress Ratio[21].

[21] Die Progress Ratio gibt an, wie sich die Herstellungskosten eines Produkts bei jeder Verdoppelung der Produktionsmenge verändern. Sie liegt häufig zwischen 70 % und 80 %, d.h. bei jeder Verdoppelung der Gesamtproduktion im Laufe der Zeit sinken die Herstellungskosten um 20 % bis 30 %.

Da die Lernraten, die kumulierten Produktionsmengen und damit die Progress Ratio der neuen Produkte unsicher sind, sind auch die Beschäftigungseffekte unsicher. Dies gilt insbesondere für DAC-Anlagen, deren installierte Kapazitäten bisher nur aus Labor- und Pilotanlagen bestehen. In der vorliegenden Analyse werden konservative Annahmen zu den Investitionskosten von DAC-Anlagen und deren zukünftiger Entwicklung von 896 Euro pro Tonne CO_2 in 2020 und einer Reduktion auf 626 Euro pro Tonne CO_2 in 2040 getroffen. Die Danish Energy Agency (2024) geht dagegen bereits heute von etwas geringeren Kosten und einer deutlich höheren Progress Ratio aus, so dass die Investitionskosten in 2020 bei 832 Euro pro Tonne CO_2, in 2030 bei 375 Euro pro Tonne CO_2 und in 2040 bei nur 263 Euro pro Tonne CO_2 liegen.[22]

Unter der Annahme der Danish Energy Agency liegen die Investitionen und damit die Beschäftigung aus der Produktion und Installation der DAC-Anlagen um rund 35 % unter dem in Abschnitt 4.1 dargestellten Referenzwert. Für die gesamte Anlagenkonfiguration bedeutet dies eine Verringerung des Beschäftigungsbedarfs für die Produktion und Installation von P2X- und Stromerzeugungsanlagen um 4 % für synthetisches Methan und um 6 % für synthetische Liquids.

5. Zusammenfassung

Das Ziel der Dekarbonisierung Deutschlands bis 2045 erfordert eine umfangreiche Transformation des Energiesystems. Bisher genutzte fossile Primärenergieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl werden nicht weiter zur Verfügung stehen können und müssen u.a. durch aus regenerativem Strom erzeugten (grünen) Wasserstoff und aus ihm erzeugte synthetische Energieträger ersetzt werden.

Noch steht der Aufbau einer Infrastruktur für Produktion, Distribution und Verwendung von grünem Wasserstoff in Deutschland ganz am Anfang. Der notwendige Ausbau von Anlagen zur Produktion von Wasserstoff bzw. von synthetischen Energieträgern wird zu hohen Investitionsbedarfen führen und (Upstream) Beschäftigungseffekte in den Sektoren der Kapitalgüterindustrie auslösen. Weiterhin wird es einen Bedarf an Fachkräften für den Betrieb der Anlagen geben.

Die jeweiligen Beschäftigungsbedarfe werden maßgeblich davon abhängen, welche Endenergieträger einzelne Sektoren in welchem Umfang zukünftig nachfragen werden. Die Beschäftigungseffekte werden zudem davon abhängen, ob diese Energieträger in Deutschland oder im Ausland erzeugt werden. Weiterhin von Bedeutung wird sein, ob die entlang der P2X-Technologiekette (in Deutschland oder der

[22] Die von DEA angegebenen Stunden-Jahreswerte sind auf Basis des von DEA angegebenen Nutzungsgrades in Jahreswerte umgerechnet.

EU) genutzten Anlagen in Deutschland produziert werden können und so heimische Wertschöpfung generieren.

Wie gezeigt läge der Beschäftigungsbedarf für die vollständig inländische Produktion von 1 TWh Endenergie auf Wasserstoffbasis im Durchschnitt bei etwa acht bis 14 Tsd. FTE im Bereich der Kapitalgüterproduktion und würde zwischen ca. 400 und ca. 800 Arbeitsplätze in Betrieb und Wartung der P2X-Technologiekette erzeugen. Die Beschäftigungseffekte nehmen mit der Zeit ab und sind regional sehr heterogen. Während die Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff in Norddeutschland bereits heute gegen 8 Tsd. Beschäftigte für Produktion und Installation der Anlagen benötigt, sind es in Westdeutschland bis zu 12 Tsd. Beschäftigte. Wie erwartet, sind es die windreichen Regionen, die sich besonders gut für den Ausbau der erneuerbaren Energien eignen, die Wasserstoff und seine Derivate am effizientesten produzieren können. Interessant ist jedoch, dass einige sonnenreiche Regionen in Süddeutschland ebenfalls einen komparativen Vorteil im Ausbau der P2X-Kapazitäten aufweisen, allerdings weniger in deren Betrieb.

Die quantitative Einordnung der Ergebnisse zeigt auch, dass es aus heutiger Sicht unrealistisch erscheint, dass Deutschland alle derzeit diskutierten Sektoren Stahl, Chemie, Glas und Transport (LKW, Schiffs- und Flugverkehr) mit heimisch erzeugten P2X-Produkten dekarbonisieren kann. Die dafür benötigten Mengen übersteigen 300 TWh Wasserstoff und würden einen Ausbau von Wind- und PV-Kapazitäten von insgesamt über 350 GW in den nächsten 20 Jahren erfordern, was mehr als eine Verdreifachung der heute installierten Leistung allein für die P2X-Produktion bedeutet. Dies deutet darauf hin, dass der Import von P2X oder von Grundstoffen aus der Stahl-, Chemie- und Glasindustrie eine wichtige Rolle spielen wird und gegebenenfalls andere Dekarbonisierungsoptionen genutzt werden.

Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen. 2021. *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019.*

Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. 2018. „The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels." https://www.agora-energiewende.org/publications/the-future-cost-of-electricity-based-synthetic-fuels-2.

BDEW. 2020. „Effizienzsteigerung bei der Wasserstofferzeugung." https://www.bdew.de/energie/effizienzsteigerung-bei-der-wasserstofferzeugung/.

BMAS. 2022. *Fachkräftestrategie der Bundesregierung.* Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Oktober.

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.

BMWi. 2020. *Die Nationale Wasserstoffstrategie.* Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMWK. 2024. *Erneuerbare Energien.* https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html.

BMWK. 2023. *Stahlindustrie.* Bundesminsiterium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/branchenfokus-stahl-und-metall-01.html.

Bundesnetzagentur. 2022. „Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022." https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smard.html.

Cameron, Lachlan, und Bob van der Zwaan. 2015. „Employment factors for wind and solar energy technologies: A literature review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45 : 160-172.

Chemie Schule. 2023. „Fischer-Tropsch-Synthese." https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Fischer-Tropsch-Synthese?utm_content=cmp-true.

Cleanthinking.de. 2020. *Enzym-Reaktor der METHANOLOGY AG wandelt Wasser und CO2 in Methanol.* https://www.cleanthinking.de/enzym-reaktor-der-methanology-ag-wandelt-wasser-und-co2-in-methanol/.

Cosmos. 2023. „Sabatier-Prozess." https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sabatier-Prozess?utm_content=cmp-true.

Danish Energy Agency. 2024. *Technology Data for Carbon Capture, Transport and Storage.* Februar.

DENA. 2018. „Power to X: Technologien." https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf.

DiLiCo. 2023. „Elektrolyseure - Funktionsweise, Typen und die Rolle der Stromstärke und Zellspannung." https://www.dilico.de/de/elektrolyseure.php.

EASA. kein Datum. *Fit for 55 and ReFuelEU Aviation.* https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation.

Edisom. 2022. „Elektrolyseur erreicht Rekord-Wirkungsgrad." https://edison.media/energie/elektrolyseur-erreicht-rekord-wirkungsgrad/25226262/.

EMCEL. 2021. „Welche Vorteile bietet die Hochtemperatur-Elektrolyse?" https://emcel.com/de/hochtemperatur-elektrolyse/.

Energy HQ. 2019. „Upstream? Midstream? Downstream? What´s the difference?" https://energyhq.com/2017/04/upstream-midstream-downstream-whats-the-difference/.

ETUI. 2021. „Employment effects of the renewable energy transition in the electricity sector." https://www.etui.org/sites/default/files/2021-12/Employment%20effects%20of%20the%20renewable%20energy%20transition%20in%20the%20electricity%20sector-An%20input-output%20approach-2021.pdf.

Fraunhofer ISE. 2021a. „Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems."

Fraunhofer ISE. 2021b. „Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien."

GWA. 2023. *Global Wind Atlas.* https://globalwindatlas.info/en/.

IEA. 2024. *Direct Air Capture.* 25. April. https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture.

—. 2019. „The Future of Hydrogen - Annex." https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen.

Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 2021. „Kohlendioxidausstoß bei Zementproduktion kann langfristig drastisch reduziert werden.“ https://presse.uni-mainz.de/kohlendioxidausstoss-bei-zementproduktion-kann-langfristig-drastisch-reduziert-werden/.

KIT. kein Datum. *Power-to-Gas – die Methanisierungsanlagen.* Karlsruher Institut für Technik. https://www.elab2.kit.edu/power2gas.php.

Kopernikus-Projekt „Power-to-X“. 2019. „Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien.“ https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf.

Kopernikus-Projekt Ariadne. 2021. „Ariadne-Report: Deutschland auf dem zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich.“

Max-Plank-Gesellschaft. 2017. „Neue Möglichkeiten der Treibstoffproduktion aus unkonventionellen Ausgangsstoffen durch 3D-Bildgebung auf Nanaoskala.“ https://www.mpg.de/11725569/_jb_2017.

McCoy, J., D. Davis, E. Mayfiels, und M. Brear. 2022. „Net Zero Australia. Employment Impacts – Modelling Methodology & Preliminary Results.“

NABU. 2021. *Studie: Ammoniak als Schiffstreibstoff. Risiken und Perspektiven - Zusammenfassung.* Berlin: Naturschutzbund Deutschland (NABU) e.V. https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-studie-ammoniak-schiffstreibstoff.pdf.

Navigant Energy Germany. 2020. *Energiewende in der Industrie: Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie.* Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Raffaini, Pietro, und Luigi Manfredi. 2022. *Endorobotics - Design, R&D and Future Trends.* Academic Press. doi:https://doi.org/10.1016/C2019-0-04341-5.

Rhodium Group. 2020. „Capturing New Jobs - The employment opportunities associated with scale-up of Direct Air Capture (DAC) technology in the US.“ https://rhg.com/wp-content/uploads/2020/06/Capturing-New-Jobs-Employment-Opportunities-from-DAC-Scale-Up.pdf.

Rio Tinto. 2022. *Carbon-free aluminium smelting is a step closer.* 4. Februar. https://www.riotinto.com/en/news/stories/aluminium-emissions-free.

RP-Energie-Lexikon. 2023. „Methanisierung.“ https://www.energie-lexikon.info/methanisierung.html.

Schumm, Leon, Falk Birett, Andreas Hofrichter, Valentin Heusgen, und Stefan Rahim. 2024. *Wasserstoffatlas (Hydrogen Atlas) Dataset. Version v6.* 22. Januar. https://zenodo.org/records/8207466.

Sensfuß, F., B. Lux, Ch. Bernath, Ch. Kiefer, B. Pfluger, Ch. K., K. Franke, et al. 2022. „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland.“ https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/.

Solarenergie Förderverein. 2007. „Herstellung von flüssigen Kraftstoffen aus atmosphärischem Kohlendioxid.“ https://www.sfv.de/artikel/herstellung_von_fluessigen_kraftstoffen_aus_atmosphaerischem_kohlendioxid.

Solarenergie.de. 2022. „Was ksotet Wasserstoff?“ https://solarenergie.de/hintergrundwissen/wasserstoff/preis.

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

SWM. 2021. „Erdgasbeschaffenheit: Jahresmittel für 2020.“ https://www.swm-infrastruktur.de/dam/swm-infrastruktur/dokumente/gas/netzstrukturdaten/erdgasbeschaffenheit-jahresmittel-2020.pdf.

TAZ. 2023. „Kein Ökostrom für Ökokerosin.“ https://taz.de/!5703849/.

Trading Economics. 2023. „EU Natural gas Price.“ https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas.

Trinomics and LBST. 2020. „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans. Final Report.“ https://www.lei.lt/wp-content/uploads/2020/09/Final-Report-Hydrogen-in-NECPs-28-8-2020-ID-9474232.pdf.

TÜV Nord. kein Datum. „Wasserstoffspeicherung: Möglichkeiten im Überblick.“ https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoffspeicherung/.

Umweltbundesamt. 2024. *Energieverbrauch und Kraftstoffe.* 5. März. https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs.

Umweltbundesamt. kein Datum. *Was ist das Haber-Bosch-Verfahren?* https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/verursacher/energiewirtschaft-industrie/was-ist-das-haber-bosch-verfahren.

Wiley Online Library. 2019. „CO2-neutrale Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus dezentralen modularen Anlagen: Status und Perspektiven.“ https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.201900120.

Young, J., N. McQueen, C. Charalambous, S. Foteinis, O. Hawrot, M. Ojeda, H. Pilorge, et al. 2023. „The cost of direct air capture and storage can be reduced via strategic deployment but is unlikely to fall below stated cost targets.“ *One Earth* 6: 899-917.

Zang, G., P. Sun, A. A. Elgowainy, A. Bafana, und Wang M. 2021. „Performance and cost analysis of liquid fuel production from H2 and CO2 based on the Fischer-Tropsch process.“ *Journal of CO2 Utilization* 46: 101459.

Zukunft Gas. 2023. „Gas – wesentlicher Energieträger für die Produktion von Glas.“ https://gas.info/industrie/gas-fuer-glasindustrie.

Anhang A. Input-Output-Analyse

Die Schätzung der volkswirtschaftlichen Effekte der Investitionen in P2X-Technologien 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 auf die Beschäftigung wird anhand der direkten und indirekten Einzeleffekte ermittelt:

- Der ***direkte Effekt*** erfasst die unmittelbare Wirkung der Planung, Herstellung und Installation von P2X- und Stromerzeugungsanlagen auf die Beschäftigung.
- Der ***indirekte Effekt*** erfasst die Effekte auf die Beschäftigung, die sich aus der Nachfrage der Unternehmen, die P2X- und Stromerzeugungsanlagen planen, herstellen und installieren, nach

Diensten und Zulieferungen ergeben (bspw. durch die Ausgaben für Metallerzeugnisse oder Transportleistungen).

Anhang B. Technische Annahmen

Tabelle 7: Zuordnung der Bundesländer nach Sonnen- und Windverhältnissen

Bundesland	PV	Wind
Baden-Württemberg	Süden	Binnenland
Bayern	Süden	Binnenland
Berlin	Mitte	Binnenland
Brandenburg	Mitte	Norddeutschland
Bremen	Norden	Binnenland
Hamburg	Norden	Binnenland
Hessen	Mitte	Binnenland
Mecklenburg-Vorpommern	Norden	na - Zuordnung auf Kreisebene
Niedersachsen	Norden	na - Zuordnung auf Kreisebene
Nordrhein-Westfalen	Norden	Norddeutschland
Rheinland-Pfalz	Mitte	Binnenland
Saarland	Süden	Binnenland
Sachsen	Mitte	Norddeutschland
Sachsen-Anhalt	Mitte	Norddeutschland
Schleswig-Holstein	Norden	na - Zuordnung auf Kreisebene

Quelle: Eigene Zuordnung basierend auf (Fraunhofer ISE 2021b), (GWA 2023).

Tabelle 8: Zuordnung der Kreise in ausgewählten Bundesländen nach Windverhältnissen

Bundesland	Kreis	Gruppe
MV	Rostock, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Schwerin, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Mecklenburgische Seenplatte	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Landkreis Rostock	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Vorpommern-Rügen	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Nordwestmecklenburg	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Vorpommern-Greifswald	Küstennahe und windreiche Standorte
MV	Ludwigslust-Parchim	Norddeutschland
NI	Braunschweig, Kreisfreie Stadt	Norddeutschland
NI	Salzgitter, Kreisfreie Stadt	Norddeutschland
NI	Wolfsburg, Kreisfreie Stadt	Norddeutschland
NI	Gifhorn	Norddeutschland
NI	Goslar	Norddeutschland
NI	Helmstedt	Norddeutschland
NI	Northeim	Norddeutschland
NI	Peine	Norddeutschland
NI	Wolfenbüttel	Norddeutschland
NI	Göttingen	Norddeutschland
NI	Diepholz	Norddeutschland
NI	Hameln-Pyrmont	Norddeutschland
NI	Hildesheim	Norddeutschland
NI	Holzminden	Norddeutschland
NI	Nienburg (Weser)	Norddeutschland
NI	Schaumburg	Norddeutschland

NI	Region Hannover	Norddeutschland
NI	Celle	Norddeutschland
NI	Cuxhaven	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Harburg	Norddeutschland
NI	Lüchow-Dannenberg	Norddeutschland
NI	Lüneburg, Landkreis	Norddeutschland
NI	Osterholz	Norddeutschland
NI	Rotenburg (Wümme)	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Heidekreis	Norddeutschland
NI	Stade	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Uelzen	Norddeutschland
NI	Verden	Norddeutschland
NI	Delmenhorst, Kreisfreie Stadt	Norddeutschland
NI	Emden, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Oldenburg (Oldenburg), Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Osnabrück, Kreisfreie Stadt	Norddeutschland
NI	Wilhelmshaven, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Ammerland	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Aurich	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Cloppenburg	Norddeutschland
NI	Emsland	Norddeutschland
NI	Friesland (DE)	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Grafschaft Bentheim	Norddeutschland
NI	Leer	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Oldenburg, Landkreis	Norddeutschland
NI	Osnabrück, Landkreis	Norddeutschland
NI	Vechta	Norddeutschland
NI	Wesermarsch	Küstennahe und windreiche Standorte
NI	Wittmund	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Flensburg, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Kiel, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Lübeck, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Neumünster, Kreisfreie Stadt	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Dithmarschen	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Herzogtum Lauenburg	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Nordfriesland	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Ostholstein	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Pinneberg	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Plön	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Rendsburg-Eckernförde	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Schleswig-Flensburg	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Segeberg	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Steinburg	Küstennahe und windreiche Standorte
SH	Stormarn	Küstennahe und windreiche Standorte

Anmerkung: MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, SH = Schleswig-Holstein.

Quelle: Eigene Zuordnung basierend auf (GWA 2023).

Anhang C. Ergebnisse für Deutschland nach Jahren

Tabelle 9: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von Wasserstoff 2020 - 2040

		Einheit	2020	2030	2040
Erzeugung	Endprodukt	TWh	1.0	1.0	1.0
	Strom Input	TWh	1.5	1.5	1.4
	CO_2 Input	kt	-	-	-
Kapazitäten	Elektrolyse	MW	125	125	125
	Wind Onshore	MW	299	276	255
	PV	MW	834	809	786
Investitionen	Elektrolyse	Mio. Euro	92	64	43
	Wind Onshore	Mio. Euro	334	286	249
	PV	Mio. Euro	611	398	321
	Gesamt	**Mio. Euro**	**1 037**	**747**	**612**
Beschäftigung aus Produktion und Installation	Elektrolyse	FTE	939	651	434
	Wind Onshore	FTE	3 491	2 983	2 601
	PV	FTE	5 641	3 673	2 958
	Gesamt	**FTE**	**10 071**	**7 307**	**5 993**
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung	Elektrolyse	FTE	134	89	59
	Wind Onshore	FTE	90	83	76
	PV	FTE	250	243	236
	Gesamt	**FTE**	**473**	**415**	**371**

Quelle: DIW Econ.

Tabelle 10: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von synthetischem Methan 2020 - 2040

		Einheit	2020	2030	2040
Erzeugung	Endprodukt	TWh	1.0	1.0	1.0
	Wasserstoff (Input)	TWh	1.3	1.3	1.3
	Strom Input	TWh	2.0	1.9	1.9
	CO_2 Input	kt	198	198	198
Kapazitäten	Methanisierung	MW	125	125	125
	Elektrolyse	MW	156	156	156
	Wind Onshore	MW	389	359	332
	PV	MW	1 085	1 054	1 025
Investitionen	Methanisierung	Mio. Euro	90	79	69
	Direct Air Capture	Mio. Euro	177	149	124
	Elektrolyse	Mio. Euro	115	80	53
	Wind Onshore	Mio. Euro	435	372	325
	PV	Mio. Euro	796	519	418
	Gesamt	**Mio. Euro**	**1 613**	**1 198**	**989**
Beschäftigung aus Produktion und Installation	Methanisierung	FTE	1 001	875	772
	Direct Air Capture	FTE	1 803	1 512	1 260
	Elektrolyse	FTE	1 174	813	542
	Wind Onshore	FTE	4 544	3 887	3 394
	PV	FTE	7 341	4 786	3 859
	Gesamt	**FTE**	**15 863**	**11 874**	**9 827**
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung	Methanisierung	FTE	145	132	119
	Direct Air Capture	FTE	55	50	45
	Elektrolyse	FTE	167	111	74
	Wind Onshore	FTE	117	108	100
	PV	FTE	326	316	307
	Gesamt	**FTE**	**809**	**717**	**645**

Quelle: DIW Econ.

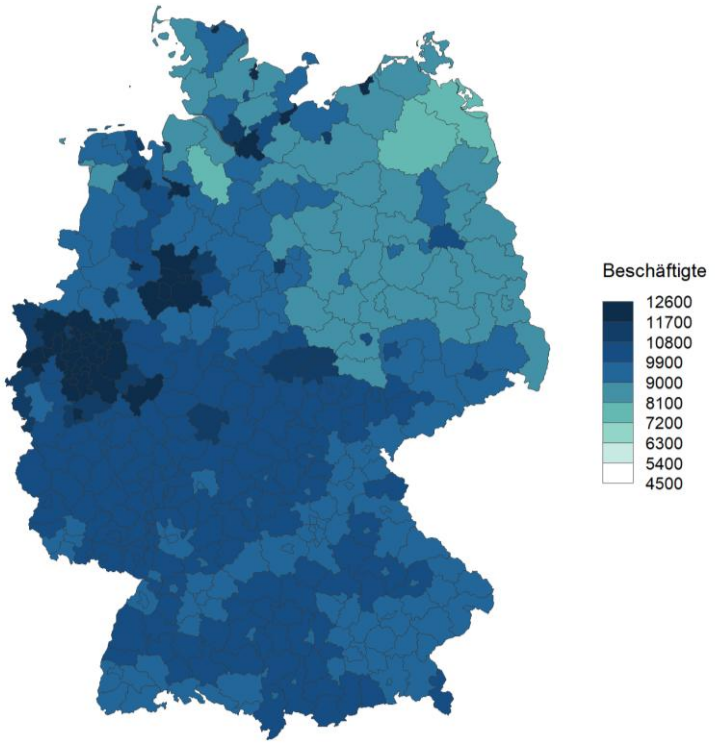
Tabelle 11: Investitionen und Beschäftigungseffekte der Erzeugung von synthetischen Liquids 2020 - 2040

		Einheit	2020	2030	2040
Erzeugung	Endprodukt	TWh	1.0	1.0	1.0
	Wasserstoff (Input)	TWh	1.3	1.3	1.3
	Strom Input	TWh	2.1	2.0	1.9
	CO_2 Input	kt	360	330	300
Kapazitäten	Fischer-Tropsch	MW	125	125	125
	Elektrolyse	MW	156	156	156
	Wind Onshore	MW	401	369	339
	PV	MW	1 120	1 083	1 047
Investitionen	Fischer-Tropsch	Mio. Euro	95	81	71
	Direct Air Capture	Mio. Euro	322	248	188
	Elektrolyse	Mio. Euro	115	80	53
	Wind Onshore	Mio. Euro	449	382	332
	PV	Mio. Euro	821	533	427
	Gesamt	**Mio. Euro**	**1 802**	**1 324**	**1 071**
Beschäftigung aus Produktion und Installation	Fischer-Tropsch	FTE	1 055	906	788
	Direct Air Capture	FTE	3 278	2 519	1 909
	Elektrolyse	FTE	1 174	813	542
	Wind Onshore	FTE	4 691	3 993	3 467
	PV	FTE	7 579	4 916	3 942
	Gesamt	**FTE**	**17 776**	**13 148**	**10 648**
Beschäftigung aus Betrieb und Wartung	Fischer-Tropsch	FTE	189	172	155
	Direct Air Capture	FTE	100	83	68
	Elektrolyse	FTE	167	111	74
	Wind Onshore	FTE	120	111	102
	PV	FTE	336	325	314
	Gesamt	**FTE**	**913**	**803**	**714**

Quelle: DIW Econ.

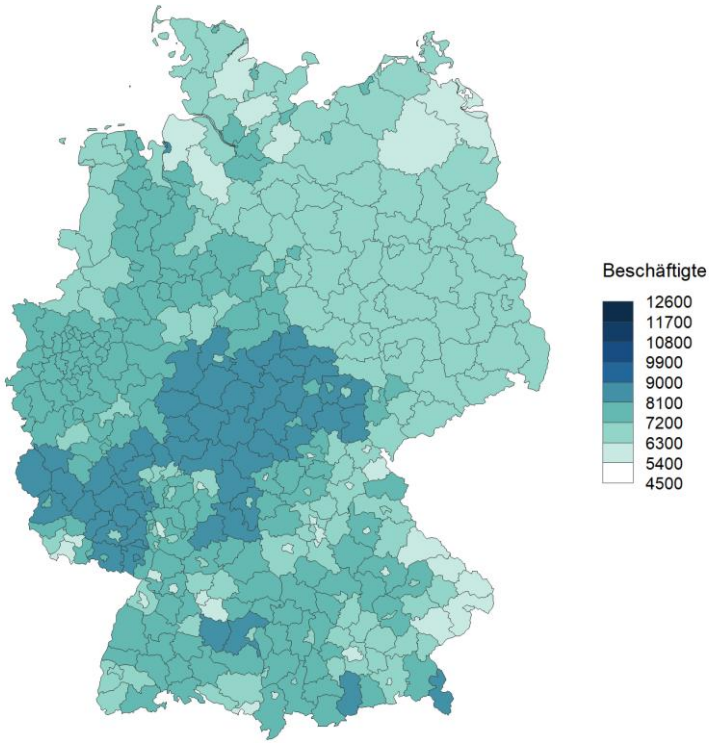
Anhang D. Ergebnisse regionales Benchmarking

Abbildung 10: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2020



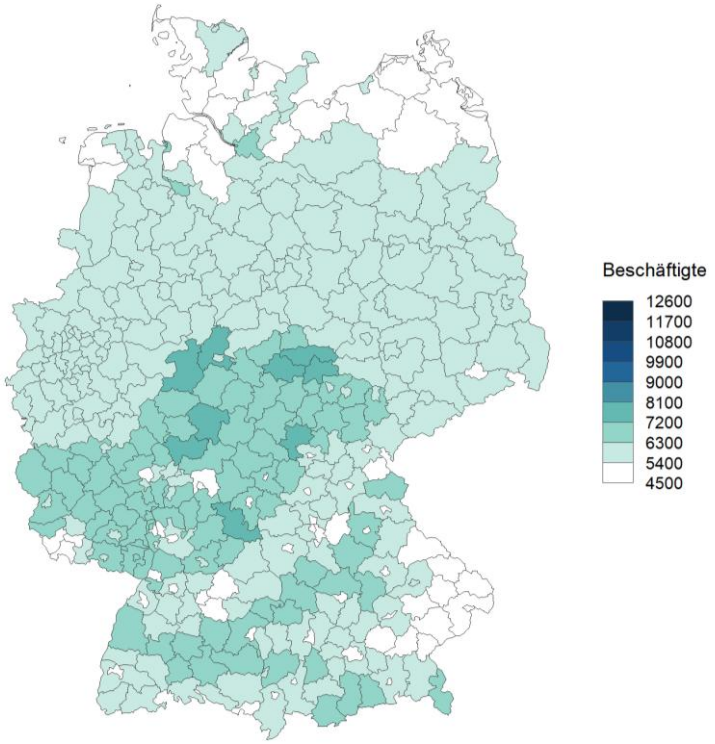
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 11: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2030



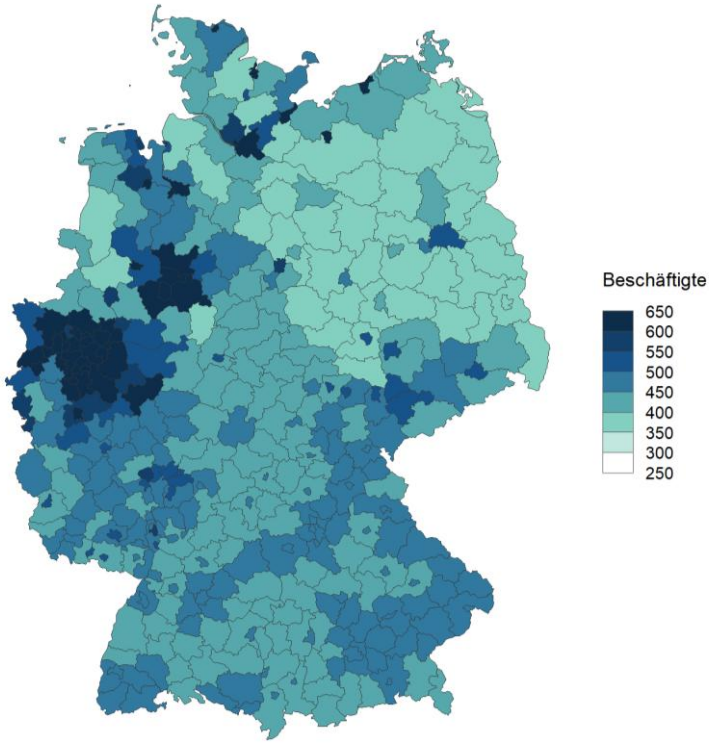
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 12: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2040



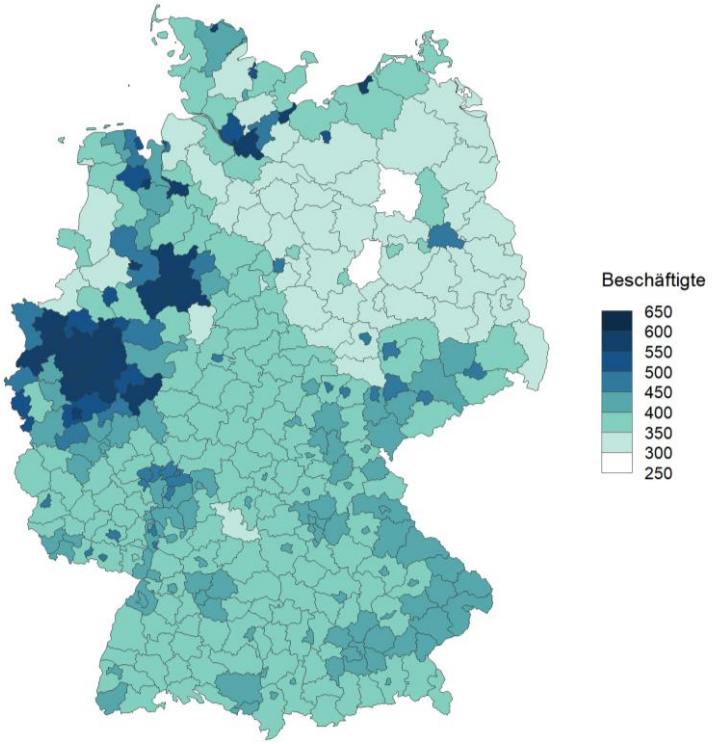
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 13: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2020



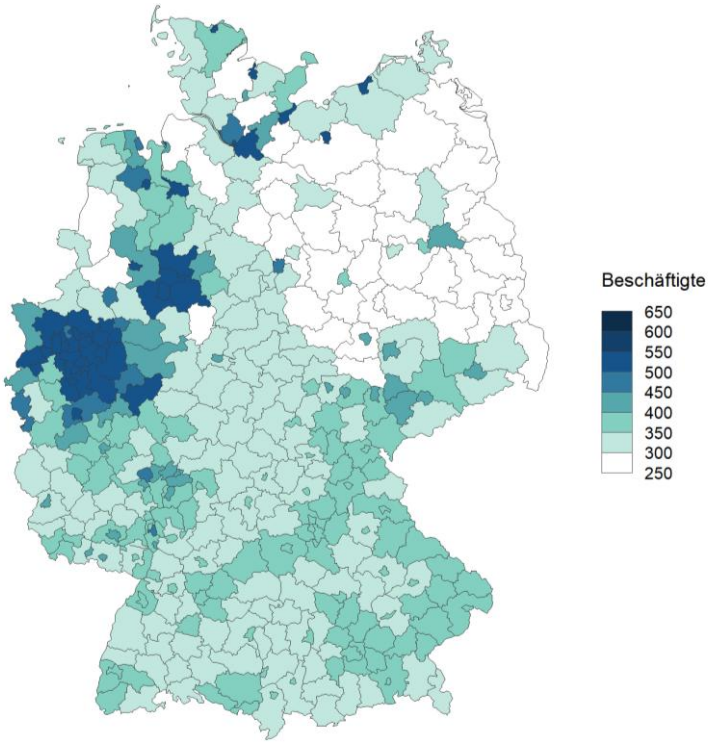
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 14: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2030



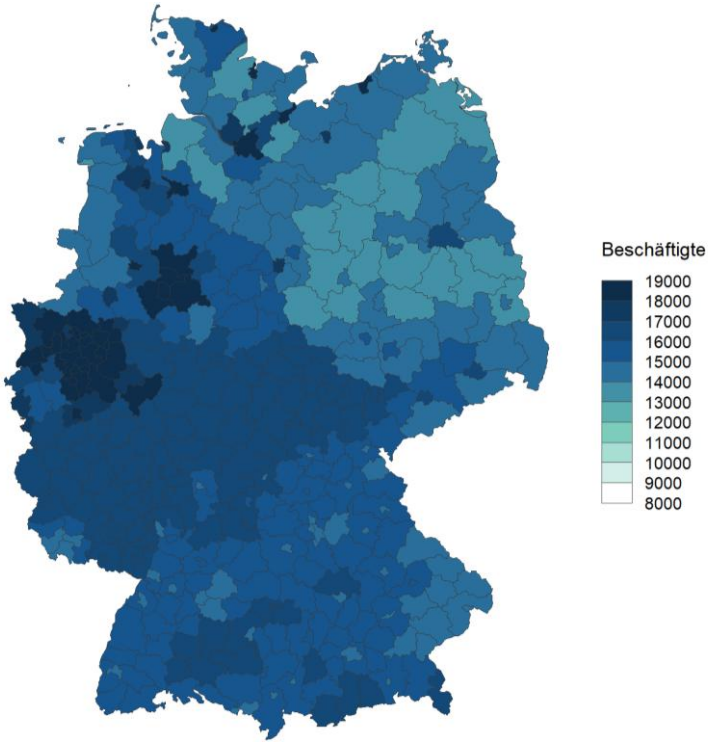
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 15: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh Wasserstoff im regionalen Vergleich, 2040



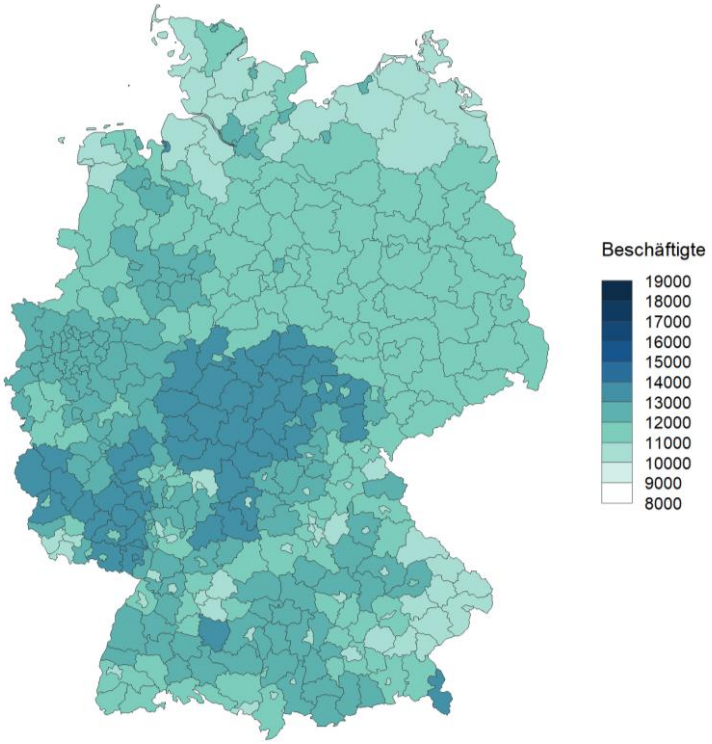
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 16: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2020



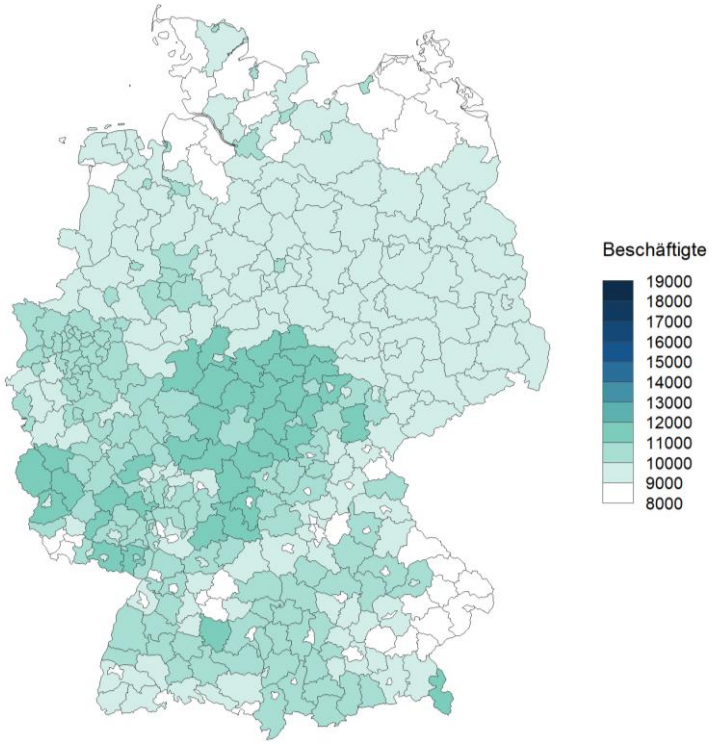
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 17: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2030



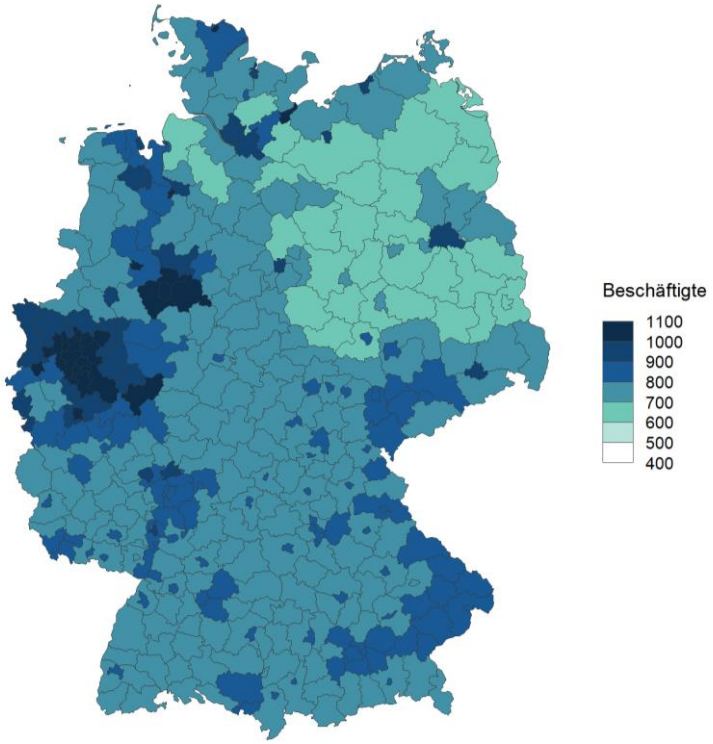
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 18: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2040



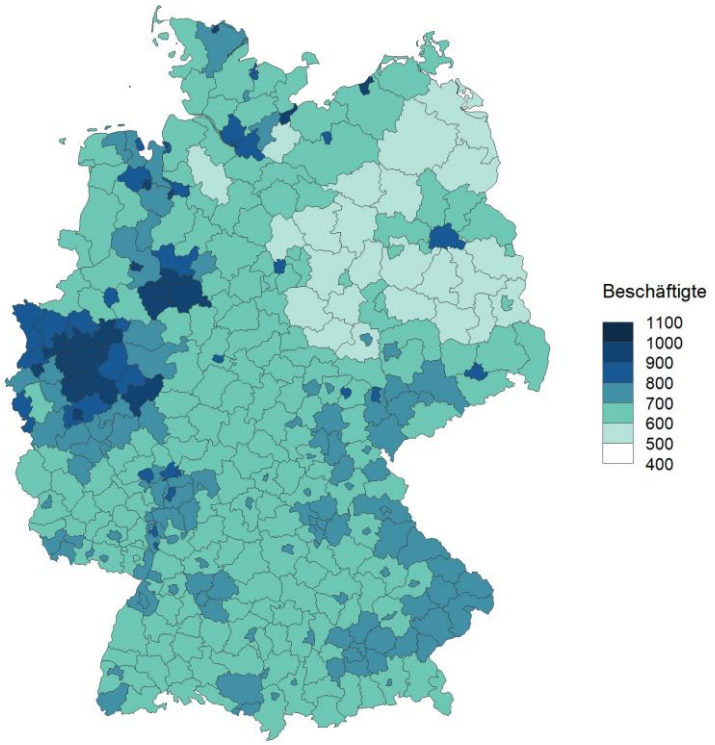
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 19: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2020



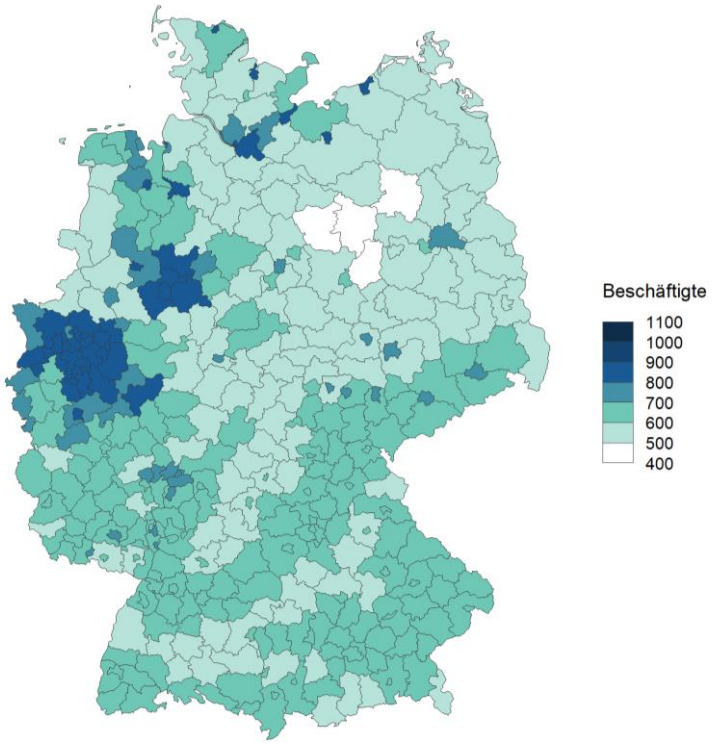
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 20: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2030



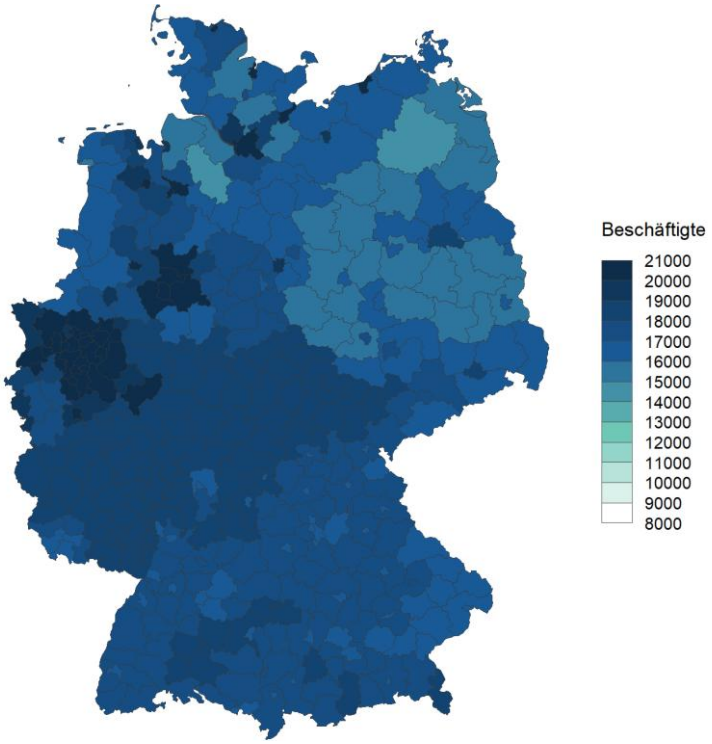
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 21: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischem Methan im regionalen Vergleich, 2040



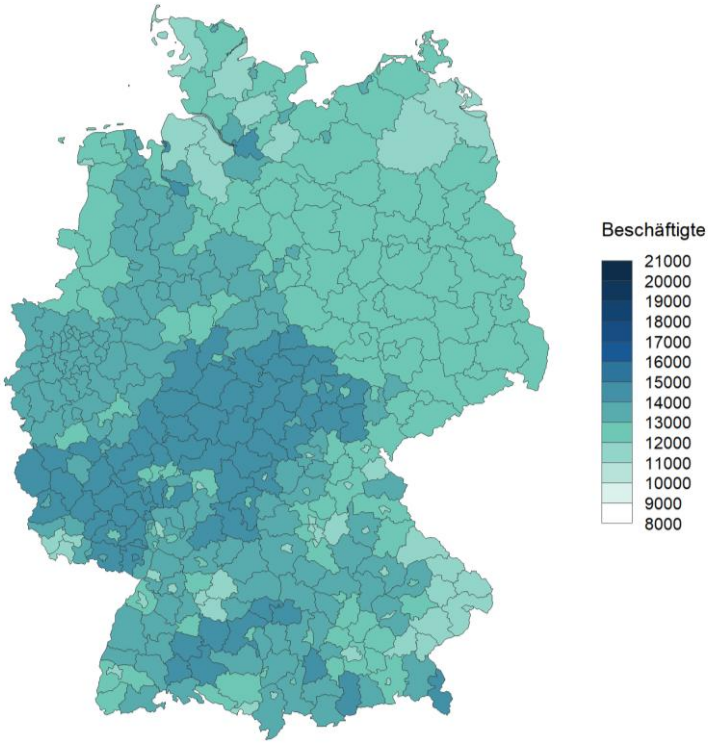
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 22: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2020



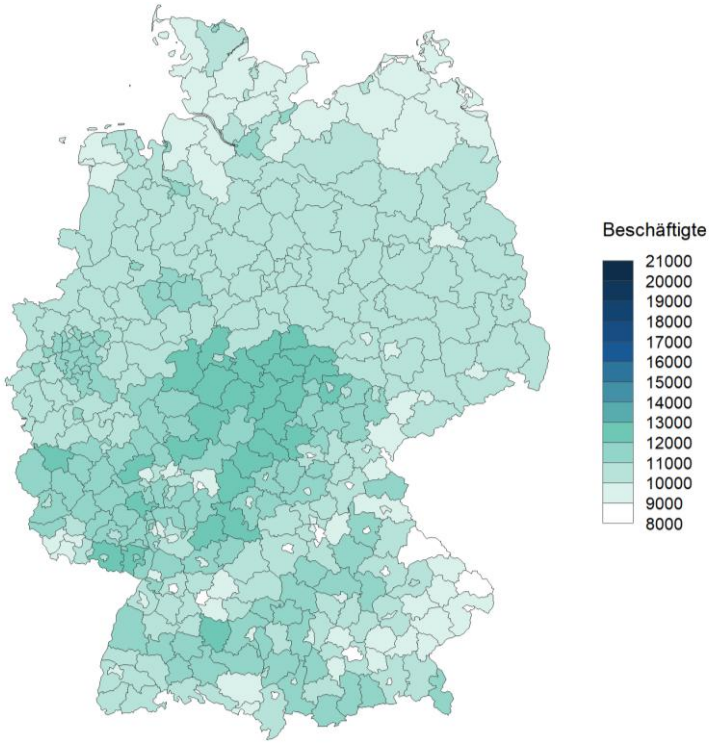
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 23: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2030



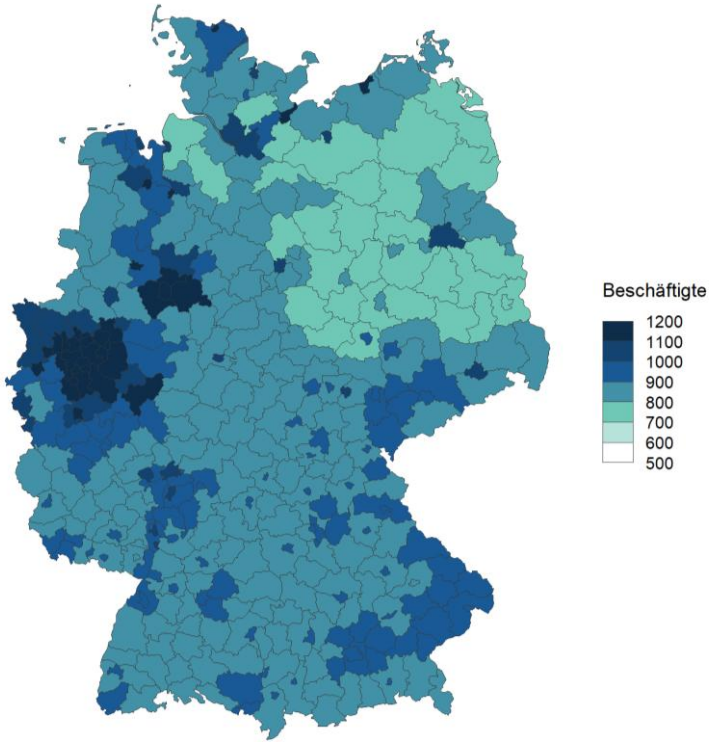
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 24: Beschäftigung aus Produktion und Installation der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2040



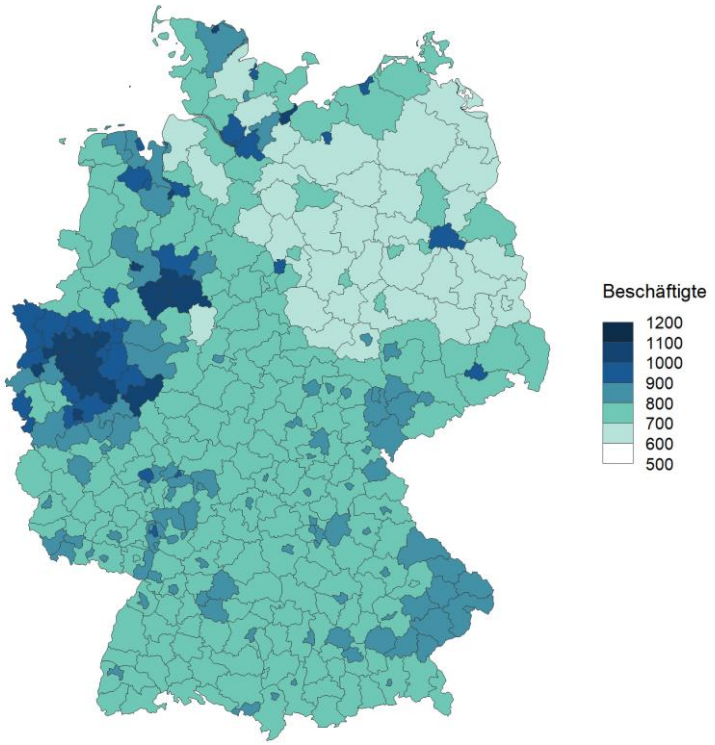
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 25: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2020



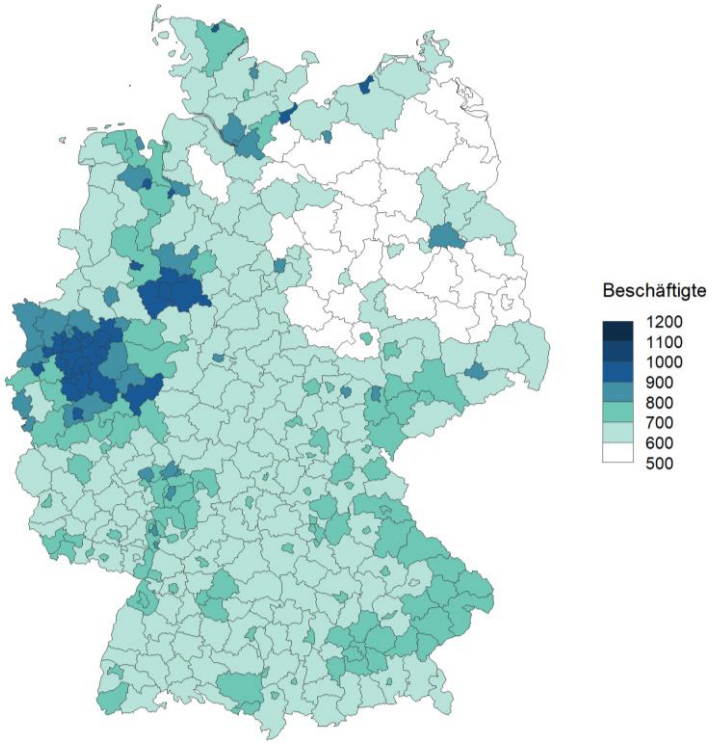
Quelle: DIW Econ.

Abbildung 26: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2030



Quelle: DIW Econ.

Abbildung 27: Beschäftigung aus Betrieb und Wartung der Anlagen für Erzeugung von 1 TWh synthetischen Liquids im regionalen Vergleich, 2040



Quelle: DIW Econ.