

Studie

Wertschöpfungs- und
Arbeitsmarktpotenziale
der Wasserstoffwirtschaft
in Ostdeutschland

Studie

Wertschöpfungs- und Arbeitsmarktpotenziale der Wasserstoffwirtschaft in Ostdeutschland

Im Auftrag von

Initiative für Wasserstoff in Ostdeutschland (IWO) e.V.

Durchgeführt von

WifOR Institute & Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Projektleitung

Alexander Spieß (AG), Florian Fickler (AN)

Autoren

Florian Fickler¹, Stefan Aschbrenner², Jochen Behrens², Annika Feith¹, Fabian Gauß², Dr. Rita Maguhlaria¹, Dr. Tom Smolinka², Dr. Sandra Zimmermann¹

¹WifOR Institute; ²Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Zitierempfehlung

Fickler, F.; Aschbrenner, S.; Behrens, J.; Feith, A.; Gauß, F.; Maguhlaria, R.; Smolinka, T.; Zimmermann, S. (2026): Wertschöpfungs- und Arbeitsmarktpotenziale der Wasserstoffwirtschaft in Ostdeutschland. Hrsg. von der Initiative für Wasserstoff in Ostdeutschland (IWO) e.V.

Veröffentlicht

16. September 2026

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	4
1 Einleitung	6
2 Markthochlauf für Elektrolyseure im Kontext der Wasserstoffwirtschaft	8
3 Elektrolyseure als Schlüsseltechnologie und Wertschöpfungssystem.....	15
3.1 Technologieanalyse	15
3.2 Sektorale Produktionsstruktur der Elektrolyseurherstellung	21
4 Ostdeutschland als Produktions- und Zulieferstandort	24
4.1 Aktuelle Hersteller- und Zulieferlandschaft in Ostdeutschland	24
4.2 Regionale Cluster und Spezialisierungspotenziale	24
5 Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale bis 2045	28
5.1 Szenarien zu Marktanteilen in der Elektrolyseurproduktion für Ostdeutschland	28
5.2 Wertschöpfungspotenziale und regionale Lieferketten.....	30
5.3 Beschäftigungspotenziale und Qualifikationsprofile	34
6 Resilienz industrieller Wertschöpfungsketten.....	40
6.1 Globale Marktdynamik und geopolitische Verwerfungen.....	40
6.2 Das Zusammenspiel von Materialrisiken und Fachkräfteverfügbarkeit.....	41
6.3 Der geopolitische und industriepolitische Rahmen.....	42
6.4 Strategien zur aktiven Resilienzstärkung.....	43
7 Fazit und strategische Handlungsfelder	45
8 Literatur.....	47
Abkürzungsverzeichnis	50
Abbildungsverzeichnis.....	52
Tabellenverzeichnis	55
Anhang	57

Executive Summary

Die Studie Wertschöpfungs- und Arbeitsmarktpotenziale der Wasserstoffwirtschaft in Ostdeutschland untersucht die Chancen, die für Ostdeutschland in der Herstellung und dem Export von Elektrolyseuren und zugehörigen Komponenten in einem globalen Markt bestehen. Die Studie ergänzt damit eine wichtige industrielle und volkswirtschaftliche Perspektive. Im Fokus stehen dabei die Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte von System- und Komponentenherstellern in einem global wachsenden Markt.

Zur Ermittlung der Potenziale baut die Studie auf einer detaillierten Technologie- und Marktanalyse auf und verbindet die Ergebnisse mit einem regionalisierten Input-Output-Modell. Über die entwickelten Szenarien erfolgt schlussendlich die potenzielle Entwicklung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte von heute bis 2045. Dabei werden die bestehende Akteurslandschaft und die technologischen Kompetenzen in Ostdeutschland untersucht. Effekte aus dem Aufbau der Produktionskapazitäten, dem Bau und Betrieb der Anlagen, dem Transport und der Nutzung von Wasserstoff sowie der Instandhaltung der Anlagen werden in der Studie hingegen nicht betrachtet.

Im Ergebnis zeigen die Szenarien für 2045 für Ostdeutschland ein Bruttowertschöpfungspotenzial in einer Spanne von 480 Mio. bis 2,2 Mrd. Euro auf. Das Basisszenario mit rund 1,4 Mrd. € bewegt sich damit in der heutigen Größenordnung der Herstellung von Papier und Papierwaren in Ostdeutschland. Die 2,2 Mrd. € entsprechen der heutigen Bruttowertschöpfung der Kokerei und Mineralölverarbeitung.

Das wirtschaftliche Potenzial reicht deutlich über die Elektrolyseurhersteller hinaus. Wie viel Wertschöpfung in Ostdeutschland verbleibt, hängt wesentlich von der Einbindung regionaler Zulieferer ab. Weiterhin benötigt die Elektrolyseherstellung unter anderem Metallerzeugnisse, elektronische Erzeugnisse, elektrische Ausrüstungen, Maschinen sowie chemische und materialbezogene Vorleistungen.

Mit der wirtschaftlichen Entwicklung sind auch relevante Beschäftigungspotenziale verbunden. Im Basisszenario ergibt sich für 2045 ein Beschäftigungseffekt von rund 12.570 Personen, davon etwa 8.080 bei den Elektrolyseurherstellern und 4.490 in den ostdeutschen Zulieferketten. Je nach Marktszenario reicht die Größenordnung von rund 4.300 bis 20.000 Personen. Der Schwerpunkt liegt dabei mit 58 Prozent des Effekts auf Fachkrafttätigkeiten, weitere rund 30 Prozent auf Spezialisten und Experten.

Zur Realisierung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale kann in Ostdeutschland auf einer starken Akteurslandschaft, bestehend aus Elektrolyseherstellern, Zulieferern sowie Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, aufgebaut werden. Besonders ausgeprägte regionale Kompetenzschwerpunkte bestehen im Raum Dresden–Chemnitz, in Berlin-Potsdam sowie im Korridor Erfurt–Arnstadt–Sonneberg. Für Wirtschafts- und Standortpolitik bedeutet dies, bestehende Cluster nicht allein als Forschungs- oder Herstellerstandorte zu betrachten, sondern gezielt OEMs, Zulieferer, Forschung und potenzielle industrielle Neueinsteiger miteinander zu verbinden.

Aus der technischen Detailanalyse der Elektrolysetechnologien AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL geht hervor: Für alle Technologien ist der Stack der zentrale technologische Wertschöpfungskern. Mit etwa 25 bis 35 Prozent der Herstellungskosten bildet er den größten Einzelkostenblock und bietet ein entsprechendes Wertschöpfungspotenzial.

Für Ostdeutschland besteht damit eine reale, aber keineswegs automatische industriepolitische Chance. Entscheidend ist nicht allein, ob der internationale Elektrolyseurmarkt wächst, sondern ob die Region ihre vorhandenen Hersteller-, Forschungs- und Industriekompetenzen in wettbewerbsfähige Produktions- und Zulieferstrukturen übersetzen kann. Dafür müssen Markthochlauf und Investitionsbedingungen verlässlicher werden, regionale Cluster und Lieferketten gezielt weiterentwickelt, strategische Technologiekompetenzen und Versorgungsketten gesichert sowie die benötigte Fachkräftebasis aufgebaut werden. Gelingt dies, kann Elektrolyseurproduktion nicht nur einen neuen Absatzmarkt für einzelne Hersteller schaffen, sondern einen breiteren Beitrag zur industriellen Wertschöpfung und Beschäftigung in Ostdeutschland leisten.

1 Einleitung

Der Aufbau einer strombasierten Wasserstoffwirtschaft ist ein wichtiger Baustein für die Transformation hin zu einer klimaneutralen, resilienten und wettbewerbsfähigen Industrie. Insbesondere in Anwendungsbereichen, in denen eine direkte Elektrifizierung technisch oder wirtschaftlich nur eingeschränkt möglich ist, kann strombasierter Wasserstoff zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und deren Preisentwicklung verringern.

Eine Schlüsseltechnologie für diesen Hochlauf sind Elektrolyseure. Sie wandeln elektrische Energie und Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff um und bilden damit die technologische Verbindung zwischen der Stromerzeugung und den unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff. Mit dem weltweit geplanten Ausbau der strombasierten Wasserstofferzeugung entsteht daher zugleich ein wachsender Markt für Elektrolyseanlagen. Dieser Markt eröffnet industriepolitische Chancen, weil mit der Herstellung der Anlagen nicht nur Wertschöpfung bei den Elektrolyseurherstellern selbst, sondern auch Nachfrage nach Komponenten, Materialien, Maschinen, elektronischen Systemen und spezialisierten Dienstleistungen verbunden ist.

Für Ostdeutschland stellt sich vor diesem Hintergrund die Frage, in welchem Umfang die Region an der entstehenden industriellen Wertschöpfung teilhaben kann. Der Ausbau erneuerbarer Energien, vorhandene Industriestandorte sowie bestehende Hersteller-, Zuliefer- und Forschungsaktivitäten in der Wasserstoffwirtschaft bieten mögliche Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung und den Aufbau entsprechender Fertigungsstrukturen. Diese Ausgangsbedingungen allein gewährleisten jedoch noch keine regionale Beteiligung am zukünftigen Markt. Ob sich breitere Teile der Wertschöpfungskette in Ostdeutschland verankern lassen, hängt unter anderem von der zukünftigen Marktentwicklung, dem Technologiemix, den Standortentscheidungen der Hersteller, der Leistungsfähigkeit regionaler Zulieferstrukturen sowie der Verfügbarkeit von Vorprodukten, Rohstoffen und qualifizierten Arbeitskräften ab.

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, die wirtschaftlichen und arbeitsmarktlichen Potenziale der Elektrolyseurproduktion in den sechs ostdeutschen Bundesländern bis zum Jahr 2045 systematisch zu untersuchen. Betrachtet werden die alkalische Elektrolyse (AEL), die Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEMEL), die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL) und die Festoxid-Elektrolyse (SOEL). Die Studie untersucht, welche potenzielle und technologiespezifische Nachfrage nach Elektrolyseuren sich unter unterschiedlichen Hochlaufszenarios der Wasserstoffwirtschaft entwickeln könnte, welche Fertigungsanteile für Ostdeutschland daraus ableitbar sind und welche Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte mit diesen Fertigungspotenzialen verbunden wären.

Dabei stehen vier miteinander verknüpfte Fragen im Mittelpunkt:

1. Welche Technologien, Komponenten und Wirtschaftszweige prägen die Herstellung der betrachteten Elektrolyseure?
2. Welche Hersteller-, Zuliefer- und Forschungsstrukturen sind in Ostdeutschland vorhanden?
3. Welche direkten und indirekten Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale können aus einer regionalen Fertigung entstehen?

4. Welche materiellen oder arbeitsmarktbezogenen Abhängigkeiten könnten den Aufbau resilienter Wertschöpfungsketten begrenzen?

Gegenstand der Modellierung ist die industrielle Herstellung von Elektrolyseuren einschließlich der betrachteten Systemkomponenten und der damit verbundenen Vorleistungsbezüge. Nicht berücksichtigt werden Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte aus dem Aufbau der Produktionskapazitäten, dem Bau und Betrieb der Anlagen, dem Transport und der Nutzung von Wasserstoff sowie aus der Instandhaltung der Anlagen. Die Analyse der Hersteller-, Zuliefer- und Forschungslandschaft bildet angesichts der hohen Dynamik des Marktes zudem eine zeitpunktbezogene Bestandsaufnahme und erhebt keinen Anspruch auf vollständige Erfassung sämtlicher aktuell aktiver Akteure. Die Ergebnisse sind entsprechend als szenarienbasierte Potenzialanalyse zu verstehen. Sie zeigen, welche regionalwirtschaftlichen Effekte unter den jeweils definierten Markt-, Technologie-, Produktions- und Lieferkettenannahmen entstehen könnten. Ob diese Potenziale realisiert werden, hängt von weiteren Faktoren ab, darunter die internationale Wettbewerbsentwicklung, politische und regulatorische Rahmenbedingungen, Investitionsentscheidungen sowie die zukünftige technologische und industrielle Entwicklung.

Die Studie wurde gemeinsam vom WifOR Institute und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE erarbeitet und verbindet techno-ökonomische Analysen mit regionalwirtschaftlicher und arbeitsmarktökonomischer Modellierung. Das Studiendesign folgt der Wirkungskette vom zukünftigen Marktbedarf bis zu den regionalwirtschaftlichen Effekten. Ausgangspunkt sind Szenarien zum globalen und europäischen Wasserstoffhochlauf. Aus diesen wird zunächst der mögliche zukünftige Bedarf an Elektrolysekapazitäten abgeleitet (Kapitel 2). Darauf aufbauend werden unter unterschiedlichen Markt- und Standortannahmen mögliche Produktionsanteile Ostdeutschlands bestimmt (Kapitel 5.1). Eine Technologieanalyse untersucht den Aufbau der vier Elektrolyseurtechnologien und differenziert diese nach ihren wesentlichen Haupt- und Unterkomponenten (Kapitel 3.1). Für die einzelnen Komponenten werden unter anderem ihre Anteile an den Herstellungskosten, die eingesetzten Materialien und Halbzeuge, relevante Produktionsverfahren sowie erforderliche industrielle Kompetenzen und Qualifikationen betrachtet. Diese technischen Informationen werden anschließend Wirtschaftszweigen zugeordnet und zu technologiespezifischen sektoralen Produktionsstrukturen zusammengeführt (Kapitel 3.2). Ergänzend analysiert die Studie die bestehende Hersteller-, Zuliefer- und Forschungslandschaft in Ostdeutschland (Kapitel 4). Diese Bestandsaufnahme dient dazu, vorhandene regionale Anknüpfungspunkte sichtbar zu machen und einzuordnen, in welchen Teilen der Wertschöpfungskette bereits industrielle oder wissenschaftliche Kompetenzen bestehen.

Die aus Szenarien abgeleiteten Produktionsvolumen werden in ein regionalisiertes Input-Output-Modell überführt. Dieses bildet neben der unmittelbaren Wertschöpfung und Beschäftigung in der Elektrolyseurproduktion auch die Nachfrage nach Vorleistungen und die damit verbundenen indirekten Effekte innerhalb Ostdeutschlands ab. Auf diese Weise lässt sich untersuchen, in welchem Umfang unterschiedliche Produktionsszenarien zusätzliche Bruttowertschöpfung (Kapitel 5.2) und Beschäftigung (Kapitel 5.3) in der Region ermöglichen könnten und welche Wirtschaftszweige daran beteiligt wären. Eine ergänzende Resilienzanalyse betrachtet ausgewählte Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen und Vorprodukten sowie mögliche Fachkräfteengpässe (Kapitel 6). Abschließend werden, auf Basis der Ergebnisse der Studie in Kapitel 7 strategische Handlungsfelder identifiziert und ein Fazit gezogen.

2 Markthochlauf für Elektrolyseure im Kontext der Wasserstoffwirtschaft

Der Markthochlauf für Elektrolyseure vollzieht sich vor dem Hintergrund sehr ambitionierter Erwartungen an eine globale Wasserstoffwirtschaft, die in zahlreichen nationalen Strategien und Szenarien als zentraler Baustein der Dekarbonisierung verankert ist.

Zugleich zeigen die jüngsten Entwicklungen, dass die Nachfrageentwicklung gegenüber der ursprünglich hohen Erwartungshaltung langsamer verläuft. Dies ist ein Muster, das in der Frühphase neuer Märkte mit komplexen Wertschöpfungsketten nicht ungewöhnlich ist. Die notwendige Gleichzeitigkeit im Hochlauf von Erzeugung, Infrastruktur, Abnahme und regulatorischen Rahmenbedingungen stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Einige Projektentwickler haben vor diesem Hintergrund ihre Aktivitäten vorerst gestoppt und bereits gestartete Projekte nicht weitergeführt, was dazu führt, dass die aufgebauten Fertigungskapazitäten für Elektrolyseure aktuell nicht voll ausgelastet sind. Demgegenüber konnten zuletzt jedoch wieder Abnahmeverträge im Markt verkündet werden, was auf eine fortschreitende Marktreifung hindeutet. In der Gesamtschau ergibt sich aufgrund dieser Komplexität und der verschiedenen, noch bestehenden Unsicherheiten in Nachfrage, Infrastrukturaufbau und Förderinstrumenten eine weite Spannbreite möglicher Entwicklungspfade.[1]

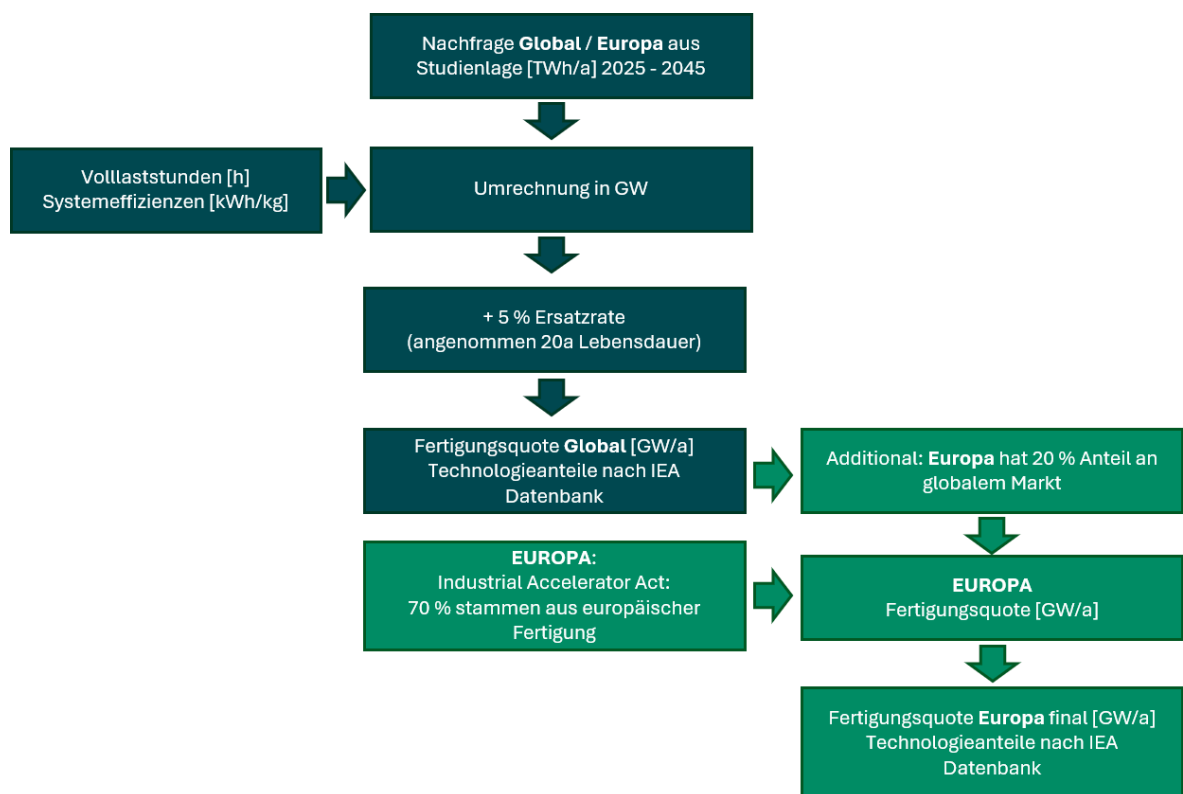


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Ermittlung von potenziellen Fertigungskapazitäten für den globalen und den europäischen Elektrolysemarkt. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung.

Daher werden in dieser Studie aus verschiedenen Wasserstoffbedarfspfaden, die sich an globalen und europäischen Nachfragetrends sowie den jeweiligen politischen Rahmenbedingungen orientieren, drei konsistente Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch) für den notwendigen Ausbau der Elektrolysekapazitäten abgeleitet, um die Bandbreite plausibler Marktentwicklungen abzubilden. Ergänzt werden diese drei Szenarien durch eine Variante, die einen erhöhten regionalen Wertschöpfungsanteil in Ostdeutschland innerhalb der vorgelagerten Lieferkette explizit berücksichtigt.

Allen Szenarien auf globaler, europäischer sowie deutscher und ostdeutscher Ebene (siehe Kapitel 5.1) ist eine gemeinsame zentrale Zielgröße zugrunde gelegt: die jährliche Fertigungskapazität an Elektrolyseuren, ausgedrückt in nomineller elektrischer Anschlussleistung pro Jahr [MW/a]. Diese wird nach den betrachteten Elektrolysetechnologien AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL differenziert. Die Ableitung erfolgt für die Stützjahre 2025, 2030, 2035, 2040 und 2045 (siehe Abbildung 1). Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert.

1. Ausgangspunkt: Globale und europäische Wasserstoffbedarfe

Den Ausgangspunkt der Analyse bildet die Ermittlung zukünftiger Wasserstoffbedarfe [Mt/a] auf globaler und europäischer Ebene.

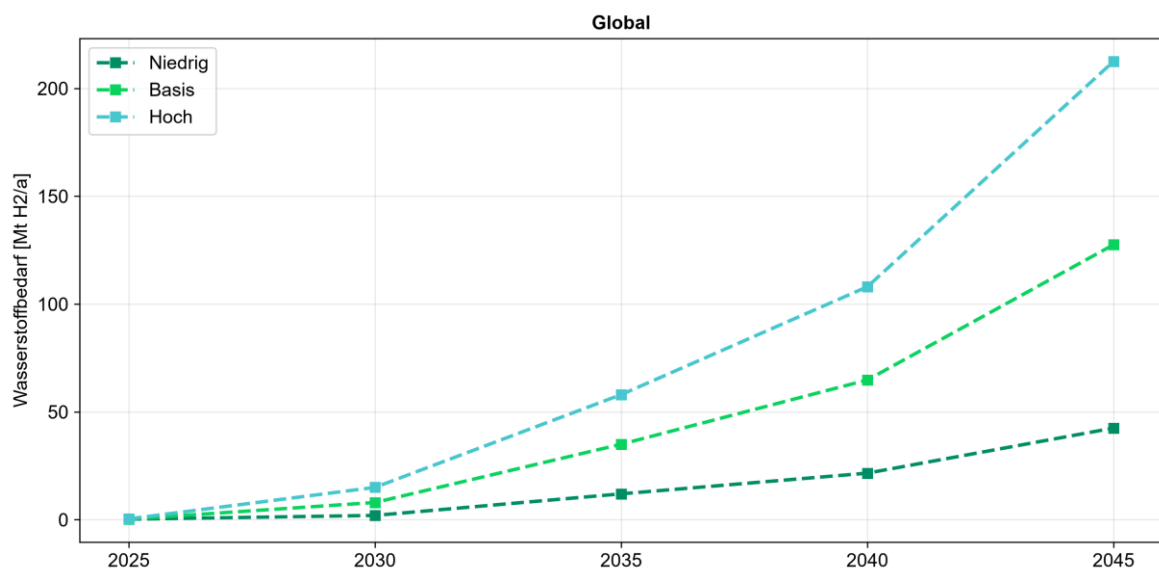


Abbildung 2: Prognostizierte Entwicklung des globalen, jährlichen Wasserstoffbedarfs in Mt_{H₂}/a basierend auf den drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch). Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1–3].

Die zugrundeliegenden Nachfrageprojektionen stützen sich für den globalen Markt im Wesentlichen auf drei einschlägige Studien [1–3], während für den europäischen Markt die Quellen [1, 4, 5] herangezogen wurden. Der betrachtete Projektionshorizont erstreckt sich bis zum Jahr 2045 und reicht damit weit in die Zukunft. Derart langfristige Abschätzungen sind zwangsläufig mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dies äußert sich unter anderem darin, dass nicht für alle Stützjahre und Szenarien unmittelbar referenzierbare Quelldaten verfügbar sind. Bestehende Datenlücken zwischen den Stützjahren wurden daher durch Interpolation auf Basis der analysierten Studien

geschlossen. Für die Abbildung der Szenarienbreite, also den Übergang vom pessimistischen Szenario mit geringen Bedarfen bis zum optimistischen Szenario mit hoher Nachfrage, konnten aus den analysierten Studien konsistente Faktoren identifiziert und übertragen werden. Auf dieser Grundlage wurden in sich geschlossene Nachfrageprojektionen für kohlenstoffarmen Wasserstoff über alle betrachteten Stützjahre und Szenarien hinweg abgeleitet. In Abbildung 2 ist der ermittelte Entwicklungskorridor des globalen jährlichen Wasserstoffbedarfs dargestellt. In Abbildung 21 im Anhang ist die entsprechende prognostizierte Entwicklung auf europäischer Ebene zu sehen.

2. Umrechnung Wasserstoffbedarfe in Fertigungskapazitäten für Elektrolysesysteme

Im nächsten Schritt erfolgt die Umrechnung der Wasserstoffbedarfe von $\text{Mt}_{\text{H}_2}/\text{a}$ in die daraus resultierende kumulierte Fertigungskapazität für Elektrolyseure (GW). Die Fertigungskapazität für Elektrolyseure beschreibt die jährlich durch die produzierende Industrie herstellbare elektrische Anschlussleistung neuer Elektrolyseanlagen, ausgedrückt in Gigawatt pro Jahr [GW/a]. Sie ist damit eine Kenngröße der Elektrolyseur-Wertschöpfungskette und gibt Auskunft darüber, in welchem Umfang Hersteller in einem gegebenen Zeitraum Elektrolyseure für den Markt bereitstellen können. Die Fertigungskapazität stellt eine Flussgröße dar, die den jährlichen Zubau bestimmt und damit eine wesentliche Determinante für das erreichbare Tempo des Wasserstoffhochlaufs ist.

Die Umrechnung erfordert zwei zentrale technische Annahmen: Die Volllaststunden [h/a] beschreiben, wie viele Stunden pro Jahr eine Elektrolyseanlage unter Nennlast betrieben wird. Um dem langfristig wachsenden Angebot an erneuerbaren Energien Rechnung zu tragen, wird ein kontinuierlicher Anstieg der Volllaststunden von 4.000 h/a (2025) auf 5.000 h/a (2045) angenommen. Die Systemeffizienz [$\text{kWh}/\text{kg}_{\text{H}_2}$] gibt an, welcher Anteil der eingesetzten elektrischen Energie in chemische Energie des erzeugten Wasserstoffs umgewandelt wird. Die jeweiligen Systemeffizienzen der betrachteten Elektrolysetechnologien unterscheiden sich prozessbedingt zwischen den Niedertemperaturtechnologien (AEL, AEMEL, PEMEL) und der Hochtemperaturtechnologie SOEL. Auf Basis von Herstellerdaten kommerzieller Anlagen (>50 Systeme) wurde eine einheitliche, über alle Technologien gemittelte, Durchschnittseffizienz für 2025 ermittelt. Für zukünftige Stützjahre wird aufgrund des zu erwartenden technologischen Fortschritts eine steigende Systemeffizienz unterstellt. Die angenommenen Volllaststunden und Systemeffizienzen sind in Tabelle 5 im Anhang zu finden.

Die Verwendung von Durchschnittswerten für Volllaststunden und Systemeffizienz stellt eine bewusste Vereinfachung dar, die anwendungsfeldunabhängig und damit szenarienübergreifend konsistent angewendet wird. Diese Vereinfachung ist vor dem Hintergrund der deutlich größeren Unsicherheiten in der vorgelagerten Wasserstoffbedarfsprognose methodisch vertretbar und gewährleistet gleichzeitig eine transparente und reproduzierbare Herleitung der Fertigungskapazitäten über alle betrachteten Stützjahre (2025–2045) und Szenarien hinweg. In Abbildung 22 im Anhang ist die Entwicklung der kumulierten Fertigungskapazität auf globaler Ebene für die drei Szenarien und in Abbildung 23 im Anhang für Europa dargestellt.

3. Globale jährliche Fertigungskapazität

Abbildung 3 zeigt den notwendigen Hochlauf der globalen, jährlichen Fertigungskapazitäten [GW/a] für Elektrolyseure über alle Technologien. Nach 2030 wird ein deutlicher Anstieg der Zubaurate erwartet, um der wachsenden Wasserstoffnachfrage gerecht zu werden. Zwischen 2035 und 2040

flacht dieser Anstieg vorübergehend ab, da die jährlichen Fertigungskapazitäten in diesem Zeitraum zwar kontinuierlich zunehmen, jedoch keine weitere Wachstumsbeschleunigung angenommen wird. Der sich nach 2040 ausweitende Unsicherheitsbereich spiegelt dabei die erhöhte Prognoseunsicherheit wider, die mit dieser zusätzlichen Nachfragekomponente einhergeht. Ab dem Jahr 2045 wird ein erneut steilerer Anstieg der erforderlichen Fertigungskapazitäten erwartet. Dieser resultiert zusätzlich zur weiter steigenden allgemeinen Wasserstoffnachfrage aus der Notwendigkeit, Altanlagen zu ersetzen.

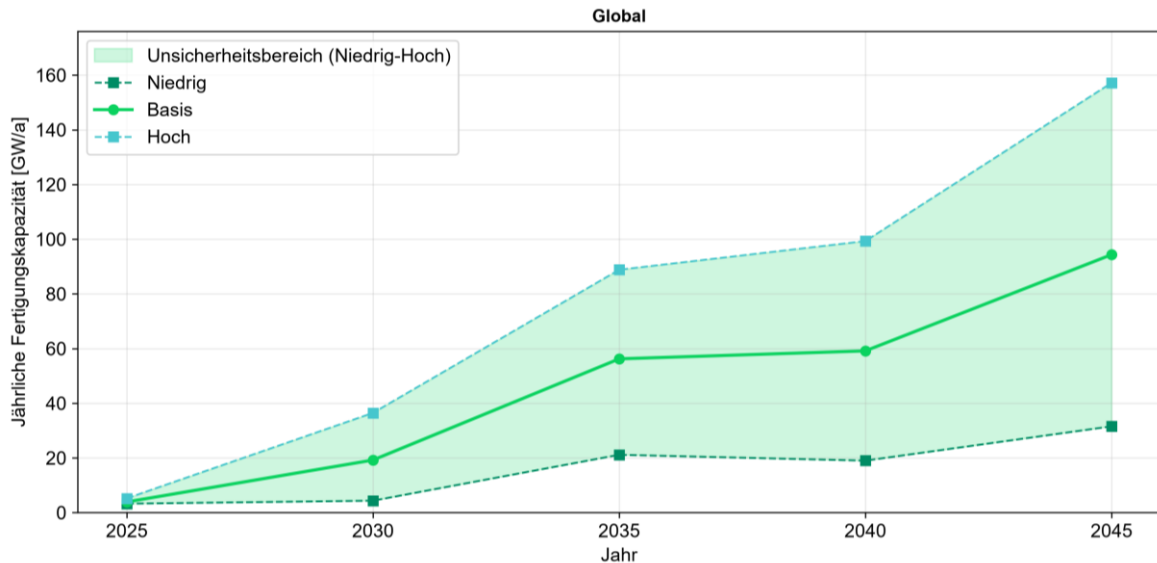


Abbildung 3: Entwicklung der jährlichen, globalen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) zwischen den drei Szenarien über die Stützjahre hinweg. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1–3].

4. Regionale Aufteilung: Europa

Der globale Bedarf stellt auch den Ausgangspunkt zur Ermittlung der europäischen Fertigungskapazitäten dar. Dabei wird angenommen, dass 70 % der in Europa installierten Kapazität aus europäischer Fertigung stammt und hierfür Kapazitäten aufgebaut bzw. genutzt werden müssen. Grundlage hierfür bildet der europäische Industrial Accelerator Act (IAA) [6], welcher darauf abzielt, dass Wertschöpfung mehrheitlich im europäischen Inland gehalten wird. Die restlichen 30 % der Fertigungskapazitäten werden folglich aus dem Nicht-EU-Ausland bedient. In die entgegengesetzte Richtung wird angenommen, dass 20 % des Weltmarktes durch europäische Hersteller bedient werden können. Dies stellt eine konservative Schätzung dar und berücksichtigt sowohl aktuelle Zahlen zum europäischen Marktanteil im Maschinenbausektor [7], als auch eine starke Konkurrenz aus China auf globaler Ebene. Dieser Weltmarktanteil fließt dementsprechend in die jährlichen Fertigungskapazitäten für Europa ein. Abbildung 4 stellt den europäischen Hochlauf unter Berücksichtigung der genannten Annahmen und der im Vorfeld definierten Szenarien dar. Ähnlich zur globalen Entwicklung wird auch hier ab 2035, vor allem für die Szenarien „Niedrig“ und „Basis“ ein flacherer Anstieg erkennbar, der ab dem Jahr 2040 deutlich zunimmt.

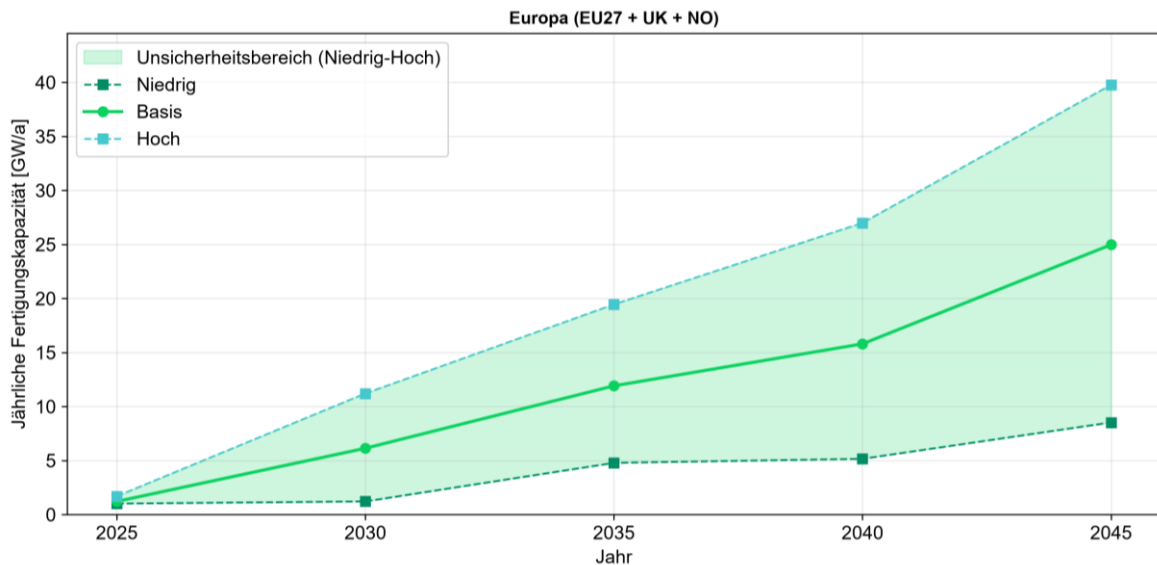


Abbildung 4: Entwicklung der jährlichen, europäischen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) in den definierten Szenarien über die Stützjahre hinweg. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5].

5. Aufteilung der Fertigungskapazität nach Elektrolysetechnologien

Für jede regionale Ebene (Global, Europa, Deutschland) wird der Anteil der zu analysierenden Elektrolysetechnologien (AEL, AEMEL, PEMEL, SOEL) an den prognostizierten, kumulierten Fertigungskapazitäten ermittelt. Dies geschieht für jede Ebene mittels unterschiedlicher Ansätze. Die prozentualen Marktanteile für 2025 und 2030 werden auf Basis der gelisteten Projekte der Hydrogen Production Database der IEA [8] bestimmt. Die Zuordnung der Projekte innerhalb der Datenbank nach Technologie und Jahr stellt die Basis für die technologische Durchdringung in den beiden Stützjahren dar. Hierbei wird die technologische Aufteilung der Projekte, die sich bereits in Betrieb befinden (operational), als der Ist-Stand für das Stützjahr 2025 genommen. Für 2030 werden die Projekte, die als FID klassiert sind, herangezogen, da bei heutigem FID eine Inbetriebnahme der Anlagen bis 2030 erfolgen sollte. Basierend auf dieser Ausgangslage für die Jahre 2025 und 2030 wurde für die weitere Entwicklung der Marktanteile der Technologien nach 2030 eine lineare Fortschreibung angenommen.

Auf globaler Ebene nimmt AEL die führende Marktposition ein und wird diese voraussichtlich bis 2045 behaupten, begünstigt durch ihre vergleichsweise geringeren Materialkosten, den hohen technologischen Reifegrad, die hohe Marktdynamik in Asien sowie den Einsatz nichtkritischer Materialien (siehe Kapitel 3.1). Letzteres reduziert darüber hinaus die Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten und stärkt die Versorgungssicherheit entlang der Lieferkette (siehe Kapitel 6.2). Der PEM-Elektrolyse werden steigende Marktanteile prognostiziert, vorrangig in Anwendungen mit kompakten Systemlösungen oder hohem Flexibilitätsbedarf. Die kumulierte installierte Kapazität verbleibt jedoch deutlich hinter jener der alkalischen Elektrolyse (AEL), die insbesondere durch den Kostendruck asiatischer Hersteller wettbewerbsfähig bleibt. Ab dem Jahr 2035 ist mit einem verstärkten Markteintritt der anionischen Austauschmembran-Elektrolyse (AEMEL) sowie der Festoxid-Elektrolyse (SOEL) zu rechnen, die sukzessiv Marktanteile von der AEL und der PEMEL

übernehmen werden. Da belastbare Daten für eine präzise Quantifizierung der zukünftigen Marktanteile derzeit nicht vorliegen, das technologische Potenzial beider Technologien jedoch als hoch eingeschätzt wird, wird angenommen, dass ihre Marktanteile von unter 1 % im Jahr 2030 auf bis zu 10 % (AEMEL) bzw. bis zu 5 % (SOEL) im Jahr 2045 anwachsen können.

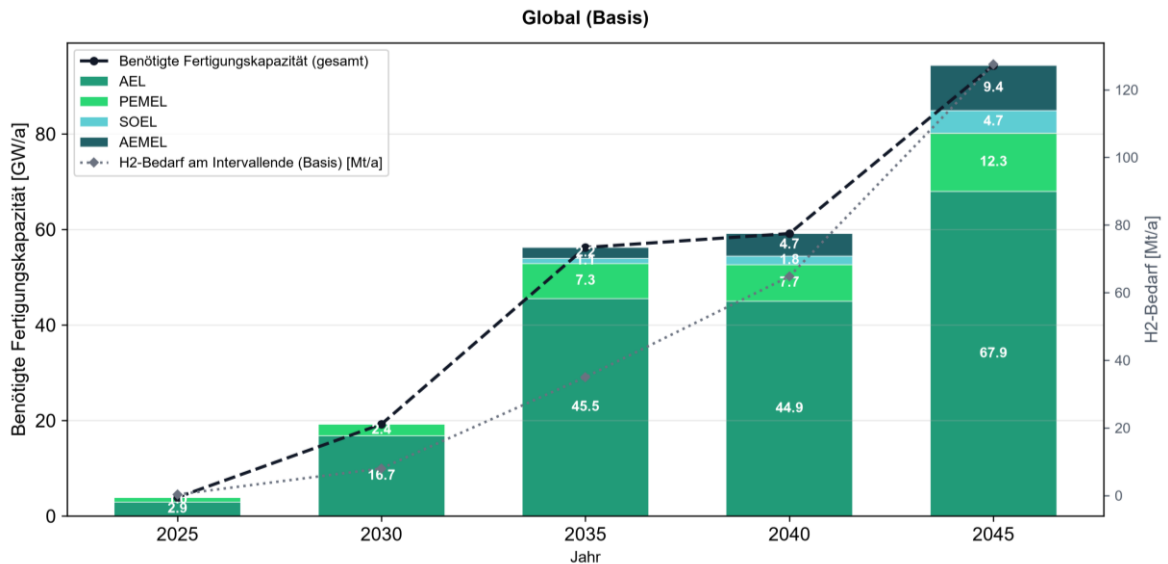


Abbildung 5: Entwicklung der globalen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate), aufgeteilt nach Stützjahr und geschätztem Marktanteil der Elektrolysetechnologie für das Basisszenario. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1–3, 8].

Beide Technologien befinden sich im Vergleich zur AEL und PEMEL auf niedrigeren Technologie-Reifegradstufen (TRL), was ihre Marktdurchdringung im betrachteten Zeitraum maßgeblich begrenzt. Für die SOEL wird dabei angenommen, dass der Markthochlauf vorrangig in Hochtemperatur-Industrieintegrationsanwendungen stattfinden wird. Abbildung 5 zeigt die prognostizierten globalen Marktanteile der Technologie am Beispiel des Basisszenarios. Abbildung 6 entsprechend für Europa.

Für den europäischen Markt ergibt sich ein differenzierteres Bild. Zwar wird auch hier, basierend auf dem derzeitigen Markthochlauf, die AEL als dominierende Technologie erwartet. Jedoch weist die PEMEL gemäß Datenbanken im Vergleich zum globalen Trend einen deutlich höheren relativen Marktanteil bis 2030 auf. Dies ist bedingt durch politische Fördermaßnahmen für schnell regelbare, netzstabilisierende Systeme sowie durch gut entwickelte europäische Fertigungscluster. Analog zur globalen Entwicklung wird auch für den europäischen Raum ab 2035 eine zunehmende Marktdurchdringung der AEMEL und SOEL angenommen, zum Beispiel getrieben durch Dekarbonisierungsvorgaben in der Schwerindustrie, wodurch entsprechende Anteile der etablierten PEMEL- und AEL-Technologien absorbiert werden. Alle Projektionen basieren auf der Annahme stabiler politischer Rahmenbedingungen, ausbleibender wesentlicher Lieferkettenunterbrechungen sowie kontinuierlicher Fortschritte in der Membran- und Elektrodentechnologie für AEMEL und SOEL.

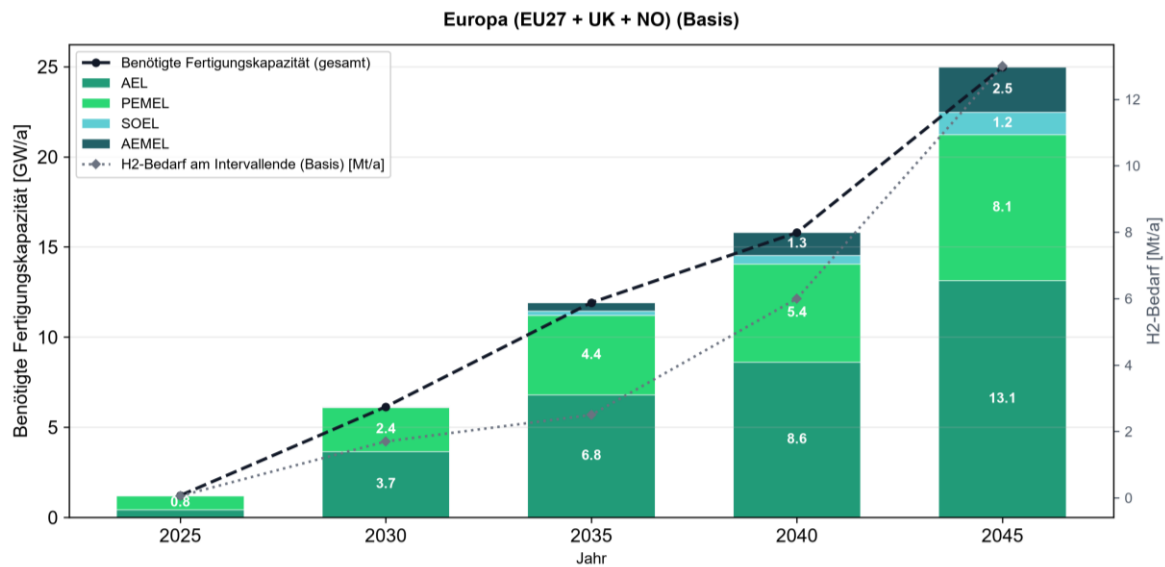


Abbildung 6: Entwicklung der europäischen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate), aufgeteilt nach Stützjahr und geschätztem Marktanteil der Elektrolysetechnologie für das Basisszenario. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8].

Vor dem Hintergrund volatiler Energiepreise, sich wandelnder industriepolitischer Rahmenbedingungen, verzögerter Investitionsentscheidungen sowie möglicher technologischer Weiterentwicklungen weist jede Prognose des Markthochlaufs von Elektrolyseuren eine hohe Unsicherheit auf, weshalb die Spannbreite möglicher Zubaukorridore erheblich ist. Die Szenariotechnik bietet hierfür einen geeigneten methodischen Rahmen. Anstatt eine eindeutige Zukunft vorherzusagen, ermöglicht sie das strukturierte Abbilden plausibler Entwicklungspfade. Ausgehend von den entwickelten globalen und europäischen Szenarien werden in Kapitel 5.1 daher mögliche Entwicklungspfade der Fertigungskapazitäten auf deutscher Ebene und für die ostdeutschen Bundesländer abgeleitet.

3 Elektrolyseure als Schlüsseltechnologie und Wertschöpfungssystem

Elektrolyseure sind eine zentrale Schlüsseltechnologie der Wasserstoffwirtschaft. Sie ermöglichen die Umwandlung elektrischer Energie in Wasserstoff und unterstützen damit die Kopplung verschiedener Energiesektoren. Die vorliegende Technologieanalyse vergleicht vier Elektrolysetechnologien: die alkalische Elektrolyse (AEL), die Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEMEL), die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL), sowie die Festoxid-Elektrolyse (SOEL).

Der Vergleich umfasst die Dimensionen Funktionsprinzip, Komponentenarchitektur, Kostenstruktur, Fertigungstiefe der Hauptkomponenten sowie die zugehörigen Kompetenzanforderungen für deren Fertigung. Die Analyse bildet damit die Grundlage für die Ableitung technologiespezifischer Kosten, Herstellungskostenanteile, OEM-Fertigungstiefen und relevanter Wirtschaftsbereiche entlang der jeweiligen Wertschöpfungspfade.

3.1 Technologieanalyse

3.1.1 Methodisches Vorgehen

Um eine konsistente Technologieanalyse zu gewährleisten, wurde ein standardisierter Systemaufbau mit identischen Systemgrenzen und Randbedingungen für alle betrachteten Elektrolyseurtechnologien definiert. Außerdem wurde jeder technologiespezifische Systemaufbau in folgende Hauptkomponenten(gruppen) zerlegt. Dabei wurden neben den technischen Aspekten auch die zugrunde liegenden Fertigungsprozesse der Komponenten und deren Einordnung in entsprechende Wirtschaftsbereiche berücksichtigt:

- Stack
- Gasaufbereitung
- Wasseraufbereitung
- Gleichrichter
- Sensorik/Steuerung/Messtechnik
- Kühlturm/Thermomanagement
- Sicherheit/Rohrleitungen
- Kompressor

Der Stack stellt das primäre Unterscheidungsmerkmal zwischen den Technologien dar und benötigt zur Fertigung eine hohe Zahl an Fertigungsschritten aus unterschiedlichsten Fertigungsbereichen. Um dieser Komplexität der Stacks und Relevanz für die Fertigungstiefe gerecht zu werden, wurde dieser technologiespezifisch nochmals in wesentliche Unterkomponenten zerlegt.

Um eine konsistente und vergleichbare Bewertung der untersuchten Elektrolysetechnologien zu gewährleisten, liegt der Analyse ein einheitlicher, standardisierter Systemaufbau zugrunde, dessen wesentliche Auslegungsparameter im Folgenden definiert werden. Die Nennleistung der betrachteten Systeme wird einheitlich mit 100 MW_{DC} festgelegt, was als repräsentative Grundeinheit für industrielle Großanwendungen dient. Die Stackgrößen (bzw. HotBox-Konfigurationen im Fall der SOEL) orientieren sich an aktuell am Markt verfügbaren Produkten einschlägiger Hersteller, sodass typische Seriengrößen und modulare Systemkonzepte abgebildet werden. Als studienspezifische Festlegung wird ein H₂-Ausgangsdruck von 30 bar definiert, da im vorliegenden Systemaufbau weder für die AEL noch für die SOEL eine druckseitige Verdichtung im Stack vorgesehen ist. Daher wird für beide Technologien ein nachgeschalteter Verdichter berücksichtigt. Transformatoren und

weitere Komponenten zur elektrischen Netzanbindung sind nicht Gegenstand der Systembetrachtung. Auf Systemebene wird ein zentralisierter BoP-Aufbau unterstellt, das heißt wesentliche periphere Komponenten, darunter Wasseraufbereitung, Gasaufbereitung, Verdichter, Kühlung und Sicherheitstechnik, werden als zentrale Einheiten für das jeweilige 100-MW-System ausgelegt.

Anschließend wurden von den Hauptkomponenten bis hin zu den Unterkomponenten des Stacks die Zielparame-ter Herstellungskostenanteil, OEM-Fertigungstiefe, Materialien, Fertigungsschritte und Kompetenzanforderungen ermittelt. Die zugrunde liegende Datenbasis setzt sich aus eigenen Daten, den Ergebnissen einer Literaturrecherche sowie qualitativen Interviews mit Elektrolyseherstellern zusammen. Die OEM-Fertigungstiefe beschreibt den Anteil an Fertigung und Prozesstiefe, den ein Elektrolyseurhersteller (OEM) im Durchschnitt an einer Komponente selbst erbringt. Der Zulieferanteil ist die Komplementärgröße zur Fertigungstiefe und zeigt an, welcher Anteil an der Komponente von externen Lieferanten erbracht wird. Diese Parameter sind je OEM sehr individuell und stellen daher nur indikative Werte dar.

Parameter	Wert
Technologie	PEMEL (100-MW-Referenzsystem)
Herstellkostenanteil der MEA an Stack	35 % der Stack-Herstellkosten
Stackanteil am Gesamtsystem	32 % der Systemherstellkosten
Materialkostenanteil (Materialien)	~55 % Membran: PFAS; Kathode: Platin/C; Anode: Iridium, Trägermaterial
OEM-Fertigungstiefe (Produktions-/Fertigungsprozesse)	~25 % (Slot-die-Coating, Sprüh- oder Siebdruckbeschichtung der Katalysatorschicht, Trocknung, Laminierung, Heißpressen, Schneiden, Inline-Inspektion)
Zulieferanteil (Materialien)	~75 % (z.B. Membranrolle, Katalysatormaterial: Platin/C, Iridium, Chemikalien)
Kompetenzfelder	Beschichtungstechnik, Partikel-/Dispersionstechnik, Membranchemie, Elektrochemie
Typische Qualifikationen	Verfahrenstechnik, Chemie-/Chemieingenieurwesen, Materialwissenschaft, Mechatronik und Facharbeit in Folien- und Beschichtungsprozessen

Tabelle 1: Beispiel der Datenerhebung für die MEA als Unterkomponente des PEM-Elektrolyse Stacks (Hauptkomponente) Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis der Analyse von Literatur [9–12] , eigenen Daten und Experteninterviews.

Für den Stack wurden die quantitativen Daten von der Unterkomponentenebene (siehe Tabelle 6 bis Tabelle 9 im Anhang) auf die Hauptkomponentenebene aggregiert. Dieses methodische Vorgehen ermöglicht die Ableitung der Zielparame-ter unter vergleichbaren Annahmen und vermeidet

Verzerrungen durch projekt- oder standortspezifische Besonderheiten. Die so gewonnenen Ergebnisse ermöglichen es, für jede Technologie die Hauptkostentreiber und die industriell relevanten OEM-Fertigungstiefen zu identifizieren und der jeweiligen Komponentenfertigung Kompetenzprofile zuzuordnen.

3.1.2 Technologischer Vergleich

Die Technologien unterscheiden sich im Kern durch das eingesetzte Elektrolyt- und Membranmaterial, die Stack-Architektur sowie die Anforderungen an Materialien und Fertigung. In der folgenden Abbildung 7 ist eine Übersicht der wesentlichen technischen Eigenschaften der vier Elektrolysetechnologien dargestellt (Technologiedossiers).

Niedertemperatur (Wasser)-Elektrolyse		Hochtemperatur (Dampf)-Elektrolyse		
Alkalische Elektrolyse		Protonenaustausch-Elektrolyse		
Flüssigelektrolyt	Polymerelektrolytmembran		Festoxidmembran	
AEL	AEMEL	PEMEL	SOEL	
Parameter	AEL	AEMEL	PEMEL	SOEL
Reifegrad (TRL)	Voll kommerziell (8-9)	Pilot-/Kommerzialisierungsphase (6-7)	Etabliert am Markt (7-9)	Pilot-/Kommerzialisierungsphase (6-7)
Temp	~70 °C	~50 °C	~60 °C	650-850 °C
Druck	atm. – ca. 15 bar	atm. – ca. 30 bar	atm. – ca. 30 bar	atm.
Effizienz [kWh/kgH2]	ca. 50–60 kWh/kg	ca. 50–60 kWh/kg	ca. 50–60 kWh/kg	ca. 35–40 kWh/kg (bei Nutzung von Prozessdampf)
Katalysatoren	Nickelbeschichteter, perforierter Edelstahl	Nicht-edelmetallisch (Ni- oder Ni-Fe-Co-Legierungen)	Edelmetalle (Pt-Nanopartikel auf Kohlenstoffträger, Iridiumoxid)	Keramisch, Cermet (Perowskit-Oxide, Ni–YSZ-Cermet)
Elektrolyt / Membran	Wässrige KOH-Lösung mit porösem anorganischem Diaphragma (z. B. ZrO ₂).	AEM-Polymer (z. B. DVB-basiert), oft mit verdünnter KOH/NaHCO ₃ .	PFSA-Polymermembran (z. B. Nafion) als fester Protonenleiter.	Dichte keramische Sauerstoffionenleiter (meist YSZ, yttria-stabilisiertes Zirkoniumoxid).
Vorteile/Nachteile	Günstig, robust / niedrige Stromdichte	Wenig Edelmetalle / Membranlebensdauer	Hohe Dynamik, kompakt / Teure Edelmetalle	Hoher Wirkungsgrad / Starke Degradation

Abbildung 7: Technologiedossiers: Übersicht der technischen Eigenschaften der betrachteten Elektrolysetechnologien. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung

Auf Zell-/Stackebene konzentriert sich die technologiespezifische Kernwertschöpfung, während auf Systemebene technologieübergreifende Komponenten wie Gleichrichter, Wasseraufbereitung, Gasaufbereitung, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, thermisches Management hinzukommen.

Die PEM-Elektrolyse basiert auf einer protonenleitenden Polymermembran (PFAS) und erreicht hohe Leistungsdichten, kompakte Stackdesigns und eine gute Dynamik- und Teillastfähigkeit. Dem stehen erhöhte Anforderungen an Wasserreinheit, korrosionsbeständige metallische Zellkomponenten aus Titan und der Einsatz kritischer Edelmetalle im Stack gegenüber, was sich in einer ausgeprägten Materialintensität und einer hohen Zahl an Fertigungsschritten insbesondere von MEA/CCM, Bipolarplatten und porösen Transportschichten niederschlägt. Die zentrale

Wertschöpfung konzentriert sich stark auf die Membran-Elektroden-Einheit (MEA), inklusive der Katalysatorschichten, der porösen Transportschichten (PtL, GDL), Bipolarplatten und deren Zusammenbau zum Stack. Abbildung 8 zeigt dazu die ermittelten Herstellkostenanteile und Fertigungstiefen der Stackkomponenten. Entsprechend sind hier Kompetenzen in Membranchemie, Präzisionsbeschichtung, Katalysatorverarbeitung, Titan- und Sonderwerkstoffverarbeitung, hochreiner Medienführung und qualitätsgesicherter Serienfertigung besonders relevant. In dem 100-MW-Referenzsystem entfällt rund ein Drittel der direkten Herstellkosten auf den Stack, während etwa zwei Drittel der Herstellkosten auf BoP-Komponenten wie Gas- und Wasseraufbereitung, Gleichrichter, Sensorik/Messtechnik, Kühl- und Sicherheitssysteme sowie den Kompressor entfallen.

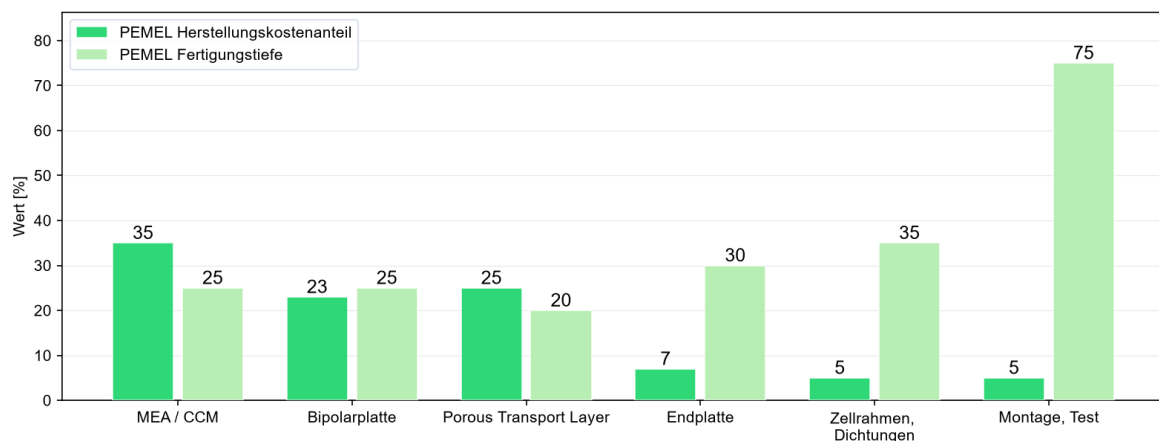


Abbildung 8: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von PEMEL-Stackkomponenten. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis der Analyse von Literatur [9–12], eigenen Daten und Experteninterviews.

Die AEL nutzt einen flüssigen, alkalischen Elektrolyten, typischerweise Kalilauge, und ein Diaphragma beziehungsweise eine Separatorstruktur zur Trennung der Reaktionsräume. Sie weist einen hohen technologischen Reifegrad auf und ist für große Leistungen etabliert, arbeitet jedoch mit vergleichsweise geringeren Leistungsdichten (siehe Abbildung 7) und benötigt eine umfangreichere BoP als die PEMEL, einschließlich mechanischer Verdichtung und Gasreinigung mit Laugenwäsche. Die technologischen Schwerpunkte und damit auch ein Großteil der Wertschöpfung liegen auf dem Diaphragma, den nickelbasierten Elektroden mit katalytisch aktivierten Oberflächen (Coating), metallischen Strukturkomponenten und dem sicheren Umgang mit alkalischen Elektrolyten. Daraus ergeben sich Kompetenzanforderungen vor allem in den Bereichen Oberflächentechnik, metallische Fertigung, chemikalienbeständige Werkstoffe, Dichtungstechnik sowie klassischer chemischer Anlagenbau.

Die AEMEL kombiniert einen anionenleitenden, polymeren Membranansatz mit alkalischer Betriebsweise und ermöglicht somit eine Reduzierung des Edelmetall- und Titanbedarfs im Vergleich zur PEMEL. Zum Betrachtungszeitpunkt dieser Studie erreicht jedoch die Langzeitstabilität der Membran noch nicht die notwendigen Werte für eine industrielle Skalierung der Fertigung, was sich in höheren technologischen Risiken und Unsicherheiten der Kostenpfade niederschlägt. Außerdem ist die aktuelle Situation noch so, dass häufig noch PGMs als Katalysator zum Einsatz kommen. Die Kompetenzanforderungen verschieben sich in Richtung alkalistabiler, Ionen leitender Membrane als Ionomere, edelmetallreduzierter oder -freier Katalysatoren und gleichzeitig präziser, skalierbarer Fertigungsprozesse. Für die industrielle Entwicklung ist deshalb insbesondere die Verbindung aus elektrochemischer Materialentwicklung, Membranverarbeitung und Stack-Engineering

entscheidend. Der Stackanteil an den Herstellkosten ist vergleichbar zur PEMEL, allerdings bei leicht höherer OEM-Fertigungstiefe im Stack. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Entwicklungs- und Fertigungsleistungen stärker unternehmensintern gebündelt sind und die Verfügbarkeit der eingesetzten Materialien höher ist. Für die BoP-Komponenten zeigt sich ein mit PEMEL vergleichbares Kosten- und Fertigungsmuster.

Die SOEL arbeitet im Hochtemperaturbereich mit keramischen Festelektrolyten und Elektroden. Sie weist eine deutlich höhere elektrische Effizienz zu den NT-Technologien auf, insbesondere bei Integration in wärmeintensive industrielle Prozesse, stellt jedoch hohe Anforderungen an Werkstoffe, thermisches Management und Betriebsführung. Die OEM-Fertigungstiefe konzentriert sich hier stärker auf Hochtemperaturkeramik, Interkonnektoren, Dichtsysteme und wärmeintegrierte Systemtechnik. Dementsprechend sind Kompetenzen in keramischen Funktionswerkstoffen, Hochtemperaturdichtungen, thermomechanisch robustem Stackdesign sowie in der Integration mit Wärmequellen und Industrieprozessen erforderlich. Damit unterscheidet sich die Technologie nicht nur materialseitig, sondern auch hinsichtlich der industriellen Basis deutlich von den anderen Technologien und weist eine größere Nähe zu Hochtemperaturprozesstechnik und Fertigung von Hochleistungskeramik auf. Die Stackkostenanteile sind im Referenzsystem höher als bei Niedertemperaturtechnologien, da keramische Funktionsmaterialien und metallische Interkonnektoren einen großen Anteil der Materialkosten ausmachen, während insbesondere Kühl-/Thermomanagement und Sicherheitssysteme durch anspruchsvolle Hochtemperaturtechnik und zusätzliche Integrationsleistungen geprägt sind.

Bei den BoP-Komponenten ist die gewichtete Fertigungstiefe breiter verteilt als die Kosten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass standardisierte Apparate durch zusätzliche Leistungen wie Montage, Integration und Inbetriebnahme ergänzt werden, die häufig lokal erbracht werden und somit zusätzliche Wertschöpfungsanteile generieren. Die Herstellkostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe der Stackkomponenten für die Technologien AEL, AEMEL, SOEL sind im Anhang in den Abbildung 26 bis Abbildung 29 zu finden.

3.1.3 Vergleich Herstellungskosten

Das Diagramm in Abbildung 26 im Anhang zeigt zusammenfassend die prozentualen Herstellungskostenanteile der Hauptkomponenten für die vier Elektrolysetechnologien AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL. Technologieübergreifend zeigt sich, dass der Stack in allen vier Technologien den größten Einzelkostenanteil darstellt, mit Werten zwischen ca. 25 % (AEL) und 35 % (SOEL). Dies unterstreicht die zentrale Bedeutung der Stack-Fertigung als Kostenhebel für alle Elektrolysetechnologien. Darüber hinaus weisen Leistungselektronik, Hilfssysteme, Thermalmanagement sowie Gasaufbereitung technologieübergreifend relevante Kostenanteile auf. Insgesamt ist die Kostenstruktur über die vier Technologien hinweg vergleichsweise ähnlich, wenngleich SOEL eine leicht abweichende Verteilung aufweist.

Die spezifischen Herstellungskosten der betrachteten Elektrolysetechnologien werden als direkte CAPEX in $\text{€}_{2026}/\text{kW}$ ausgewiesen und beziehen sich auf vollständige Elektrolysesysteme der Größenklasse 100 MW bei einem Ausgangsdruck 30 bar. Die Kostenbasis umfasst Stack, Balance of Stack (BoS) sowie Balance of Plant (BoP) einschließlich Kompressor (bei AEL und SOEL). Explizit in den Herstellungskosten nicht enthalten sind Projektkosten wie Marge, Erschließung, weitere Infrastruktur, wie zum Beispiel Stromnetzanschluss, Bodenkosten sowie Versicherung und Risikoaufschläge. Sämtliche Werte beziehen sich auf eine Fertigung innerhalb der EU und schließen asiatische Herstellungskostenstrukturen aus. Als Ausgangspunkt zur Herleitung dienen konservative

Herstellungskosten des heutigen Stands, die auf Basis eigener Daten des Fraunhofer ISE sowie einschlägiger Literatur ermittelt wurden. Hieraus werden die Kostenwerte für 2030 abgeleitet. Die anschließende Trendprognose für den Zeitraum 2030–2045 erfolgt mittels einer Erfahrungskurve nach Glenk et al. [13], das bedeutet in Abhängigkeit von der Verdopplung der jeweiligen Fertigungskapazitäten. Die resultierenden spezifischen Herstellungskosten sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengefasst.

Technologie	Heute (€/kW)	2030	2035	2040	2045	Quellen
AEL	900	700	520	450	400	[1, 9, 10, 14–16], eigene Daten
AEMEL	1.500	1.000	700	520	430	[17], eigene Daten
PEMEL	1.000	850	620	520	460	[1, 9, 10, 14–16], eigene Daten
SOEL	2.000	1.200	950	780	650	[18], eigene Daten

Tabelle 2: Übersicht der angenommenen, spezifischen Herstellkostenentwicklung der betrachteten Elektrolysetechnologien

Die Ergebnisse zeigen, dass alle vier betrachteten Elektrolysetechnologien bis 2045 eine deutliche Reduktion der spezifischen Herstellungskosten um etwa 50–70 % gegenüber dem heutigen Niveau erreichen können. Die Kostensenkungspotenziale ergeben sich dabei aus zwei Aspekten: technologieübergreifenden Effizienzgewinnen in der Fertigung einerseits und technologiespezifischen Verbesserungen auf Stackebene andererseits.

Für AEL, AEMEL und PEMEL sind auf Systemebene vergleichbare BoP-seitige Kostensenkungen zu erwarten. Diese resultieren aus der zunehmenden Standardisierung und Skalierung von Komponenten wie Leistungselektronik (Gleichrichtern), Wasseraufbereitung, Gasaufbereitung, Verdichtern sowie Sicherheits- und Steuerungstechnik. Die Kostendegression bei der Leistungselektronik wird dabei maßgeblich durch Lernkurveneffekte aus angrenzenden Märkten, insbesondere der Photovoltaik und der Elektromobilität, getrieben, weshalb hier von moderaten, aber robusten Einsparpotenzialen auszugehen ist.

Darüber hinaus bestehen technologiespezifische Kostensenkungspotenziale auf Stack-Ebene: Bei AEL und PEMEL, die heute bereits industriell etabliert sind, resultieren diese vor allem aus der Automatisierung der Stackfertigung sowie der Reduktion der Materialintensität zentraler Komponenten, darunter Elektroden und Diaphragmen (AEL) bzw. Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten (PEMEL).

Die AEMEL-Technologie folgt aufgrund ihres vergleichsweise geringen Technologiereifegrads einem steileren Kostenpfad. Neben den genannten BoP-seitigen Einsparpotenzialen liegen die größten technologiespezifischen Potenziale in der Substitution teurer Katalysatoren und der Weiterentwicklung von Anionenaustauschmembranen. Mit wachsender Produktionsskalierung ist daher ein überproportionaler Rückgang der spezifischen Systemkosten zu erwarten.

Das größte absolute Kostensenkungspotenzial weist die SOEL-Technologie auf, deren spezifische Systemkosten in den Szenarien von derzeit rund 2.000 €/kW auf etwa 650 €/kW sinken. Im Unterschied zu den übrigen Technologien wird die Kostenstruktur der SOEL durch eine

hochspezifische thermische Systemarchitektur geprägt, sodass die wesentlichen Einsparungen auf Stack- und HotBox-Ebene zu verorten sind: Maßgeblich sind Skaleneffekte in der Serienfertigung keramischer Zellkomponenten sowie eine kostengünstigere Ausgestaltung der Interkonnektoren und Endplatten. Auf BoP-Ebene wirken vor allem Optimierungen bei Hochtemperaturkomponenten wie Dampferzeugern und Wärmetauschern.

3.2 Sektorale Produktionsstruktur der Elektrolyseurherstellung

Die vorangegangene Technologieanalyse beschreibt die vier betrachteten Elektrolyseurtechnologien auf Ebene ihrer Haupt- und Unterkomponenten. Damit liegt eine technisch differenzierte Beschreibung der Elektrolyseurherstellung vor, die Unterschiede im Aufbau und in der Kostenstruktur von AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL sichtbar macht. Diese Beschreibungen und Unterschiede sind zentral, um die in Kapitel 5 erstellten ökonomischen und arbeitsmarktbezogenen Analysen technisch zu untermauern.

Das dort eingesetzte Input-Output-Modell bildet wirtschaftliche Verflechtungen jedoch auf Ebene von Wirtschaftszweigen (WZ) und nicht auf Komponentenebene ab. Daher müssen die technisch definierten Komponenten zunächst in eine sektorale Systematik überführt werden. Die daraus entstehenden sektoralen Profile der Elektrolysetechnologien bilden nicht nur die Grundlage für die spätere Modellierung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten. Sie zeigen zugleich, in welchen Branchen die unmittelbaren Produktionsimpulse der Elektrolyseurherstellung anfallen und welche Bandbreite wirtschaftlicher Aktivitäten mit der Herstellung von Elektrolyseuren verbunden ist.

3.2.1 Zuordnung der Komponenten zu Wirtschaftszweigen

Ausgangspunkt der sektoralen Zuordnung sind die in der Technologieanalyse ermittelten Informationen zu den Herstellungskostenanteilen, Materialien und Herstellungsverfahren der Haupt- und Unterkomponenten der vier Elektrolyseurtechnologien (vgl. Tabelle 1). Ziel ist die Zuordnung einer jeden Komponente zu einem Wirtschaftszweig wie er in der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) vorliegt. Die WZ-Klassifikation enthält dafür Beschreibungen der einzelnen Wirtschaftszweige inklusive Abgrenzungen der jeweils einbezogenen und ausgeschlossenen Tätigkeiten, Prozesse und Erzeugnisse.

In einem ersten Schritt werden für jede Komponente alle Wirtschaftszweige identifiziert, die potenziell an ihrer Herstellung beteiligt sein können. Anschließend wird derjenige Wirtschaftszweig ausgewählt, der den prägenden Produktionsprozess und den wirtschaftlichen Schwerpunkt der Komponente am besten abbildet. Die fachliche Prüfung erfolgt auf Ebene der Wirtschaftsklassen (WZ-4-Steller, z. B. WZ-28.13 Herstellung von Pumpen und Kompressoren), um eine möglichst präzise Zuordnung zu ermöglichen. Für die weitere Modellierung und Darstellung werden die Ergebnisse anschließend auf die Ebene der Wirtschaftsabteilungen (WZ-2-Steller, z. B. WZ-28 Maschinenbau) aggregiert.

Ein Beispiel für dieses Zuordnungsverfahren ist der Gleichrichter. Seine Herstellung umfasst unter anderem Leistungshalbleiter, elektronische Baugruppen, Schaltschränke, Verdrahtung sowie Prüf- und Kühltechnik und berührt damit mehrere Wirtschaftsbereiche. Dazu zählen insbesondere die Herstellung von Metallerzeugnissen sowie die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen. Da der Schwerpunkt der Gesamtkomponente jedoch in der Herstellung und Integration elektrotechnischer Ausrüstungen liegt, wird sie der WZ-Abteilung 27 „Herstellung von elektrischen Ausrüstungen“ zugeordnet. Dieses Vorgehen wird einheitlich auf alle Komponenten der vier betrachteten Elektrolyseurtechnologien angewendet. Die vollständigen

Zuordnungstabellen mit den Komponenten, Herstellungskostenanteilen und zugeordneten Wirtschaftszweigen sind im Anhang dargestellt.

Nach der Zuordnung werden die Herstellungskostenanteile aller Komponenten innerhalb einer Technologie nach Wirtschaftszweigen zusammengefasst. Sind mehrere Komponenten demselben Wirtschaftszweig zugeordnet, werden ihre Anteile addiert. Auf diese Weise entsteht für AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL jeweils eine sektorale Produktionsstruktur, deren Anteile sich auf 100 Prozent der betrachteten Herstellkosten summieren. Die resultierenden Profile zeigen, wie sich der unmittelbare Produktionsimpuls der jeweiligen Elektrolysetechnologie auf die beteiligten Wirtschaftszweige verteilt. Unterschiede zwischen den Technologien ergeben sich sowohl aus technologiespezifischen Komponenten als auch aus abweichenden Kostenanteilen gemeinsamer Systembestandteile.

Ergänzend zur sektoralen Zuordnung wird anhand der OEM-Fertigungstiefe für die einzelnen Komponenten unterschieden, welcher Anteil der Produktionsleistung typischerweise beim Elektrolyseurhersteller selbst erbracht und welcher Anteil von Zulieferern bezogen wird. Diese Unterscheidung hat dabei keinen Einfluss auf die Produktionsstruktur wie sie im nächsten Abschnitt dargestellt ist. Sie liefert aber eine wichtige Information für das in Kapitel 5 eingesetzte Input-Output-Modell, um zwischen direkten Effekten beim OEM und indirekten Effekten entlang der Lieferkette zu unterscheiden. Details dazu, wie sich diese Differenzierung auswirkt, sind im Anhang weiter erörtert.

3.2.2 Vergleich der sektoralen Produktionsstrukturen

Abbildung 9 stellt die aus dem Komponentenmapping abgeleiteten sektoralen Produktionsstrukturen der vier betrachteten Elektrolyseurtechnologien gegenüber. Dargestellt ist, welcher Anteil der jeweiligen Herstellkosten den zugeordneten Wirtschaftszweigen zufällt. Die über Lieferbeziehungen zusätzlich einbezogenen Vorleistungen aus weiteren Wirtschaftsbereichen werden hier noch nicht abgebildet, sondern erst im Input-Output Modell in Kapitel 5 erfasst. Über alle Technologien hinweg zeigt sich eine breite industrielle Basis im verarbeitenden Gewerbe: Besonders relevant sind die Herstellung von Metallerzeugnissen, elektronischen und optischen Erzeugnissen, elektrischen Ausrüstungen sowie der Maschinenbau. Hinzu kommen technologiespezifische Beiträge aus der chemischen Industrie, der Metallerzeugung und -bearbeitung sowie bei der SOEL aus der Herstellung keramischer Erzeugnisse.

Gleichzeitig weisen die Technologien unterschiedliche sektorale Schwerpunkte auf. Die Produktionsstruktur der PEMEL ist vergleichsweise stark durch elektronische und chemische Erzeugnisse sowie durch die Metallerzeugung und -bearbeitung geprägt. Dies ist insbesondere auf die Membran-Elektroden-Einheit, die Bipolarplatten und die porösen Transportschichten zurückzuführen. Bei der AEMEL entfällt ebenfalls ein hoher Anteil der Herstellkosten auf chemische Erzeugnisse, vor allem aufgrund der Membran-Elektroden-Einheit. Im Vergleich zur PEMEL haben die Metallerzeugung und -bearbeitung jedoch ein geringeres Gewicht. Der vergleichsweise geringe Maschinenbauanteil von PEMEL und AEMEL erklärt sich insbesondere dadurch, dass, anders als bei AEL und SOEL, in diesen Referenzsystemen kein zusätzlicher Kompressor verbaut wird. Entsprechend entfällt ein größerer Anteil der Herstellkosten auf material- und elektronikintensive Stack- und Systemkomponenten.

Die AEL weist dagegen eine stärkere Ausrichtung auf die Herstellung von Metallerzeugnissen und den Maschinenbau auf. Hier wirken sich insbesondere die metallisch geprägten Stackkomponenten, die Gasaufbereitung und der zusätzlich berücksichtigte Kompressor aus. Auch die SOEL ist durch vergleichsweise hohe Anteile des Maschinenbaus und der Herstellung von Metallerzeugnissen gekennzeichnet. Ein gesonderter Anteil der Metallerzeugung und -bearbeitung wird für die SOEL

nicht ausgewiesen, da die relevanten metallischen Komponenten, insbesondere Interkonnektoren und Kompressionsstrukturen, bereits der Herstellung weiterverarbeiteter Metallerzeugnisse zugeordnet werden. Dies bedeutet nicht, dass für die SOEL keine metallurgischen Vorleistungen benötigt werden. Die damit verbundenen Produktionsleistungen sind jedoch stärker in den vorgelagerten Lieferbeziehungen verortet als in den unmittelbar berücksichtigten Komponenten. Als einzige der betrachteten Technologien weist die SOEL zudem einen relevanten Anteil der Herstellung von Glas, Glaswaren und Keramik auf. Dieser resultiert aus den keramischen Zellkomponenten und verdeutlicht die besonderen Material- und Prozessanforderungen der Hochtemperaturelektrolyse.

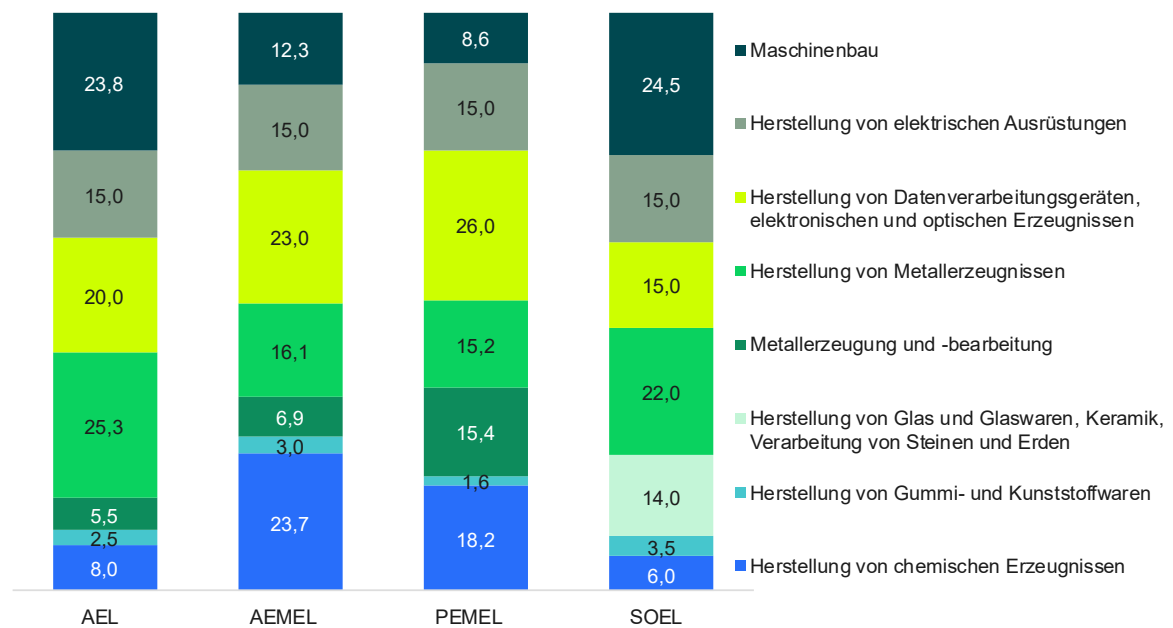


Abbildung 9: Sektorale Produktionsstruktur der vier Elektrolysetechnologien aufgegliedert nach Wirtschaftsabteilungen der WZ-Klassifikation [in %]. Quelle: WifOR Institute – eigene Darstellung auf Basis der Technologieanalyse des Fraunhofer ISE.

Die Unterschiede zwischen den sektoralen Profilen zeigen, dass der Hochlauf der Elektrolyseurproduktion je nach technologischem Schwerpunkt unterschiedliche Branchen und industrielle Kompetenzen adressiert. Während PEMEL und AEMEL stärker an chemische, elektrochemische und materialbezogene Produktionsprozesse anknüpfen, bestehen bei AEL und SOEL größere Schnittstellen zum Maschinen- und Anlagenbau. Die SOEL erweitert dieses Spektrum zusätzlich um keramische und hochtemperaturtechnische Fertigungskompetenzen.

Wie eingangs angemerkt, bilden die in Abbildung 9 ausgewiesenen Wirtschaftsabteilungen die unmittelbaren Ausgangspunkte der Produktionsimpulse ab, nicht jedoch die vollständige sektorale Verteilung der mit der Elektrolyseurherstellung verbundenen Wertschöpfung. Die zugeordneten Branchen beziehen ihrerseits Vorleistungen aus weiteren Wirtschaftszweigen, die im Komponentenmapping nicht direkt sichtbar werden. Diese vorgelagerten Lieferbeziehungen werden im später eingesetzten Input-Output-Modell abgebildet, indem die Produktionsstrukturen mit den Produktionsvolumina und Kostenannahmen der Marktszenarien verknüpft werden. Bevor die sektoralen Profile in die ökonomische Modellierung eingehen, untersucht Kapitel 4, in welchem Umfang entsprechende Hersteller-, Zuliefer- und Forschungskompetenzen bereits in Ostdeutschland vorhanden und räumlich gebündelt sind. Auf dieser Grundlage lassen sich in Kapitel 5 neben den direkten Effekten in den unmittelbar involvierten Branchen auch die indirekten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte entlang der vorgelagerten Lieferketten ermitteln.

4 Ostdeutschland als Produktions- und Zulieferstandort

4.1 Aktuelle Hersteller- und Zulieferlandschaft in Ostdeutschland

Um die Akteurslandschaft in den sechs ostdeutschen Bundesländern hinsichtlich ihrer Beteiligung an Elektrolysetechnologien zu bewerten, wurde eine umfangreiche systematische Recherche durchgeführt. In diesem Zuge wurde eine Akteursliste erstellt. Ziel der Liste ist es, die aktiven Akteure im Kontext der Elektrolyseherstellung darzustellen und hinsichtlich ihrer Tätigkeiten zu klassifizieren. Die Recherche stützt sich dabei primär auf öffentlich verfügbare sowie interne Quellen, einschlägige Fachzeitschriften und Informationen regionaler Stakeholder. Hierbei ist festzuhalten, dass es eine Vielzahl weiterer Akteure im Kontext der Wasserstoffwirtschaft gibt, die andere Elemente der Wertschöpfungskette adressieren. Diese sind nicht Gegenstand der Liste. Für einzelne Akteure ist dagegen keine eindeutige Einordnung möglich, sodass Abwägungen getroffen werden mussten. Die identifizierten Akteure wurden thematisch in folgende Kategorien untergliedert, um ihre jeweilige Position innerhalb der Wertschöpfungskette eindeutig zuordnen zu können:

- Hersteller von Elektrolyseuren
- Anbieter von Komponenten & Peripheriegeräten
- Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen

Für die nachfolgende geographische Analyse in Kapitel 4.2 wurden darüber hinaus alle identifizierten Akteure georeferenziert.

Insgesamt konnten 107 Akteure in Ostdeutschland identifiziert werden, deren Verteilung nach Branche Abbildung 10 zu entnehmen ist. Diese Aufschlüsselung verdeutlicht die bestehende Akteursvielfalt Ostdeutschlands im Bereich der Elektrolysetechnologien. Im Vergleich zur gesamtdeutschen Akteurslandschaft zeigt sich dabei insbesondere eine überdurchschnittlich starke Ausprägung im Bereich der Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen.

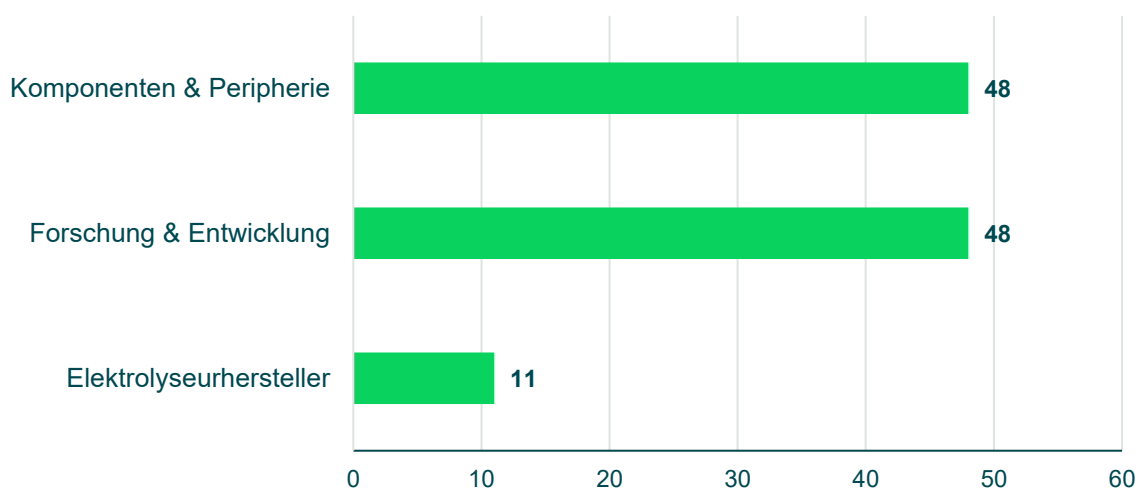


Abbildung 10: Auswertung der Akteursliste für die ostdeutschen Bundesländer, aufgeteilt nach den untersuchten Hauptkategorien (Branchen). Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis der innerhalb dieser Studie durchgeführten Akteursanalyse.

4.2 Regionale Cluster und Spezialisierungspotenziale

Die Bildung regionaler Kompetenzzentren, verstanden als räumliche Verbindung von Forschung und produzierendem Gewerbe, gilt als wesentliche Voraussetzung und Indikator für einen potenziellen

Hochlauf einer Elektrolysewertschöpfungskette. Die ostdeutschen Bundesländer verfügen bereits heute über eine breite Basis an Forschungseinrichtungen sowie Produktionsstätten für Elektrolyseure und zugehörige Komponenten. Um die räumliche Verteilung dieser Forschungs-, Hersteller- und Zulieferlandschaft systematisch bewerten zu können, wurde im Rahmen dieser Studie eine räumliche Clusteranalyse durchgeführt, deren Grundlage die in Kapitel 4.1 erstellte Akteursliste bildet. Die kartographische Verortung der identifizierten Stakeholder ist in Abbildung 11 dargestellt.

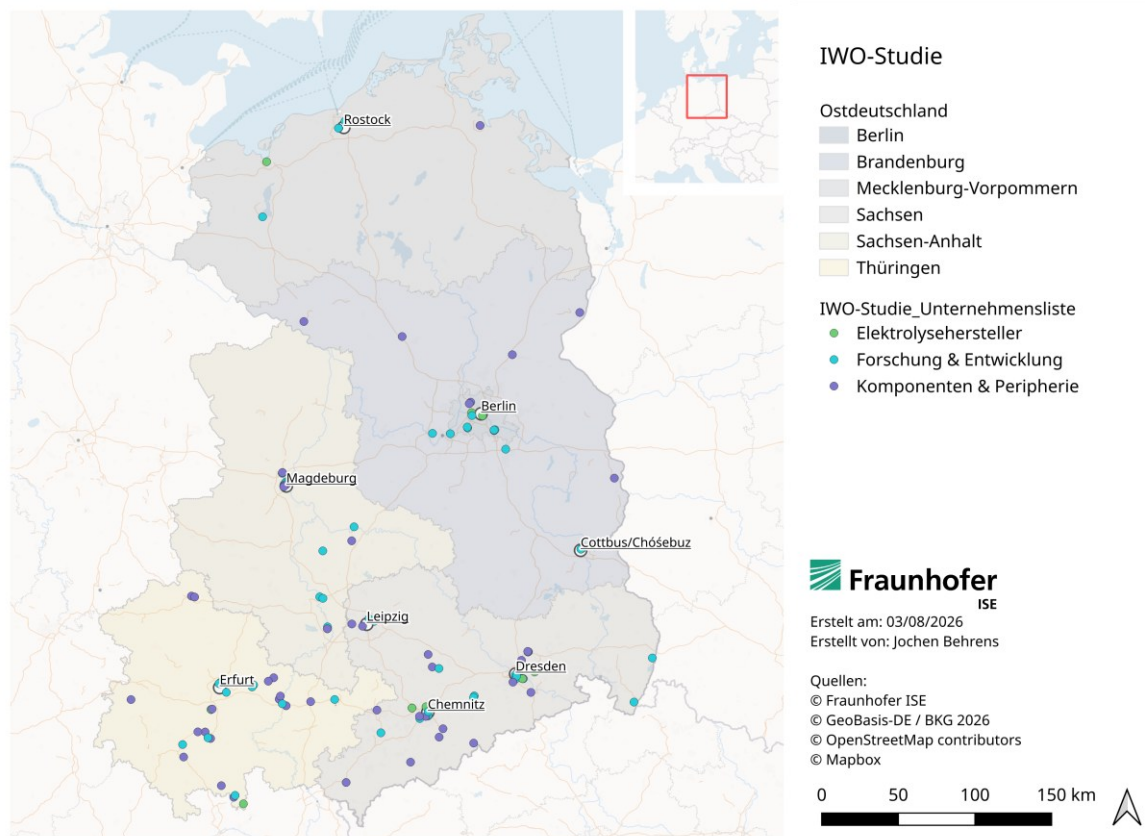


Abbildung 11: Kartographische Darstellung der Akteursliste mit Bezug zur Elektrolyseurherstellung entsprechend der Branche in der untersuchten Region Ostdeutschland.

Die Clusterbildung erfolgte mithilfe des DBSCAN-Algorithmus (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), der Cluster anhand zweier Parameter definiert: der Mindestanzahl an Akteuren sowie deren maximaler räumlicher Distanz zueinander. Die Definition eines Clusters erfordert hierbei mindestens drei Akteure in einem Suchradius von 15 km. Auf dieser Basis werden die Akteure des Punktlayers aus Abbildung 11 in einem ersten Schritt eindeutigen Cluster-IDs zugeordnet. Weitere Informationen zur Methodik der Clusterbildung sind im Anhang zu finden.

Um darüber hinaus eine qualitative Aussage zur Güte der identifizierten Cluster treffen zu können, wird in einem zweiten Schritt eine gewichtete Bewertung vorgenommen. Diese berücksichtigt die Punktdichte, die Kategoriebreite (Anzahl verteilter Branchen) sowie die Balance der Clusterstruktur. Die zugrundeliegenden Bewertungsparameter und ihre jeweilige Bedeutung sind in Tabelle 11 im Anhang aufgeführt.

Eine höhere Gesamtwertung signalisiert dabei eine bessere Clusterqualität in Bezug auf die in Tabelle 12 definierten Parameter. Für die finale Bewertung werden die drei Einzelkomponenten

multiplikativ miteinander verknüpft und anschließend normiert, sodass ein Cluster nur dann eine hohe Gesamtwertung erzielt, wenn es in allen drei Dimensionen gleichermaßen gut abschneidet. In einem letzten Schritt werden die bewerteten Cluster auf die Gemeindeebene (LAU2) verschnitten und räumlich aggregiert, sodass sie in eine administrative Einheit überführt werden. Cluster, die sich über mehr als eine Gemeinde erstrecken, werden dabei zu einem gemeinsamen Cluster zusammengefasst. Die resultierenden Cluster einschließlich ihrer Bewertung sind in Abbildung 12 kartographisch dargestellt. Die Farbgebung reicht von Grün (niedrige Wertung) bis Rot (hohe Wertung). Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel fließen in die Szenariengestaltung der Marktanteile in Kapitel 5.1 ein.

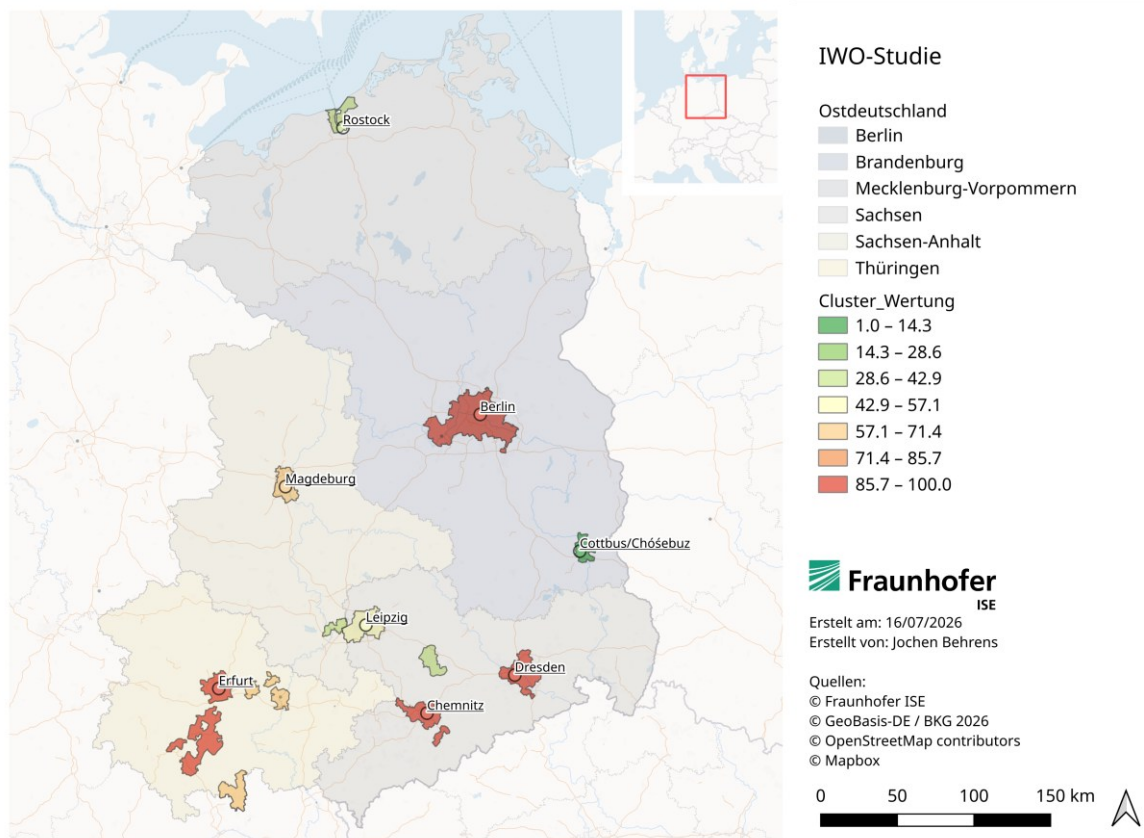


Abbildung 12: Clusterkarte von Ostdeutschland mit den Clusterwertungen nach Dichte, Breite und Balance, auf Gemeindeebene (LAU2) aufgelöst. Erstrecken sich Cluster über eine Gemeinde hinweg, werden die Gebietskulissen zusammengezogen. Die Wertung eines Clusters ist gestuft von niedrig (grüne Einfärbung) bis hin zur höchsten Wertung (rot) und basiert auf den Kriterien wie in Kapitel 4.2 beschrieben.

In Ostdeutschland zeigen sich die größten Elektrolyse-Cluster in den Stadtregionen Berlin-Potsdam, Dresden, dem Korridor Erfurt–Arnstadt–Sonneberg sowie im Raum Chemnitz. Diese Regionen erreichen auf der Clusterkarte die höchsten Bewertungen und decken sich mit der Verteilung von Elektrolyseurherstellern, Forschungsakteuren und Komponentenkompetenzen. Mittlere Clustergrößen sind im Raum Magdeburg und Leipzig erkennbar, während Rostock und Cottbus zwar sichtbare Aktivitäten aufweisen, jedoch mit geringerer Dichte und technologischer Breite.

Der räumliche Schwerpunkt der Elektrolyseurherstellung in Ostdeutschland liegt im Dreieck Dresden – Chemnitz – Limbach-Oberfrohna. Hier konzentrieren sich Herstellerkompetenzen in den Technologien AEL und SOEL, ergänzt durch Stackfertigung sowie zugehörige Fertigungs- und Beschichtungstechnologien. Diese regionale Verdichtung macht den Großraum Dresden–Chemnitz

zum wichtigsten ostdeutschen Standort für eine industrielle Elektrolyseurproduktion und zur Region mit der breitesten Verankerung entlang der Wertschöpfungskette.

Berlin nimmt innerhalb Ostdeutschlands eine Sonderrolle als zentraler PEMEL-Standort ein. Neben der Präsenz von Herstellerunternehmen besteht hier ein dichtes Forschungsumfeld mit PEM-nahen Material-, Katalyse- und Systemkompetenzen welches die industriellen Aktivitäten komplementär ergänzt.

Der Korridor Erfurt – Arnstadt – Sonneberg bildet ein technologisch spezialisiertes Cluster, in dem sich Hersteller, stacknahe Fertigung, Prüfkompetenzen und Forschungseinrichtungen gegenseitig verstärken. Die technologische Abdeckung umfasst AEL, PEMEL und SOEL, wobei dieser Korridor insbesondere für die Hochtemperatur-Elektrolyse nach dem Raum Dresden–Chemnitz die ausgeprägtesten Kompetenzen in Ostdeutschland aufweist.

Der Raum Magdeburg zeigt Stärken in Testinfrastruktur, Materialentwicklung, Automatisierung und industrienaher Integration, verfügt jedoch über weniger ausgeprägte Herstellercluster als die vorgenannten Regionen. Der Großraum Leipzig weist ergänzende Aktivitäten im Bereich Systemintegration und anwendungsnaher Entwicklung auf. Der Raum Cottbus ist stärker durch Forschung und Systemintegration geprägt, während Rostock und Umgebung punktuelle Präsenz in PEMEL und materialnaher Forschung aufweist.

Insgesamt ist Ostdeutschland technologisch vor allem bei der AEL, PEMEL und SOEL-Technologie gut aufgestellt. Für die SOEL-Technologie verfügt Ostdeutschland über sehr gute Voraussetzungen, diese zur Marktreife weiterzuentwickeln. AEMEL spielt in der vorliegenden Cluster- und Akteursanalyse bislang nur im Forschungsbereich eine Rolle.

5 Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale bis 2045

5.1 Szenarien zu Marktanteilen in der Elektrolyseurproduktion für Ostdeutschland

Abbildung 13 setzt das in Abbildung 1 eingeführte methodische Fließschema fort und illustriert die weiteren Schritte zur Ableitung der Fertigungskapazitäten auf deutscher und ostdeutscher Ebene. Ausgehend von der final bestimmten europäischen Fertigungsquote erfolgt in einem ersten Schritt die Disaggregation auf Deutschland. Auf Basis von Herstellerangaben wird der Anteil der deutschen Fertigung an der europäischen Gesamtkapazität bestimmt und mit den technologiespezifischen Anteilen der IEA-Datenbank verschnitten, woraus die finale deutsche Fertigungsquote resultiert. In einem zweiten Schritt wird der Anteil ostdeutscher Hersteller an der deutschen Fertigung abgeleitet. Ergänzend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die einzelnen Rechenschritte und zugrundeliegenden Annahmen werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert.

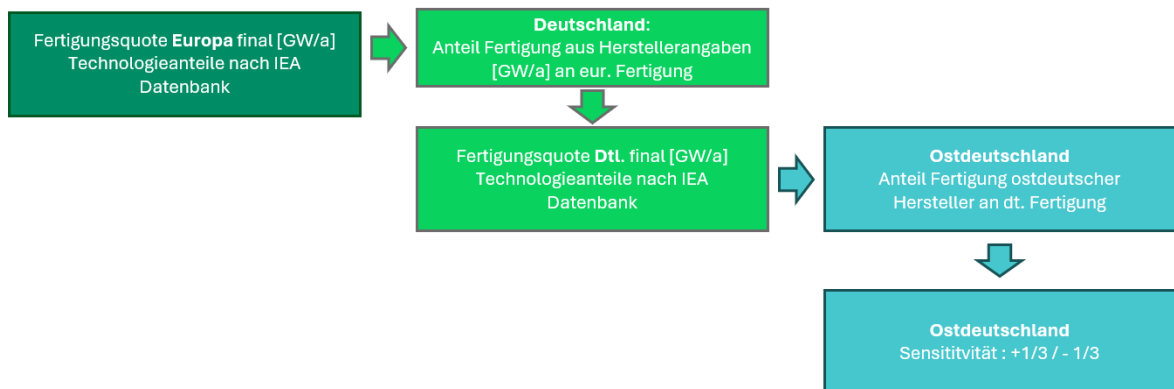


Abbildung 13: Fortsetzung des Fließschemas aus Abbildung 1 zeigt die weiteren Schritte zur Ableitung der Fertigungskapazitäten in Deutschland und der ostdeutschen Länder.

1. Regionale Aufteilung der Fertigungskapazitäten: Deutschland

Grundlage für die Ableitung des deutschen Anteils an der europäischen Elektrolyseur-Fertigungskapazität bildet eine umfassende Analyse des Fraunhofer ISE zu bestehenden, angekündigten und geplanten Fertigungskapazitäten des Großteils der europäischen Hersteller. Deutschland verfügt bereits heute über eine ausgeprägte Herstellerlandschaft im Bereich der Elektrolysetechnologien und nimmt damit sowohl in Europa als auch im globalen Kontext eine starke industrielle Position ein. Die Auswertung ergibt, dass bis 2030 rund 50–70 % der europäischen Elektrolyseur-Fertigungskapazität auf Deutschland entfallen werden, was einer maximalen deutschen Kapazität von bis zu 8 GW bei einer europäischen Gesamtkapazität von bis zu 13 GW entspricht. Da die zugrundeliegenden Herstellerdaten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, wird in der vorliegenden Studie ein konservativer Wert von 50 % angenommen. Aufgrund fehlender zeitlich aufgelöster Daten wird dieser Anteil für alle Stützjahre konstant übernommen.

Die resultierende Entwicklung der deutschen Fertigungskapazitäten ist für alle drei Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch) in Abbildung 24 im Anhang dargestellt, unter der Annahme, dass sich der Wasserstoffbedarf gemäß Abbildung 4 entwickelt. Ergänzend wurde eine Sensitivitätsvariante mit einem erhöhten europäischen Weltmarktanteil von 25 % berechnet, um die Auswirkungen einer stärkeren globalen Marktposition europäischer Hersteller abzubilden. Diese Variante ist ebenfalls in Abbildung 24 ausgewiesen und wirkt sich entsprechend auf die abgeleiteten Kapazitätsanteile für Deutschland und Ostdeutschland aus.

2. Aufteilung der Fertigungskapazität nach Elektrolysetechnologien für Deutschland

Methodisch konsistent mit dem für den globalen und europäischen Markt gewählten Vorgehen wurden auch die Daten für Deutschland auf Basis der IEA-Datenbank [8] erhoben. Als Grundlage dienen ausschließlich Projekte, die sich zum Erhebungszeitpunkt im Betrieb oder im Bau befanden. Die entsprechende Aufteilung ist in Abbildung 14 dargestellt und die ermittelten Verhältnisse wurden für den nachfolgenden Schritt zur Bestimmung der Fertigungskapazität in Ostdeutschland übernommen. Für AEMEL und SOEL konnten zum Erhebungszeitpunkt nur sehr geringe Fertigungskapazitäten identifiziert werden. Aufgrund ihres hohen technischen Potenzials werden beiden Technologien ab 2035 modellseitig Marktanteile zugewiesen, die eine künftige Marktdurchdringung abbilden sollen.

Die benötigte Elektrolyseur-Fertigungskapazität in Deutschland wächst im Basisszenario bis 2045 auf rund 12 GW/a an. Dabei stellt die PEMEL-Technologie über den gesamten Betrachtungszeitraum die dominierende Technologie dar, gefolgt von der AEL. Die Anteile von SOEL und AEMEL nehmen ab 2035 sichtbar zu. Parallel dazu steigt der gesamtdeutsche Wasserstoffbedarf (gepunktete Linie, rechte Achse) kontinuierlich an und erreicht 2045 einen Wert von rund 3,0 Mt/a. Der gleichläufige Anstieg beider Größen verdeutlicht den direkten Zusammenhang zwischen wachsendem Wasserstoffbedarf und der erforderlichen Skalierung der inländischen Fertigungskapazitäten.

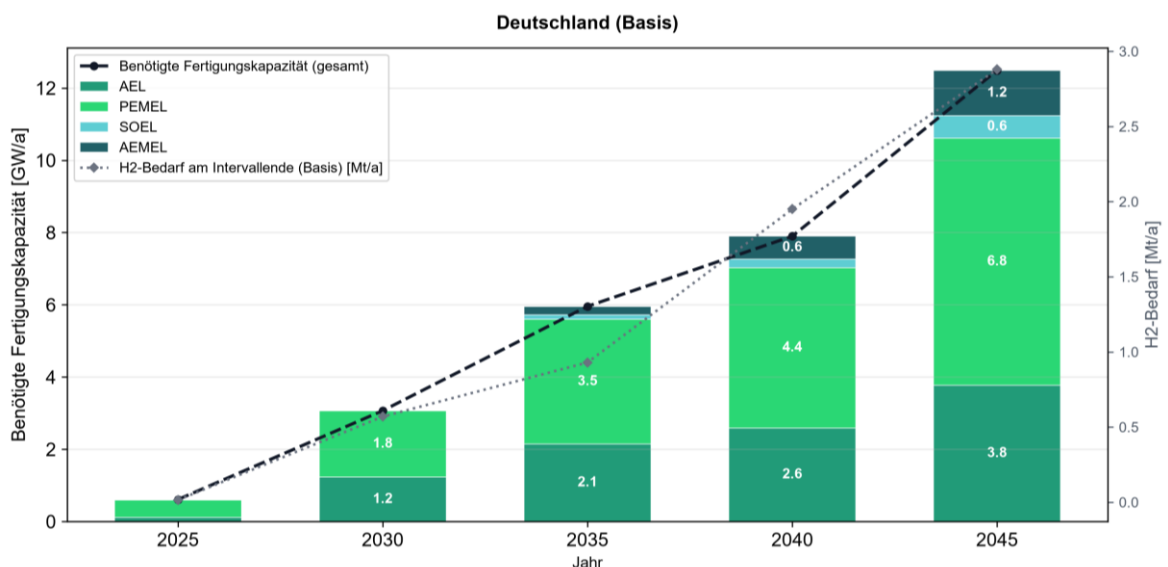


Abbildung 14: Entwicklung der benötigten Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) und H₂-Bedarf in Mt/a, aufgeteilt nach Stützjahr und geschätzte Marktanteile der Elektrolysetechnologien für das Basisszenario in Deutschland. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8] und eigenen Annahmen.

3. Regionale Aufteilung der Fertigungskapazitäten: Ostdeutsche Bundesländer

Ausgangspunkt für die Ableitung des ostdeutschen Anteils an der deutschen Elektrolyseur-Fertigungskapazität bildet das Verhältnis der bestehenden und angekündigten Kapazitäten: Den erfassten ostdeutschen Kapazitäten von maximal 5 GW stehen im übrigen Deutschland Kapazitäten von maximal 3,5 GW gegenüber, was rechnerisch einem ostdeutschen Anteil von rund 60 % entspräche. Da jedoch ein erheblicher Teil der relevanten Zulieferbetriebe in Westdeutschland ansässig ist und deren Wertschöpfungsanteil in den Kapazitätsdaten nicht vollständig abgebildet wird, erscheint ein auf 55 % korrigierter Wert als methodisch angemessener. Dieser wird mangels belastbarer Daten für alle Stützjahre konstant fortgeschrieben. Die in Kapitel 4 durchgeführte

Analyse der Akteurslandschaft stützt diese Einschätzung: Ostdeutschland verfügt bereits heute über eine substanzielle und diversifizierte Basis an Herstellern, Forschungseinrichtungen und Komponentenkompetenzen im Bereich der Elektrolysetechnologien, die die getroffenen Annahmen zur regionalen Fertigungskapazität plausibilisiert.

Da mit dieser regionalen Verteilung erhebliche Unsicherheiten verbunden sind – z. B. hinsichtlich der tatsächlichen Realisierung angekündigter Kapazitäten oder zukünftiger Standortentscheidungen – wurde eine Sensitivitätsanalyse mit einer Bandbreite von $\pm 1/3$ eingeführt (siehe Abbildung 15). Auf diese Weise werden mögliche regionale Schwankungen in der Kapazitätsverteilung methodisch transparent abgebildet.

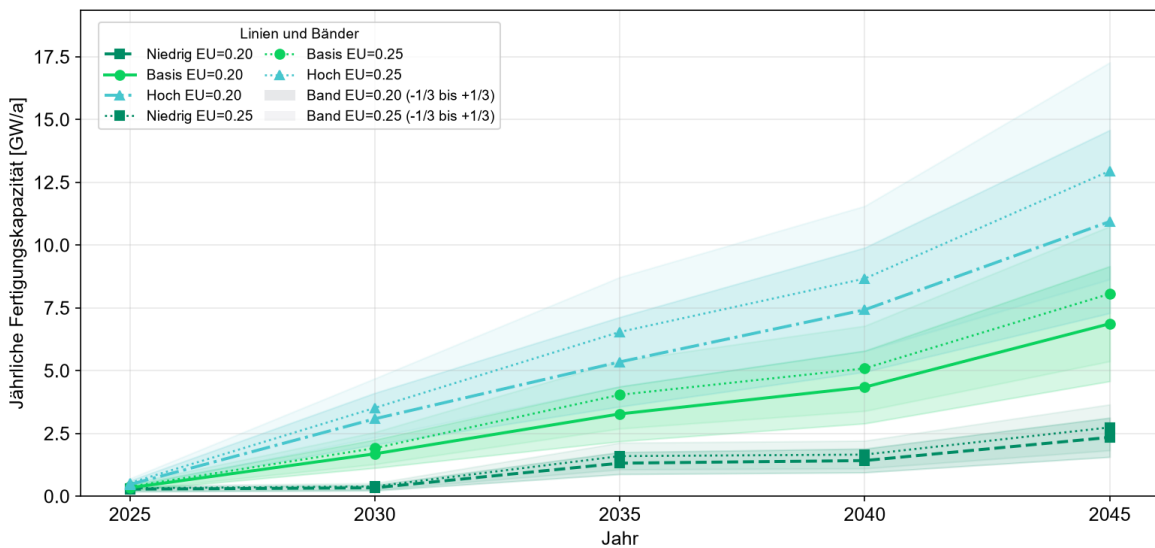


Abbildung 15: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazität (Zubaurate) in GW/a für Ostdeutschland, in den drei Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch) für einen EU-Anteil am globalen Markt von 20 % bzw. 25 % und jeweils mit $\pm 1/3$ Unsicherheitsbereich. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8] und eigenen Annahmen.

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich ein kontinuierliches und deutliches Wachstum der ostdeutschen Fertigungskapazitäten. Während die Werte im Jahr 2030 zwischen ca. 1 und 5 GW/a liegen, werden bis 2045 je nach Szenario Kapazitäten von ca. 2,5 bis 17 GW/a erreicht. Die zunehmende Spreizung zwischen Niedrig- und Hoch-Szenario gegen Ende des Betrachtungszeitraums verdeutlicht die erheblichen Unsicherheiten langfristiger Fertigungskapazitätsprojektionen. Diese Spannweiten verdeutlichen, dass die ostdeutsche Elektrolyseurproduktion einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung des nationalen Ziels von mindestens 10 GW installierter Elektrolysekapazität bis 2030 leisten kann [19].

5.2 Wertschöpfungspotenziale und regionale Lieferketten

Die vorangegangenen Kapitel haben schrittweise die Grundlagen für die Bewertung der regionalwirtschaftlichen Potenziale geschaffen. Ausgehend von den Szenarien zum Markthochlauf wurden zunächst die möglichen Produktionsvolumina der Elektrolyseurherstellung in Ostdeutschland bestimmt. Die Technologieanalyse und die sektorale Zuordnung der Komponenten zeigen, welche Wirtschaftszweige an der Herstellung der unterschiedlichen Elektrolysetechnologien beteiligt sind. Auf Grundlage der beschriebenen Produktionsszenarien werden im Folgenden die Bruttowertschöpfungspotenziale der Szenarien aufgezeigt und danach differenziert, in welchem

Umfang die Effekte bei den Elektrolyseurherstellern selbst oder entlang der vorgelagerten Lieferketten entstehen.

Die Wertschöpfung, die unmittelbar bei den Elektrolyseurherstellern entsteht, wird als direkter OEM-Effekt ausgewiesen. Als indirekter Effekt wird die zusätzliche Wertschöpfung bezeichnet, die durch die Nachfrage nach zugelieferten Komponenten, Materialien und Dienstleistungen entlang der vorgelagerten Lieferketten ausgelöst wird. Sie wird mithilfe eines multiregionalen Input-Output-Modells berechnet. Das Modell bildet sowohl die unmittelbar benötigten Zulieferleistungen als auch weitere vorgelagerte Produktionsstufen ab und ermöglicht eine Abschätzung ihrer räumlichen Verteilung. Der Gesamteffekt ergibt sich aus der Summe der direkten OEM-Wertschöpfung und der indirekten Wertschöpfung entlang der vorgelagerten Lieferketten. Eine ausführliche Beschreibung des Modells, seiner Datengrundlagen und der Berechnungsschritte findet sich im Anhang.

Die folgenden Ergebnisse sind als szenarienbasierte Abschätzung wirtschaftlicher Potenziale zu verstehen. Sie zeigen, welche Wertschöpfung sich unter den in Kapitel 5.1 definierten Markt- und Standortannahmen sowie den zugrunde gelegten Technologie-, Produktions- und Lieferkettenstrukturen ergeben könnte. Induzierte Effekte, die durch zusätzliche Konsumausgaben aus den Einkommen der Beschäftigten ausgelöst werden, sind nicht berücksichtigt. Ebenso beschränkt sich die Analyse auf die Effekte der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland. Nicht erfasst werden mögliche Lieferungen ostdeutscher Zulieferunternehmen an Elektrolyseurhersteller außerhalb der Region. Daraus könnten zusätzliche Wertschöpfungseffekte in Ostdeutschland entstehen, die in den nachfolgenden Ergebnissen nicht abgebildet sind.

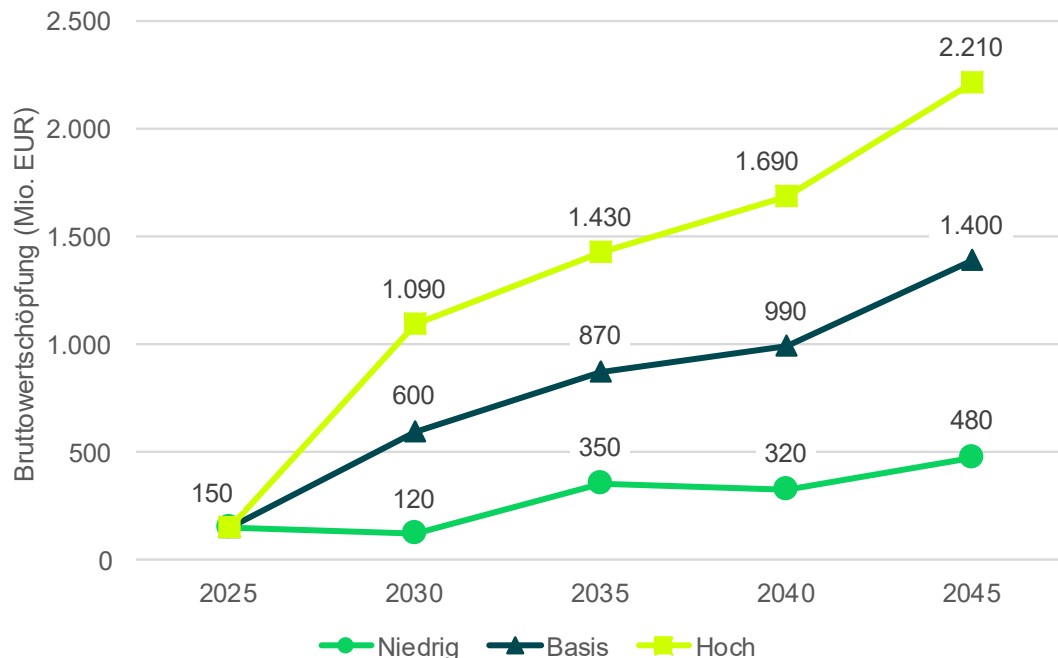


Abbildung 16: Gesamte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Marktszenario, 2025–2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). Die drei Szenarien stellen keine Prognosebandbreite dar, sondern unterschiedliche Markthochlaufpfade. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen

Die drei in Abbildung 16 dargestellten Verläufe verdeutlichen, wie stark die regionalwirtschaftlichen Potenziale vom zukünftigen Markthochlauf des Elektrolyseurmarktes und den daraus abgeleiteten

Produktionsvolumina in Ostdeutschland abhängen. Im Basisszenario steigt die gesamte Bruttowertschöpfung von rund 150 Mio. Euro im Jahr 2025 auf rund 600 Mio. Euro im Jahr 2030. Bis 2040 erhöht sich der Effekt auf knapp eine Milliarde Euro und erreicht im Jahr 2045 rund 1,4 Mrd. Euro. Dies entspricht rechnerisch gut 1,2 Prozent der für 2045 modellseitig fortgeschriebenen Bruttowertschöpfung des ostdeutschen verarbeitenden Gewerbes. Auch im Vergleich mit einzelnen bestehenden Industriebranchen stellt dies eine relevante Größenordnung dar. So entspricht die Bruttowertschöpfung im Basisszenario etwa der heutigen Größenordnung der Herstellung von Papier und Papierwaren sowie der Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren in Ostdeutschland.

Im niedrigen Szenario erreicht die Bruttowertschöpfung im Jahr 2045 dagegen nur rund 480 Mio. Euro. Die Entwicklung verläuft dabei nicht durchgehend steigend. Der leichte Rückgang zwischen 2035 und 2040 ergibt sich daraus, dass die erzielte Bruttowertschöpfung neben der produzierten Kapazität auch von den im Zeitverlauf sinkenden Herstellungskosten bestimmt wird. Im hohen Szenario steigt die Bruttowertschöpfung dagegen bereits bis 2030 auf über eine Milliarde Euro und erreicht 2045 rund 2,2 Mrd. Euro. Dies entspricht in der Größenordnung etwa der heutigen Bruttowertschöpfung der Kokerei und Mineralölverarbeitung in Ostdeutschland.

Die Spannweite zwischen dem niedrigen und dem hohen Szenario beträgt 2045 rund 1,7 Mrd. Euro und zeigt, wie stark die Größenordnung des regionalwirtschaftlichen Potenzials vom Markthochlauf abhängt. Gleichzeitig ist die Höhe der tatsächlich in Ostdeutschland realisierten Wertschöpfung nicht allein durch die globale Marktentwicklung bestimmt. Die Szenarien unterstellen bestimmte Anteile Ostdeutschlands an der Elektrolyseurproduktion. Gelingt es ostdeutschen Herstellern, höhere Anteile an der Elektrolyseurproduktion zu erreichen, könnte die regionale Wertschöpfung daher auch innerhalb eines weniger dynamischen globalen Markthochlaufs höher ausfallen als hier modelliert.

Effekt	2025	2045 Niedrig	2045 Basis	2045 Hoch
Direkter OEM-Effekt	100	310	900	1.430
Indirekter Effekt:				
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	70	210	620	980
• aktuelle Zulieferstruktur	50	170	500	780
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	40	130	370	590
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	150	480	1.400	2.210

Tabelle 3: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Referenzjahr 2025 und nach Marktszenario 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Tabelle 3 differenziert den Gesamteffekt zusätzlich nach direkter und indirekter Wertschöpfung. Der überwiegende Teil der Bruttowertschöpfung entsteht unmittelbar bei den Elektrolyseurherstellern. Im Basisszenario entfallen im Jahr 2045 rund 900 Mio. Euro auf den direkten OEM-Effekt. Weitere rund 500 Mio. Euro entstehen entlang der vorgelagerten ostdeutschen Lieferketten. Der indirekte Effekt macht damit gut ein Drittel der gesamten Bruttowertschöpfung aus oder anders ausgedrückt

entstehen je Euro direkter Wertschöpfung bei den Elektrolyseurherstellern zusätzlich rund 55 Cent Bruttowertschöpfung in ostdeutschen Zulieferketten. Dieser regionale Wertschöpfungsmultiplikator unterscheidet sich aufgrund der technologiespezifischen Komponenten- und Produktionsstrukturen zwischen den Elektrolysetechnologien. Für AEL liegt er mit rund 62 Cent und für SOEL mit rund 58 Cent über dem Durchschnitt, während AEMEL mit rund 53 Cent und PEMEL mit rund 52 Cent geringere Multiplikatoren aufweisen. PEMEL stellt aufgrund des im Marktszenario unterstellten Produktionsvolumens dennoch den größten absoluten Wertschöpfungsbeitrag in der Elektrolyseherstellung. Da für die drei Marktszenarien dieselben technologiespezifischen Produktions- und Lieferstrukturen unterstellt werden, bleibt das Verhältnis zwischen direkter und indirekter Wertschöpfung über die Szenarien hinweg weitgehend stabil.

Während die Marktszenarien vor allem die Größenordnung des Produktionsimpulses bestimmen, beeinflusst die regionale Zulieferstruktur, welcher Anteil der vorgelagerten Wertschöpfung innerhalb Ostdeutschlands entsteht. Im Basisszenario 2045 reicht der indirekte Effekt bei einer Variation des regionalen Zulieferanteils um ± 25 Prozent gegenüber der Basisannahme von rund 370 bis 620 Mio. Euro. Der direkte OEM-Effekt bleibt von dieser Variation unberührt. Die Bandbreite verdeutlicht damit, wie sich eine stärkere beziehungsweise schwächere regionale Verankerung der Zulieferleistungen auf die Wertschöpfung in Ostdeutschland auswirken könnte. Die hier betrachtete Variation des regionalen Zulieferanteils ist von der in Kapitel 5.1 untersuchten Unsicherheit des ostdeutschen Produktionsanteils zu unterscheiden.

In der zugrunde gelegten Lieferstruktur entfallen rund 45 Prozent der durch die ostdeutsche Elektrolyseurproduktion ausgelösten Zulieferwertschöpfung auf Ostdeutschland. Ein erheblicher Teil der Effekte entsteht dagegen in Westdeutschland und im Ausland. Dies spiegelt die überregional und international verflochtenen industriellen Lieferketten wider. Zugleich zeigt die Analyse, dass eine stärkere regionale Verankerung von Zulieferleistungen zusätzliche Wertschöpfung in Ostdeutschland binden könnte, ohne dass hierfür das Produktionsvolumen der Elektrolyseure selbst steigen müsste. Darüber hinaus könnten sich für wettbewerbsfähige ostdeutsche Zulieferunternehmen zusätzliche Absatzmöglichkeiten durch Lieferungen an Elektrolyseurhersteller außerhalb der Region ergeben. Diese Effekte sind in den zuvor ausgewiesenen Ergebnissen des Input-Output-Modells nicht enthalten.

Um die mögliche Größenordnung der Effekte durch Zulieferungen an westdeutsche Elektrolyseurhersteller einzuordnen, wurde ergänzend eine vereinfachte Abschätzung vorgenommen. Dabei wird eine symmetrische Produktions- und Lieferstruktur zwischen Ost- und Westdeutschland unterstellt: Es wird angenommen, dass die Elektrolyseurproduktion in Westdeutschland im Verhältnis zum jeweiligen Produktionsvolumen in vergleichbarem Umfang Nachfrage bei ostdeutschen Zulieferern auslöst wie die ostdeutsche Produktion bei Zulieferern in Westdeutschland. Unter dieser Annahme könnten im Jahr 2045 zusätzliche Bruttowertschöpfungseffekte in ostdeutschen Zulieferketten von rund 80 Mio. Euro im niedrigen Szenario, 250 Mio. Euro im Basisszenario und 380 Mio. Euro im hohen Szenario entstehen. Diese Potenziale kommen zu den zuvor ausgewiesenen Effekten der ostdeutschen Elektrolyseurproduktion hinzu. Da sie auf einer vereinfachten Abschätzung und nicht auf der vollständigen Input-Output-Modellierung beruhen, werden sie separat ausgewiesen und nicht in den Gesamteffekt eingerechnet.

Um genauer zu untersuchen, in welchen Teilen der Zulieferindustrie diese Wertschöpfung entsteht, stellt Abbildung 17 den indirekten Effekt im Jahr 2045 für das Basisszenario nach Wirtschaftsabteilungen dar. Die nachfolgende Branchenverteilung ist dabei nicht mit der in Kapitel

3.2 dargestellten unmittelbaren Produktionsstruktur gleichzusetzen. Sie umfasst zusätzlich die über das Input-Output-Modell erfassten weiteren vorgelagerten Produktionsstufen. Mit rund 130 Mio. Euro entfällt dabei der größte Beitrag auf die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen. Dies ist konsistent mit der hohen Bedeutung elektronischer Komponenten aus den Bereichen Sensorik, Steuerungs- und Messtechnik sowie sicherheitsrelevante Mess- und Überwachungstechnik. Nach dem ifo Faktenmonitor [20] zählt dieser Wirtschaftsbereich in mehreren ostdeutschen Ländern zu den fünf umsatzstärksten Industriebranchen und ist damit regional bereits vergleichsweise stark verankert. Weitere relevante Wertschöpfungsbeiträge entstehen bei der Herstellung von Metallerzeugnissen mit rund 80 Mio. Euro, der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen ebenfalls mit rund 80 Mio. Euro sowie im Maschinenbau mit rund 60 Mio. Euro. Diese Branchen spielen bereits in den in Kapitel 3.2 dargestellten sektoralen Produktionsstrukturen der Elektrolyseure eine zentrale Rolle. Die Ergebnisse zeigen damit, dass die wirtschaftlichen Potenziale der Elektrolyseurproduktion in erheblichem Umfang an bestehende industrielle Branchen und Kompetenzen in Ostdeutschland anknüpfen können. Eine stärkere Einbindung bestehender Unternehmen dieser Branchen in die Elektrolyseur-Lieferketten könnte daher dazu beitragen, einen größeren Teil der indirekten Wertschöpfung in Ostdeutschland zu verankern.

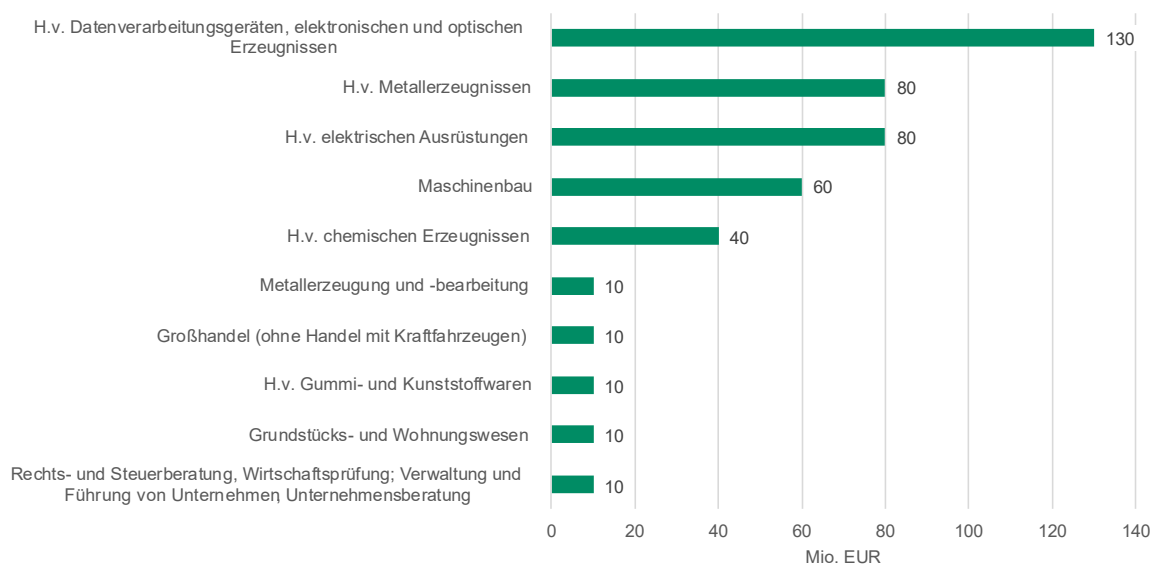


Abbildung 17: Die Abbildung zeigt die indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2045 für die zehn wichtigsten Zulieferbranchen (in Mio. EUR, Preise von 2023). Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse zwei unterschiedliche Einflussgrößen: Die Entwicklung des Elektrolyseurmarktes und der von ostdeutschen Herstellern erreichte Produktionsanteil bestimmen maßgeblich die Größenordnung des wirtschaftlichen Potenzials. Die regionale Verankerung der Zulieferketten beeinflusst dagegen, welcher Anteil der vorgelagerten Wertschöpfung zusätzlich in Ostdeutschland gebunden werden kann.

5.3 Beschäftigungspotenziale und Qualifikationsprofile

Die in Kapitel 5.2 dargestellten Wertschöpfungspotenziale sind zugleich mit Beschäftigungseffekten bei den Elektrolyseurherstellern und entlang der vorgelagerten Lieferketten verbunden. Wie hoch diese ausfallen, hängt jedoch nicht allein von der Höhe der jeweiligen Wertschöpfung ab. Die

beteiligten Wirtschaftszweige unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Arbeitsintensität und die technologiespezifischen Produktionsstrukturen führen dazu, dass je nach Elektrolysetechnologie unterschiedliche Branchen und damit unterschiedliche Beschäftigungsstrukturen angesprochen werden. Im Folgenden wird daher untersucht, welche Beschäftigungspotenziale mit den dargestellten Produktionsszenarien verbunden sind und welche Berufs- und Qualifikationsprofile sich daraus ableiten lassen.

Die Beschäftigungseffekte werden aus den im Input-Output-Modell ermittelten sektoralen Produktionswirkungen abgeleitet und als sozialversicherungspflichtige Beschäftigte in Personen ausgewiesen. Hierzu werden die Produktionswerte der einzelnen Wirtschaftszweige mit sektoralen Beschäftigungskoeffizienten verknüpft, die Zahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten je Einheit Produktionswert abbilden. Analog zur Wertschöpfung wird zwischen direkten Beschäftigungseffekten bei den Elektrolyseurherstellern und indirekten Effekten entlang der ostdeutschen Zulieferketten unterschieden.

Um die Beschäftigungseffekte hinsichtlich der damit verbundenen Tätigkeitsprofile einzuordnen, werden die sektoralen Ergebnisse anschließend anhand einer Sonderauswertung der Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit auf Berufsgruppen und Anforderungsniveaus verteilt. Dabei werden die aktuellen Berufs- und Anforderungsstrukturen der jeweils beteiligten Wirtschaftszweige zugrunde gelegt. Die Ergebnisse zeigen somit, in welchen Berufs- und Anforderungsbereichen sich die modellierten Beschäftigungseffekte konzentrieren. Sie stellen jedoch keine Prognose offener Stellen oder zukünftiger Fachkräfteengpässe dar. Die methodischen Grundlagen und verwendeten Datensätze werden im Methodenanhang ausführlich beschrieben.

Die drei in Abbildung 18 dargestellten Beschäftigungspfade ergeben sich aus den in Kapitel 5.1 beschriebenen Marktszenarien und den daraus abgeleiteten Produktionsvolumina in Ostdeutschland. Ausgehend von einem Beschäftigungseffekt von rund 1.670 Personen im Jahr 2025 erhöht sich dieser im Basisszenario bis 2030 auf rund 6.450 Personen und damit nahezu auf das Vierfache. Bis 2035 steigt der Effekt auf rund 9.020 Personen und erreicht nach einem moderateren Anstieg bis 2040 im Jahr 2045 rund 12.570 Personen. Damit liegt der modellierte Beschäftigungseffekt 2045 bei etwa dem Siebeneinhalbfachen des Ausgangswerts von 2025. Vergleicht man diesen Wert mit den heutigen sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten im verarbeitenden Gewerbe in Ostdeutschland, so kommt man rechnerisch auf rund 1,4 Prozent. Auch im Vergleich mit einzelnen heutigen Wirtschaftsbereichen handelt es sich um eine relevante Größenordnung: Die rund 12.570 Personen im Basisszenario entsprechen etwa dem derzeitigen Beschäftigungsumfang der Telekommunikationsbranche in Ostdeutschland mit rund 12.810 Beschäftigten und liegen über den Beschäftigtenzahlen bei Rundfunkveranstaltern mit rund 11.150 Personen sowie in der Herstellung von Textilien mit rund 10.940 Personen.

Die Spannweite zwischen den Marktszenarien nimmt im Zeitverlauf deutlich zu. Im niedrigen Szenario liegt der Beschäftigungseffekt im Jahr 2045 bei rund 4.290 Personen. Im hohen Szenario werden rund 20.010 Personen erreicht. Dies liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die heutige sozialversicherungspflichtige Beschäftigung in der Herstellung pharmazeutischer Erzeugnisse in Ostdeutschland. Damit unterscheiden sich die Beschäftigungspotenziale zwischen dem niedrigen und dem hohen Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums um mehr als 15.000 Personen. Die Beschäftigungseffekte werden zusätzlich durch die Arbeitsintensität der beteiligten Wirtschaftszweige beeinflusst. Veränderungen der Produktions- und Wertschöpfungseffekte übertragen sich daher nicht proportional auf die Beschäftigung. Neben der Höhe des

Produktionsimpulses ist entscheidend, auf welche Wirtschaftszweige und damit auf Branchen mit unterschiedlichen Beschäftigungsintensitäten sich dieser verteilt.

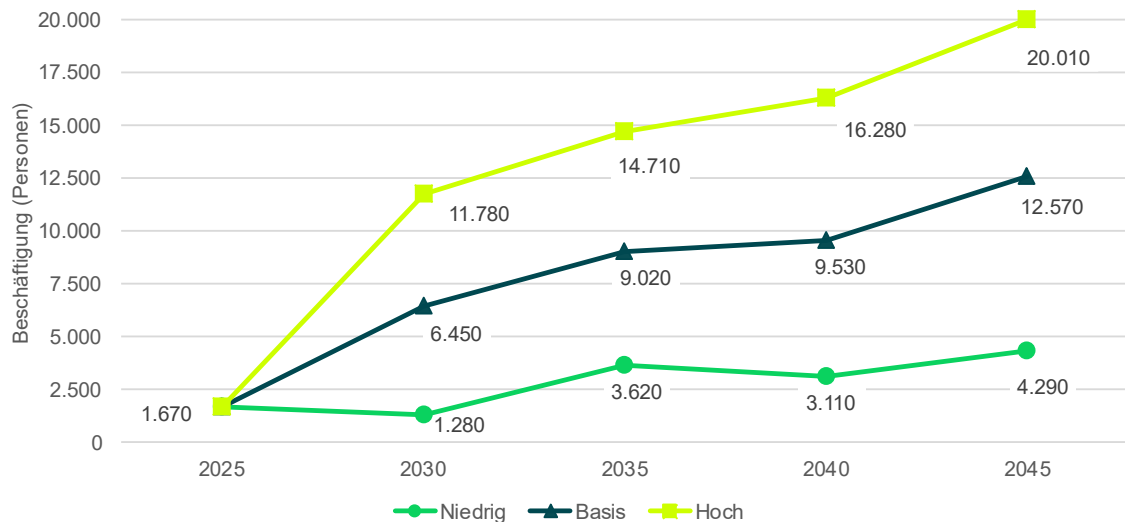


Abbildung 18: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseur-Wertschöpfung in Ostdeutschland nach Szenario, 2025–2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Dargestellt ist der gesamte Beschäftigungseffekt für die drei Szenarien Niedrig, Basis und Hoch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Tabelle 4 differenziert die Beschäftigungseffekte zusätzlich nach direkter Beschäftigung bei den Elektrolyseurherstellern und indirekter Beschäftigung entlang der ostdeutschen Lieferketten. Im Basisszenario entfallen im Jahr 2045 rund 8.080 Personen auf den direkten OEM-Effekt und rund 4.490 Personen auf den indirekten Effekt. Damit entsteht gut ein Drittel des gesamten Beschäftigungseffekts entlang der vorgelagerten ostdeutschen Lieferketten. Anders ausgedrückt kommt auf zwei modellierte Beschäftigte bei den Elektrolyseurherstellern rechnerisch etwa ein weiterer Beschäftigungseffekt bei ostdeutschen Zulieferunternehmen hinzu.

Auch zwischen den Elektrolysetechnologien unterscheidet sich das Verhältnis von direkten zu indirekten Beschäftigungseffekten. Der regionale Beschäftigungsmultiplikator, definiert als Verhältnis des indirekten zum direkten Beschäftigungseffekt, liegt zwischen 0,53 und 0,60. Den höchsten Multiplikator weist die AEL mit 0,60 auf. Für AEMEL und SOEL liegt er jeweils bei rund 0,58, während PEMEL mit rund 0,53 den niedrigsten Wert aufweist. Die Unterschiede ergeben sich aus den technologiespezifischen Produktionsstrukturen und insbesondere daraus, welche Zulieferbranchen mit ihren jeweiligen Beschäftigungsintensitäten angesprochen werden. Ein höherer Multiplikator bedeutet dabei nicht zwangsläufig einen höheren absoluten Beschäftigungseffekt. PEMEL leistet aufgrund des höheren unterstellten Produktionsvolumens trotz des niedrigeren Multiplikators einen größeren absoluten Beschäftigungsbeitrag. Da für die drei Marktszenarien dieselben technologiespezifischen Produktions- und Lieferstrukturen zugrunde gelegt werden, bleibt das Verhältnis zwischen direkter und indirekter Beschäftigung über die Szenarien hinweg weitgehend stabil.

Neben dem Markthochlauf und der technologiespezifischen Produktionsstruktur beeinflusst auch die regionale Verankerung der Zulieferketten die Höhe der Beschäftigungseffekte in Ostdeutschland. Wird der in Ostdeutschland verbleibende Zulieferanteil gegenüber der Basisannahme um 25 Prozent erhöht oder verringert, reicht der indirekte Beschäftigungseffekt im Basisszenario 2045 von rund

3.370 bis 5.610 Personen. Einschließlich des unveränderten direkten OEM-Effekts entspricht dies einem Gesamteffekt zwischen rund 11.450 und 13.690 Personen. Die Sensitivität verdeutlicht damit, dass eine stärkere regionale Verankerung der Zulieferketten neben zusätzlicher Wertschöpfung auch zusätzliche Beschäftigung in Ostdeutschland binden könnte.

Effekt	2025	2045 Niedrig	2045 Basis	2045 Hoch
Direkter OEM-Effekt	1.080	2.760	8.080	12.860
Indirekter Effekt:				
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	740	1.910	5.610	8.930
• aktuelle Zulieferstruktur	590	1.530	4.490	7.150
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	440	1.150	3.370	5.360
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	1.670	4.290	12.570	20.010

Tabelle 4: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Referenzjahr 2025 und nach Marktszenario 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Auch auf dem Arbeitsmarkt könnten sich zusätzliche Potenziale ergeben, wenn ostdeutsche Zulieferunternehmen von der Elektrolyseurproduktion in Westdeutschland profitieren. Auf Grundlage derselben vereinfachten Annahme einer symmetrischen Produktions- und Lieferstruktur, wie sie in Kapitel 5.2 beschrieben wurde, ergibt sich für das Jahr 2045 ein zusätzlicher Beschäftigungseffekt von rund 590 Personen im niedrigen Szenario, 1.730 Personen im Basisszenario und 2.750 Personen im hohen Szenario. Dieser zusätzliche Beschäftigungseffekt könnte bei ostdeutschen Zulieferunternehmen durch die Nachfrage aus der westdeutschen Elektrolyseurproduktion entstehen und kommt damit zu den zuvor dargestellten direkten und indirekten Beschäftigungspotenzialen aus der Produktion in Ostdeutschland hinzu. Wie bei der Bruttowertschöpfung dient die Berechnung der Einordnung einer möglichen Größenordnung und wird aufgrund des vereinfachten Ansatzes separat von den Ergebnissen der vollständigen Input-Output-Modellierung ausgewiesen.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung des Beschäftigungseffekts im Basisszenario im Jahr 2045 nach beruflichen Anforderungsniveaus. Mit rund 7.210 Personen beziehungsweise 58 Prozent entfällt der mit Abstand größte Anteil auf Fachkrafttätigkeiten. Weitere rund 2.040 Personen (16 Prozent) entfallen auf Spezialistentätigkeiten und rund 1.770 Personen (14 Prozent) auf Expertentätigkeiten. Helfertätigkeiten machen mit rund 1.540 Personen beziehungsweise 12 Prozent den kleinsten Anteil aus. Die Ergebnisse verdeutlichen damit, dass knapp ein Drittel des Beschäftigungseffekts auf Spezialisten- und Expertentätigkeiten entfällt. Für den Aufbau und die Ausweitung der Elektrolyseurproduktion sind somit nicht nur Tätigkeiten mit höheren Anforderungsniveaus relevant, sondern, ähnlich wie im Verarbeitenden Gewerbe (55% Fachkräfteanteil), liegt der quantitative Schwerpunkt klar auf Fachkrafttätigkeiten. Insgesamt lässt sich diese Verteilung in Ostdeutschland am ehesten mit dem Wirtschaftsbereich zur Herstellung von chemischen Erzeugnissen vergleichen, dort liegt der Anteil an Fachkräften allerdings etwas niedriger. Die Einordnung nach

Anforderungsniveaus macht dabei jedoch keine Aussage über spezifische Qualifikationen oder Abschlüsse.

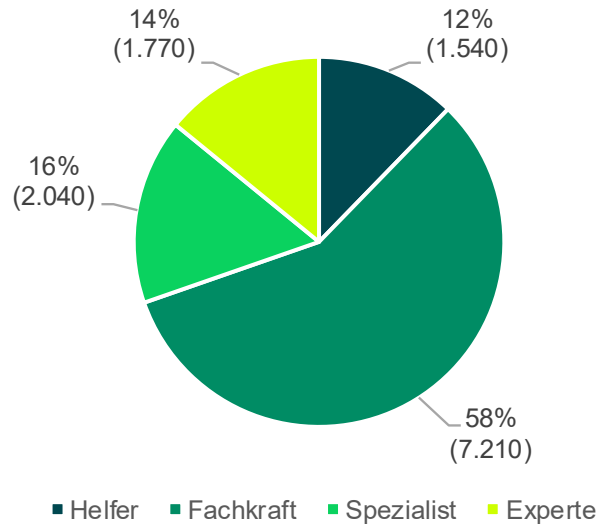


Abbildung 19: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Anforderungsniveau im Basisszenario 2045. Dargestellt ist der gesamte Beschäftigungseffekt (direkt und indirekt) bei aktueller Zulieferstruktur, aufgeteilt nach den vier Anforderungsniveaus Helfer, Fachkraft, Spezialist und Experte. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet und beziehen sich auf sozialversicherungspflichtig beschäftigte Personen. Rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Das Muster, dass es sich bei den Arbeitskräftepotenzialen vor allem um industrielle und technisch-gewerbliche Berufe handelt, spiegelt sich auch bei der Betrachtung der betroffenen Berufsgruppen in Abbildung 20 wider. Hier werden für das Basisszenario im Jahr 2045 die Beschäftigungseffekte der Berufsgruppen mit den größten absoluten Beschäftigungseffekten ausgewiesen. Den größten Beitrag leisten Berufe der Maschinenbau- und Betriebstechnik mit rund 1.500 Personen, gefolgt von Berufen der Metallbearbeitung mit rund 1.280 Personen sowie der Elektrotechnik mit gut 1.000 Personen. Ebenfalls hohe Effekte entfallen auf die technische Produktionsplanung und -steuerung sowie auf Metallbau und Schweißtechnik. Diese Schwerpunkte spiegeln die industrielle Struktur der Elektrolyseurherstellung und ihrer Zulieferketten wider: Besonders große Beschäftigungseffekte ergeben sich in Tätigkeitsfeldern, die mit Fertigung, Montage, elektrischer Integration und Produktionssteuerung verbunden sind.

Zugleich zeigt die Berufsstruktur, dass sich die Beschäftigungseffekte nicht nur auf klassische Fertigungsberufe beschränken. Relevante Beiträge ergeben sich auch in Berufsgruppen der Unternehmensorganisation und -strategie, in Büro und Sekretariat, in der Lagerwirtschaft sowie in Einkauf und Vertrieb. Hinzu kommen Berufe aus den Bereichen Chemie, Energietechnik sowie technische Forschung und Entwicklung. Damit wird deutlich, dass der Hochlauf der Elektrolyseurproduktion nicht nur technische Kernberufe betrifft, sondern auch eine Reihe von Querschnitts- und Unterstützungsberufen einbezieht. Dies entspricht der Logik der Modellierung: Erfasst werden nicht nur die unmittelbaren Produktionsschritte bei den Herstellern, sondern auch die vorgelagerten Lieferketten sowie die mit allen Produktionsschritten verbundenen administrativen, logistischen, vertrieblichen und entwicklungsbezogenen Funktionen.

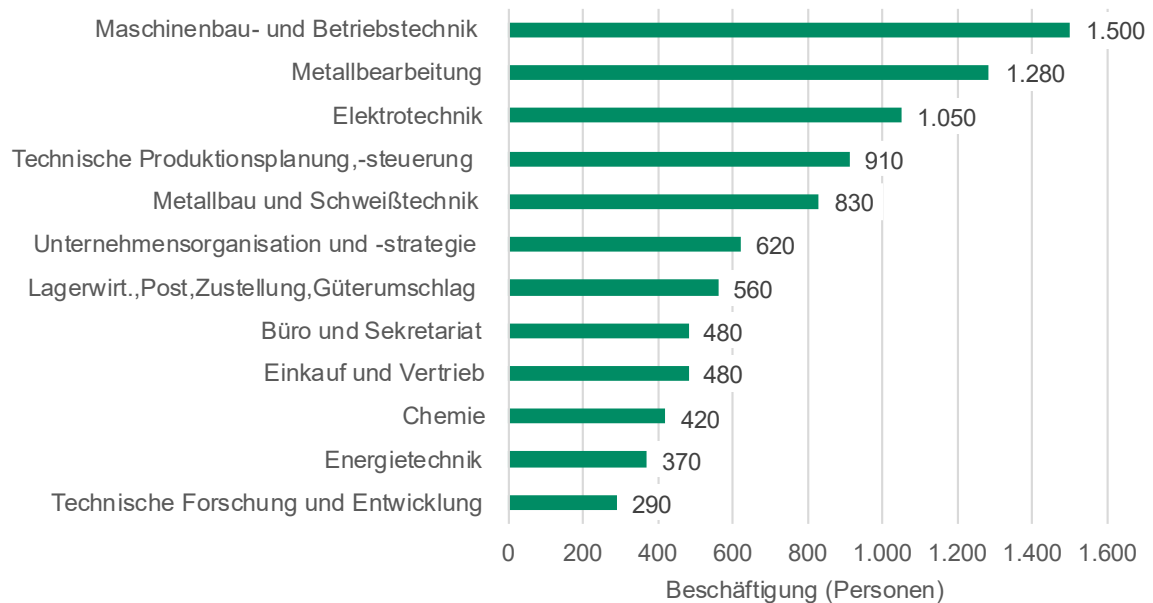


Abbildung 20: Zentrale Berufsgruppen des Beschäftigungseffekts der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Dargestellt sind die zwölf Berufsgruppen mit dem höchsten Beschäftigungseffekt (direkt und indirekt) bei aktueller Zulieferstruktur. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

In der Gesamtschau zeigt Kapitel 5.3 damit ein differenziertes Bild der Beschäftigungspotenziale. Innerhalb dieser Potenziale liegt der Schwerpunkt auf Fachkrafttätigkeiten, zugleich entfallen rund 30 Prozent des modellierten Beschäftigungseffekts auf Spezialisten- und Expertentätigkeiten. Während industriell-technische Berufsgruppen die größten absoluten Effekte aufweisen, entstehen auch in Querschnitts- und Unterstützungsfunktionen entlang der Wertschöpfungskette relevante Beschäftigungspotenziale. Die Ergebnisse machen damit sichtbar, in welchen beruflichen und anforderungsbezogenen Bereichen ein Hochlauf der Elektrolyseurproduktion mit zusätzlicher Beschäftigung in Ostdeutschland verbunden sein könnte.

6 Resilienz industrieller Wertschöpfungsketten

Der Aufbau wettbewerbsfähiger Elektrolyseur-Wertschöpfungsketten in Europa und insbesondere in Ostdeutschland ist nicht allein eine Frage des Marktpotenzials und der industriellen Ausgangslage. Im Kontext zunehmender globaler Spannungen gewinnt die Frage nach der strukturellen Resilienz dieser jungen Industrie schnell an Bedeutung. Entscheidend ist dabei nicht nur, ob die für die Fertigung benötigten Rohstoffe, Vorprodukte und Fachkräfte in ausreichender Menge und zu wettbewerbsfähigen Konditionen verfügbar sind, sondern auch, welchen Beitrag der Aufbau einer heimischen Elektrolyseindustrie selbst zur industriellen und energiepolitischen Handlungsfähigkeit leisten kann, um Abhängigkeiten zu reduzieren, Wissen und Fachkräfte in Europa zu halten und die Fähigkeit zu stärken, auf veränderte wirtschaftliche, technologische oder geopolitische Rahmenbedingungen schnell zu reagieren. Dieses Kapitel analysiert die strukturellen Abhängigkeiten hinsichtlich materieller Versorgungssicherheit und Fachkräfteverfügbarkeit, beleuchtet den geopolitischen und industriepolitischen Kontext und zeigt auf, wie der Aufbau von Elektrolyseur-Wertschöpfungsketten selbst zu einem resilienteren Industriestandort in Europa und damit auch in Ostdeutschland beitragen kann.

6.1 Globale Marktdynamik und geopolitische Verwerfungen

Die Resilienz industrieller Wertschöpfungsketten kann nicht losgelöst von der geopolitischen Dimension des globalen Elektrolysemarkts betrachtet werden. Chinesische Hersteller üben bereits heute über niedrige Preise, die teils um den Faktor drei bis fünf unter den Herstellungskosten europäischer Anbieter liegen, einen starken Wettbewerbsdruck auf europäische Hersteller aus [27, 28]. Diese Preisdiskrepanz resultiert aus starker staatlicher Subventionierung, vertikaler Integration entlang der Wertschöpfungskette in China sowie der Kontrolle über kritische Vorleistungen wie der Rohstoffraffinierung. Parallel dazu haben die USA durch den Inflation Reduction Act [29] massive Investitionsanreize für die heimische Elektrolyseurproduktion geschaffen, die internationale Standortentscheidungen zugunsten Nordamerikas beeinflussen.

Vor diesem Hintergrund ist die Unterstützung europäischer Produktionskapazitäten nicht nur unter dem Gesichtspunkt der globalen Wettbewerbsfähigkeit, sondern auch unter dem Aspekt der strategischen Handlungsfähigkeit zu betrachten. Industrielle Souveränität bedeutet dabei nicht, sämtliche Komponenten und Rohstoffe vollständig innerhalb Deutschlands oder Europas zu produzieren. Vielmehr geht es darum, bei zentralen Technologien über eigene Kompetenzen, Produktionskapazitäten und Systemverständnis zu verfügen sowie kritische Abhängigkeiten durch diversifizierte und verlässliche internationale Lieferbeziehungen beherrschbar zu halten. Gerade bei einer Schlüsseltechnologie wie der Elektrolyse ist dies von Bedeutung, da der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft nicht zu einer Verlagerung bestehender Energieabhängigkeiten in neue Abhängigkeiten von einzelnen Technologieanbietern führen sollte.

In diesem Spannungsfeld ergibt sich für europäische Hersteller eine herausfordernde Situation, die am Beispiel der PEM-Elektrolyse illustriert werden kann. Deutschland verfügt zwar über einen signifikanten Anteil an der europäischen PEMEL-Fertigung, ist jedoch bei den kernrelevanten Rohstoffen wie den Platingruppenmetallen Iridium und Platin vollständig von Importen abhängig. Treten nun geopolitische Verwerfungen ein, etwa in Form von gestörten Lieferketten oder exportseitigen Restriktionen der Rohstoffförderländer, fehlen europäischen Herstellern kurzfristig die materiellen Grundlagen zur Produktion. Eine Reduzierung der Abhängigkeit von solchen monopolisierten Weltmarktstrukturen kann jedoch durch den Aufbau lokaler Fertigungskapazitäten, die Bündelung europäischer Nachfrage und die Etablierung eigener Verarbeitungs- und vor allem

Recyclingstrukturen schrittweise erreicht werden. Gleichzeitig entsteht mit jeder aufgebauten Produktions- und Entwicklungskapazität ein Bestand an technischem Wissen, Patenten, Fachkräften, Anlagen- und Systemkompetenz, der im Krisenfall nicht kurzfristig durch internationale Lieferbeziehungen ersetzt werden muss. Die europäische Elektrolyseindustrie im Komplex mit eigenen Verarbeitungs- und Recyclingstrukturen stärkt somit nicht nur die Versorgungssicherheit mit grünem Wasserstoff, sondern fungiert selbst als Resilienzverstärker für die regionale Industrie.

6.2 Das Zusammenspiel von Materialrisiken und Fachkräfteverfügbarkeit

Um die Resilienz der Elektrolysefertigung zu bewerten, müssen die materiellen Risiken und die Fachkräftesituation als eng verzahnte Bereiche betrachtet werden. Eine resilient aufgestellte Wertschöpfungskette erfordert sowohl die physische Verfügbarkeit von Materialien als auch die menschliche Expertise zur Verarbeitung, Systemintegration und Weiterentwicklung. Ein Defizit in einem der beiden Bereiche limitiert die Resilienz des Gesamtsystems. Umgekehrt stärkt der Aufbau entsprechender industrieller Strukturen die Fähigkeit, technologische Lösungen eigenständig weiterzuentwickeln, auf Engpässe mit Substitution oder Anpassungen zu reagieren und neue Bedarfe schneller in marktfähige Lösungen zu überführen. Resilienz entsteht damit nicht allein durch die Absicherung bestehender Lieferketten, sondern auch durch die Fähigkeit, diese technologisch weiterzuentwickeln.

Über alle betrachteten Elektrolysetechnologien (AEL, PEMEL, SOEL, AEMEL) hinweg bestehen erhebliche Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen und Vorprodukten. Diese Materialrisiken lassen sich nach ihrem Gefährdungsprofil in drei Gruppen gliedern (vgl. Tabelle 22 im Anhang):

Höchstes Versorgungsrisiko – Platingruppenmetalle (PGM): Iridium und Platin sind zentrale Engpassrohstoffe der PEMEL-Technologie. Die globale Iridiumförderung beläuft sich auf ca. 9 t/a, rund 85 % entfallen auf Südafrika [21], wo es als Koppelprodukt des Platinabbaus gewonnen wird [16, 22, 23]. Da derzeit rund ein Drittel der globalen PGM-Nachfrage durch Kfz-Abgaskatalysatoren bestimmt wird, könnte der Transformationspfad hin zur Elektromobilität das Koppelproduktangebot an Iridium mittelfristig reduzieren, zumal für Platin bereits etablierte Recyclingrouten bestehen. Der Einsatz von PGMs ist auch in kommerziellen AEL-Elektroden verbreitet. PGM-freie Alternativen sind industriell ebenfalls etabliert, weisen aber eine geringere Leistungsfähigkeit auf. Die SRIA der EU [24] hat PGM-Freiheit in Stacks ab 2030 als Ziel formuliert, dessen Erreichbarkeit sich jedoch erst zeigen muss.

Hohes Versorgungsrisiko – Seltene Erden, Titan, Kobalt und Nickel [21]: Seltene Erden, die insbesondere in SOEL-Elektroden und -Elektrolyten zum Einsatz kommen, unterliegen einer ausgeprägten Abhängigkeit von der chinesischen Verarbeitungsindustrie. Kobalt (ca. 71 % der Förderung in der DRC) und Nickel (Verarbeitung stark in China konzentriert) sind für AEL und AEMEL relevant und auf der EU-Liste kritischer Rohstoffe gelistet. Ebenso besteht für Titan, welches vielfältig in der PEM-Elektrolyse eingesetzt wird, ein hohes Versorgungsrisiko, welches sich vor allem aus einer stark strukturellen und geopolitischen Importabhängigkeit ergibt.

Strukturelle Vorproduktrisiken – Leistungselektronik und Großkomponenten: Für Transformatoren werden Lieferzeiten von zwei bis vier Jahren berichtet. Ursachen sind Kapazitätsengpässe, Materialmangel sowie eine hohe Zusatznachfrage durch Digitalisierung und Elektrifizierung des Energie- und Verkehrssektors [16]. Bei Leistungshalbleitern für Gleichrichter bestehen erhebliche Abhängigkeiten von Anbietern in China, Japan, Südkorea und Taiwan bei gleichzeitig begrenzten europäischen Fertigungskapazitäten [25].

Ein regulatorisches Sonderrisiko besteht durch eine mögliche PFAS-Regulierung: PEMEL-Stacks basieren heute auf PFAS-Membranen (z. B. Nafion) als Kernkomponente; ein europäisches Verbot würde unmittelbar die Lebensdauer, Fertigungsverfahren und Kostenstruktur von Stacks betreffen. Eine anwendungsspezifische Ausnahme wird aus heutiger Sicht als wahrscheinlich, aber auch zeitlich limitiert eingeschätzt [26]. Gerade solche regulatorischen und technologischen Veränderungen verdeutlichen den Wert eigener Forschungs- und Entwicklungskompetenz: Je stärker Unternehmen und Forschungseinrichtungen entlang der Wertschöpfungskette verankert sind, desto besser können alternative Materialien, Designs und Fertigungsverfahren entwickelt und in industrielle Anwendungen überführt werden.

Eng mit diesen Materialflüssen verknüpft ist die Fachkräfteverfügbarkeit. Die komplexe Verarbeitung von Spezialmaterialien, die Fertigung hochkomplexer Verbundkeramiken in der SOEL oder der Betrieb von Recyclinganlagen für PGM und seltene Erden erfordern hochspezialisiertes Personal. Ohne eine ausreichende Zahl an qualifizierten Ingenieuren, Facharbeitern und Wissenschaftlern können selbst bei gesicherter Materialversorgung keine resilienten Produktionskapazitäten aufgebaut werden. Ein Engpass bei Fachkräften wirkt somit als Multiplikator für die materiellen Risiken. Dabei zeigt die Engpassanalyse bereits heute insbesondere in der Elektrotechnik sowie in Metallbau- und Schweißberufen eine angespannte Fachkräftesituation.

Gleichzeitig kann die Fachkräfteperspektive auch als Chance verstanden werden. Der Hochlauf der Elektrolyseurproduktion trägt dazu bei, die industrielle Fachkräfte- und Kompetenzbasis beispielsweise in Ostdeutschland zu stärken. Ein wesentlicher Teil der hierfür benötigten Kompetenzen knüpft an etablierte industriell-technische Tätigkeiten und Qualifikationen an. Dadurch ergeben sich Möglichkeiten für Beschäftigte aus bestehenden Industriebranchen, ihre vorhandenen Kompetenzen durch gezielte Weiter- und Umqualifizierung für neue Wertschöpfungsstrukturen nutzbar zu machen. Zugleich können mit dem Aufbau neuer Produktions-, Entwicklungs- und Zulieferstrukturen zusätzliche technologische Kompetenzen und praktische Fertigungserfahrungen in der Region entstehen. Gerade vor dem Hintergrund eines demografisch rückläufigen Arbeitskräfteangebots wird Fachkräftesicherung damit selbst zu einem Bestandteil industrieller Resilienz: Sie trägt dazu bei, vorhandenes Know-how zu erhalten, neue Kompetenzen aufzubauen und die Anpassungsfähigkeit des regionalen Arbeitsmarktes gegenüber technologischen und wirtschaftlichen Veränderungen zu erhöhen.

6.3 Der geopolitische und industriepolitische Rahmen

Als Reaktion auf den globalen Markt- und Rohstoffdruck hat die EU regulatorische Schutzschirme etabliert. Der Net-Zero Industry Act [30] klassifiziert Elektrolyseure als strategische Netto-Null-Technologie und setzt das Ziel, bis 2030 mindestens 40 % des EU-Bedarfs durch heimische Fertigung zu decken. Ergänzend zielen der Critical Raw Materials Act [31] und der im Rahmen des Clean Industrial Deal vorgeschlagene Industrial Decarbonisation Accelerator Act [32] darauf ab, strukturellen Materialabhängigkeiten entgegenzuwirken und stabile Absatzmärkte zu schaffen.

Für Ostdeutschland als potenziellen Schwerpunktstandort der Elektrolyseurfertigung ist die Einbettung in diese europäische Strategie entscheidend. Ein isoliertes Vorgehen einzelner Standorte ist möglich, kann die beschriebenen Abhängigkeiten bei Störungen in den Lieferketten jedoch sowohl auf der Rohstoff- noch auf der Vorproduktebene schwerer abfangen und würde gegebenenfalls rasch an seine Grenzen stoßen. Die europäischen Instrumente müssen daher aktiv genutzt werden, um die regionale Industrie in ein übergeordnetes, krisenresistentes Netzwerk einzubinden. Damit eröffnet der Hochlauf zugleich eine industriepolitische Chance für Ostdeutschland, da es aufgrund

seiner vorhandenen industriellen und wissenschaftlichen Kompetenzen über eine gute Ausgangslage verfügt, um einen wichtigen Beitrag zu einer europäischen Produktionsbasis zu leisten, die nicht auf vollständige Autarkie, sondern auf Diversifizierung, Kooperation und gemeinsame technologische Souveränität setzt.

6.4 Strategien zur aktiven Resilienzstärkung

Die nachfolgenden Handlungsoptionen beschreiben Maßnahmen, um die Resilienz einer europäischen und ostdeutschen Elektrolyseindustrie gegenüber zukünftigen Störungen zu steigern. Ihr Ziel ist damit nicht allein die Absicherung einer bestehenden Industrie, sondern der Aufbau einer industriellen und technologischen Basis, die selbst zur Krisenfestigkeit der Energie- und Industriestrukturen beiträgt.

Nutzung EU-Instrumente zum Abbau geopolitischer Abhängigkeiten: Grundsätzlich erfordern die genannten geopolitischen Abhängigkeiten koordinierte europäische Instrumente und Maßnahmen. Der Critical Raw Materials Act bietet hierfür konkrete Ansatzpunkte: Über die Anerkennung als „strategisches Projekt“ sollen Abbau- und Verarbeitungsvorhaben in der EU beschleunigt genehmigt und finanziert werden. Über verbindliche Recycling-Benchmarks müssen Anreize für den Aufbau europäischer Sekundärrohstoffkreisläufe geschaffen werden, die insbesondere bei PGM-Materialien kurzfristig wirksam werden können. Der Industrial Decarbonisation Accelerator kann dies auf der Nachfrageseite durch Green-Public-Procurement-Vorgaben ergänzen, die stabile Absatzmärkte für europäische Hersteller schaffen und die Investitionssicherheit für heimische Fertigungskapazitäten erhöhen. Damit wird aus der Absicherung von Lieferketten zugleich ein Aufbau europäischer industrieller Wertschöpfung.

Diversifizierung der Lieferketten und strategische Partnerschaften: Der Aufbau strategischer Rohstoffpartnerschaften mit politisch stabilen Förderländern – auch direkt zwischen Unternehmen und Minenbetreibern – sowie langfristige Lieferverträge und der Aufbau strategischer Reserven auf EU-Ebene [21, 33] sind essenziell. Für Unternehmen ohne ausreichende Marktmacht sollten Konsortialstrukturen und EU-koordinierte Beschaffungsmechanismen entwickelt werden, um auf globaler Ebene als verhandlungsfähiger Akteur aufzutreten. Dabei können sogenannte Energiepartnerschaften über die reine Rohstoffversorgung hinausgehen: Der Aufbau europäischer Technologiekompetenz schafft zugleich Exportmöglichkeiten in Partnerländer und ermöglicht es, Technologie, Anlagenbau und Systemkompetenz gemeinsam mit der Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff anzubieten.

Technologische Diversifizierung: Um einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden, empfiehlt sich für Standortentscheidungen in Ostdeutschland ein gezielter Mix der verfügbaren Elektrolysetechnologien. Die Kombination von AEL, PEMEL, SOEL und AEMEL streut das Risiko von Materialengpässen und macht die regionale Industrie weniger anfällig für Lieferschocks bei Einzelrohstoffen. Die technologische Vielfalt schafft darüber hinaus eine breitere Forschungs- und Kompetenzbasis und erhöht die Fähigkeit, auf zukünftige technologische Entwicklungen und veränderte Anforderungen des Energiesystems zu reagieren.

Industrielle Fachkräftepotenziale durch Übergänge in neue Wertschöpfungsketten erschließen: Der Hochlauf der Elektrolyseurproduktion bietet die Möglichkeit, Beschäftigten aus Branchen und Regionen mit transformationsbedingt rückläufiger Beschäftigung neue industrielle Perspektiven zu eröffnen. Viele vorhandene Qualifikationen und Erfahrungen sind grundsätzlich anschlussfähig und können durch gezielte Um- und Weiterqualifizierung für neue Tätigkeiten nutzbar gemacht werden. Frühzeitige Übergänge zwischen bestehenden und entstehenden

Wertschöpfungsketten können dazu beitragen, industrielles Erfahrungswissen in der Region zu halten, Beschäftigungsperspektiven zu sichern und zugleich den Fachkräftebedarf beim Aufbau neuer Produktionskapazitäten zu decken.

Technologieübergreifende Kompetenzbasis für neue Wachstumsfelder aufbauen: Der Ausbau der Elektrolyseurproduktion schafft zugleich die Möglichkeit, Kompetenzen gezielt weiterzuentwickeln, die auch in anderen industriellen Zukunftsfeldern gefragt sind. Dazu zählen etwa Elektrotechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Material- und Verfahrenstechnik oder Produktionssteuerung. Der Aufbau dieser Qualifikationen stärkt damit nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffwirtschaft, sondern schafft Synergien mit weiteren neuen Technologien und Wertschöpfungsketten. So kann sich eine breitere industrielle Kompetenzbasis entwickeln, die zusätzliche Wachstumsperspektiven eröffnet und die Anpassungsfähigkeit des Standorts stärkt.

Recycling und Kreislaufwirtschaft: Der Aus- und Aufbau industrieller Rückgewinnungskapazitäten für Iridium, Platin und seltene Erden aus End-of-Life-Stacks sowie aus Leistungselektronik-Abfällen soll auf Rückgewinnungsraten von über 90 % abzielen. Nennenswerte Rückflussmengen werden dadurch allerdings erst nach dem Lebensdauerende vieler Anlagen, voraussichtlich um 2040, erwartet [16]; kurzfristig bleibt die Entlastungswirkung begrenzt. Das PGM-Recycling ist in Deutschland zwar technisch etabliert, konzentriert sich jedoch auf wenige große, spezialisierte Akteure, die überwiegend nicht in Ostdeutschland sitzen. Regulatorische Hebel wie Ökodesign- und Kreislaufwirtschaftsvorgaben (Design for Recycling, Rücknahmeverpflichtungen) können sicherstellen, dass Elektrolyseur-Hersteller schon heute recyclingfähige Komponenten und modulare Bauweisen berücksichtigen [1]. Der Aufbau entsprechender Recyclingkompetenzen in Europa und (Ost-) Deutschland würde damit nicht nur Importabhängigkeiten langfristig reduzieren, sondern neue industrielle Kompetenzen und Fachkräftepotenziale entlang einer zirkulären Wertschöpfungskette erschließen.

Substitution und Materialeffizienz: Durch gezielte Forschung und Entwicklung muss der Materialeinsatz bei kritischen Komponenten weiterhin reduziert werden. Vor allem bei Iridium besteht hier großes Potenzial, ebenso wie bei Nickel-optimierten AEL-Varianten. Eine weitere Option besteht in der kompletten Substitution kritischer Materialien durch unkritische Alternativen, beispielsweise die Verwendung von Edelstahl für Nickel in der AEL. AEMEL birgt als potenziell PGM-freie Technologie ein hohes Potenzial, da sie die strukturelle Abhängigkeit von Iridium und Platin langfristig auflöst [21]. Parallel ist die Weiterentwicklung stabiler, skalierbarer AEMEL-Membranen als industriepolitisches Ziel zu verankern, um die Technologie marktreif zu machen. Die hierfür erforderliche Forschungs- und Entwicklungstätigkeit ist dabei selbst ein Resilienzgewinn: Sie erhält technologische Souveränität, stärkt Patente und Know-how und ermöglicht es, auf zukünftige Rohstoff-, Preis- oder regulatorische Veränderungen eigenständig zu reagieren.

Engpassmanagement bei Gleichrichtern und Transformatoren: Frühzeitige Beschaffungsplanung, die Standardisierung von Spezifikationen für die Leistungselektronik sowie die politische Priorisierung heimischer Fertigungskapazitäten sind erforderlich, um projektbedingte Verzögerungen im Elektrolysehochlauf zu vermeiden. Der Aufbau dieser Kapazitäten schafft Beschäftigungschancen und zusätzliche industrielle Resilienz. Perspektivisch kann damit ein wesentlicher Bestandteil der Energiewende stärker aus einer Hand entwickelt, produziert und betrieben werden – von der Strombereitstellung über die Elektrolyse bis zur Systemintegration und Nutzung des Wasserstoffs.

7 Fazit und strategische Handlungsfelder

Die vorliegende Studie zeigt, dass Ostdeutschland über eine gute industrielle und wissenschaftliche Ausgangsbasis für die Elektrolyseurproduktion verfügt. Mit 107 identifizierten Akteuren und mehreren regionalen Kompetenzclustern, insbesondere Dresden–Chemnitz, Berlin–Potsdam und dem Korridor Erfurt–Arnstadt–Sonneberg, sowie einer überdurchschnittlich starken F&E-Infrastruktur besitzt die Region bereits heute Anknüpfungspunkte entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die derzeitige kurzfristige Verlangsamung des globalen und europäischen Markthochlaufs könnte demnach nicht als grundlegende Trendumkehr, sondern als charakteristisches Merkmal früher, komplexer Marktphasen gedeutet werden. Ab 2030 wird von einer deutlichen Beschleunigung der Nachfrage und der benötigten Fertigungskapazitäten ausgegangen. Unter der begründeten Referenzannahme, dass rund 55 Prozent der deutschen Elektrolyseurfertigung auf Ostdeutschland entfallen, ergeben sich je nach Markt- und Sensitivitätsannahmen jährliche Fertigungsvolumina von 1 bis 5 GW pro Jahr im Jahr 2030 und von 2,5 bis 17 GW pro Jahr im Jahr 2045. Die Technologieanalyse verdeutlicht, dass die PEMEL als volumenmäßig dominierende Technologie den größten absoluten Wertschöpfungsbeitrag generiert, während der Stack technologieübergreifend mit einem Anteil von 25 bis 35 Prozent den zentralen Herstellungskostenblock und damit den strategischen Wertschöpfungskern darstellt.

Die sektorale Produktionsanalyse zeigt, dass die Potenziale der Elektrolyseurproduktion deutlich über die Hersteller selbst hinausreichen und bestehende industrielle Kernbereiche wie die Herstellung von Metallerzeugnissen, elektronischen und optischen Erzeugnissen, elektrischen Ausrüstungen sowie den Maschinenbau erfassen. Die Elektrolyseurproduktion knüpft damit an vorhandene industrielle Kompetenzen in Ostdeutschland an. Im Basisszenario steigt die modellierte Bruttowertschöpfung bis 2045 auf rund 1,4 Mrd. Euro. Davon entstehen rund 900 Mio. Euro direkt bei den Elektrolyseurherstellern und weitere rund 500 Mio. Euro entlang der ostdeutschen Zulieferketten. Die Spannweite der Marktszenarien reicht 2045 von rund 480 Mio. Euro bis 2,2 Mrd. Euro und verdeutlicht damit die Abhängigkeit der Potenziale vom zukünftigen Elektrolyseurmarkt. Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass eine stärkere regionale Zulieferverankerung auch bei gegebenem Produktionsvolumen zusätzliche Wertschöpfung in Ostdeutschland binden kann.

Mit diesen Wertschöpfungspotenzialen sind zugleich relevante Beschäftigungseffekte verbunden. Im Basisszenario werden für 2045 rund 12.570 Personen modelliert, davon rund 8.080 direkt bei den Elektrolyseurherstellern und rund 4.490 entlang der ostdeutschen Zulieferketten. Der Schwerpunkt liegt mit 58 Prozent auf Fachkrafttätigkeiten, ergänzt um Spezialisten- und Expertentätigkeiten. Besonders große Beschäftigungseffekte ergeben sich in Maschinenbau und Betriebstechnik, Metallbearbeitung, Elektrotechnik sowie technischer Produktionsplanung und -steuerung. Gleichzeitig werden auch Querschnittsfunktionen wie Logistik, Einkauf, Vertrieb und Unternehmensorganisation angesprochen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse damit, dass ein erfolgreicher Hochlauf der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland sowohl bei den Herstellern selbst als auch entlang der Zulieferketten relevante Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale entfalten könnte.

Diesen Potenzialen stehen zugleich Bedingungen und Risiken gegenüber, die ihre tatsächliche Realisierung beeinflussen. Neben der Entwicklung des Marktes und der internationalen Wettbewerbsfähigkeit betrifft dies insbesondere die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und Vorprodukte sowie qualifizierter Arbeitskräfte. Aus den Ergebnissen lassen sich daher vier miteinander verbundene Handlungsfelder ableiten.

Markthochlauf und Wettbewerbsfähigkeit: Die Potenziale hängen wesentlich davon ab, ob sich die Nachfrage nach Wasserstoff und Elektrolyseuren in den kommenden Jahren stabil entwickelt. Dafür sind verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen, Investitionssicherheit sowie ein abgestimmter Hochlauf von Wasserstofferzeugung, Infrastruktur und Abnahme erforderlich. Gleichzeitig sollte die Wettbewerbsfähigkeit europäischer und ostdeutscher Hersteller gestärkt werden, damit diese einen möglichst hohen Anteil am wachsenden Markt realisieren können. Die bereits vorhandenen Fertigungs- und Technologiekompetenzen bieten dafür eine Ausgangsbasis, müssen jedoch in einem international stark umkämpften Markt dauerhaft wettbewerbsfähig bleiben.

Regionale Cluster und Zulieferketten: Die bestehende Hersteller-, Zuliefer- und Forschungslandschaft bietet konkrete regionale Anknüpfungspunkte für eine stärkere Verankerung der Elektrolyseur-Wertschöpfungskette. Diese Strukturen sollten gezielt genutzt werden, um Elektrolyseurhersteller mit bestehenden und potenziellen Zulieferern sowie Forschungseinrichtungen zu vernetzen und Lücken in den regionalen Lieferketten zu schließen. Die Input-Output-Analyse zeigt, dass eine höhere regionale Zulieferverflechtung zusätzliche Wertschöpfung und Beschäftigung in Ostdeutschland binden kann, ohne dass hierfür das Produktionsvolumen der Elektrolyseure selbst steigen muss. Standort- und Ansiedlungspolitik sollte daher insbesondere an den bestehenden Kompetenzclustern und den dort vorhandenen technologiespezifischen Stärken ansetzen. Ansatzpunkte bestehen insbesondere in den für die Elektrolyseurproduktion relevanten Bereichen Elektronik und Messtechnik, Metallerzeugnisse, elektrische Ausrüstungen und Maschinenbau sowie bei technologiespezifischen Stackkompetenzen.

Strategische Kompetenzen und resiliente Lieferketten: Eine stärkere regionale Wertschöpfung sollte insbesondere dort angestrebt werden, wo technologische Kompetenzen langfristige Wettbewerbsvorteile ermöglichen. Dies betrifft vor allem Stacktechnologien und weitere wissens- und fertigungsintensive Komponenten. Gleichzeitig lässt sich eine resiliente Elektrolyseurproduktion nicht vollständig regionalisieren. Bei kritischen Rohstoffen und spezialisierten Vorprodukten bleiben europäische und internationale Lieferbeziehungen erforderlich. Technologische Diversifizierung, Materialsubstitution und -effizienz, Recycling sowie die Diversifizierung von Bezugsquellen sollten deshalb mit europäischen Instrumenten zur Rohstoff- und Industriesicherung verbunden werden.

Fachkräftebasis und Engpässe: Der Aufbau und die Skalierung der Produktionskapazitäten setzen voraus, dass ausreichend geeignete Arbeitskräfte verfügbar sind. Fachkräfteengpässe können Personalgewinnung verteuern, Investitionen verzögern und damit die Realisierung der wirtschaftlichen Potenziale begrenzen. Fachkräftestrategien sollten deshalb frühzeitig an den für die Elektrolyseurproduktion besonders relevanten industriell-technischen Berufsgruppen und regionalen Kompetenzclustern ansetzen. Neben der Ausbildung zusätzlicher Fachkräfte kommt der Weiter- und Umqualifizierung eine besondere Bedeutung zu, um Beschäftigten aus verwandten industriellen Tätigkeiten Übergänge in die entstehenden Wertschöpfungsstrukturen zu eröffnen.

Ostdeutschland verfügt damit über eine tragfähige Ausgangsbasis für die Elektrolyseurproduktion. Entscheidend wird sein, die bestehenden industriellen und wissenschaftlichen Kompetenzen so weiterzuentwickeln, dass aus den aufgezeigten Potenzialen dauerhaft wettbewerbsfähige, resiliente und beschäftigungswirksame Wertschöpfung in der Region entsteht.

8 Literatur

- [1] International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2025," International Energy Agency, Paris, Sep. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a6c466dd-b6f0-44bd-a60a-6940eccfb1c3/GlobalHydrogenReview2025.pdfhttps://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
- [2] bp, "bp Energy Outlook: 2025 edition: 2025 edition," 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bp.com/api/files/6cqieuqh4no/master/7187OSav7R0jHuVkT06Zj5/8a914ca3361df9d09627f7a60d11f0dc/bp-energy-outlook-2025.pdf>
- [3] M. Wappler, D. Unguder, X. Lu, H. Ohlmeyer, H. Teschke und W. Lueke, "Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 47, Nr. 79, S. 33551–33570, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.253.
- [4] A. Deasy-Millar, D. Fraile, M. Muron, G. Pawelec, S. Santos und O. Staudenmayer, "Clean Hydrogen Monitor," Brüssel, Sep. 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/09/Clean_Hydrogen_Monitor_09-2025_DIGITAL.pdf
- [5] IRENA, "Regional energy transition outlook: European Union," International Renewable Energy Agency, 2025.
- [6] EU Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, "Industrial Accelerator Act," Brüssel, Mrz. 2026. Zugriff am: 4. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/industrial-accelerator-act_en
- [7] European Commission, "Mechanical engineering," Zugriff am: 30. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering_en
- [8] IEA. "Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database." Zugriff am: 11. Juni 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>
- [9] M. Holst, S. Aschbrenner, T. Smolinka, C. Voglstätter und G. Grimm, "Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems," 2020, doi: 10.24406/publica-1318.
- [10] A. Badgett *et al.*, "Updated Manufactured Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers," National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 2024.
- [11] S. Krishnan *et al.*, "Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks," Rep. 83, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.031.
- [12] The International Renewable Energy Agency (IRENA), "Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal," Jg. 2020, ISBN 978-92-9260-295-6, Dez. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
- [13] G. Glenk, P. Holler und S. Reichelstein, "Advances in power-to-gas technologies: cost and conversion efficiency," Rep. 12, doi: 10.1039/D3EE01208E.

- [14] European Hydrogen Observatory. "Electrolyser cost: Get latest insights into electrolyser cost by technology in Europe (EU27, EFTA and UK)." [Online.] Verfügbar: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/electrolyser-cost>
- [15] Danish Energy Agency, "Technology Brief: Update of hydrogen production via electrolysis in the Technology Catalogue (Jan 24)," [Online]. Verfügbar unter: <https://ens.dk/media/3352/download>
- [16] Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Hg., "Electrolyzers for Hydrogen Production: Technical and Economic Characteristics," 2026. [Online].
- [17] B. D. James, J. M. Huya-Kouadio, C. Houchins, Y. Acevedo, K. McNamara und G. Saur, "Hydrogen Production Cost and Performance Analysis,"
- [18] H. van 't Noordende, F. van Berkel und M. Stodolny, "Next Level Solid Oxide Electrolysis: Upscaling potential and techno-economical evaluation for 3 industrial use cases," Amersfoort, Niederlande, Public report, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ispt.eu/media/2023-SOE-public-report_ISPT.pdf
- [19] BMWK, "Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie," 2023.
- [20] Mitteldeutsche Stiftung Wissenschaft und Bildung, "ifo Faktenmonitor Ostdeutschland: Aktualisierte Daten zur ostdeutschen Wirtschaft," 2026. Zugriff am: 11.08.26. [Online]. Verfügbar unter: <https://mitteldeutsche-stiftung.de/aktualisierung-ifo-faktenmonitor-ostdeutschland/>
- [21] L. J. Titheridge und A. T. Marshall, "Techno-economic modelling of AEM electrolysis systems to identify ideal current density and aspects requiring further research," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 49, S. 518–532, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.181.
- [22] S. A. ee, J. Kim, K. C. Kwon, S. H. Park, H. W. Jang und S. A. Lee, "Anion exchange membrane water electrolysis for sustainable large-scale hydrogen production," *Carbon Neutralization*, Jg. 1, Nr. 1, S. 26–48, 2022, doi: 10.1002/cnl2.9.
- [23] Statistisches Bundesamt (Destatis), "Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008), mit Erläuterungen.: Onlinefassung," Wiesbaden, Apr. 2023.
- [24] J. López-Álvarez, L. E. Pedauga, J. M. Rueda-Cantuche, S. Banacloche und P. Piñero, "FIGARO-REG and the trade exposure of regions," ECE/CES/GE.20/2024/25, 2024.
- [25] Umed Temursho, Jan Oosterhaven und M. Alejandro Cardenete, "A multi-regional generalized RAS updating technique," *Spatial Economic Analysis*, Jg. 16, Nr. 3, S. 271–286, 2021, doi: 10.1080/17421772.2020.1825782.
- [26] T. Junius und J. Oosterhaven, "The Solution of Updating or Regionalizing a Matrix with both Positive and Negative Entries," *Economic Systems Research*, Jg. 15, Nr. 1, S. 87–96, 2003, doi: 10.1080/0953531032000056954.
- [27] OECD. "OECD Economic Outlook 117 long-term scenarios, OECD Data Explorer, Datenkennung OECD.ECO.MAD@DF_EO_LTB(1.0),." Zugriff am: 12. Mai 2026. [Online.]
- [28] KfW Research, "KfW-Mittelstandspanel 2025," 2025.

- [29] Bundesagentur für Arbeit, "Klassifikation der Berufe 2010 – überarbeitete Fassung 2020 Band 1: Systematischer und alphabetischer Teil mit Erläuterungen," 2021.
- [30] E. Eikeng, A. Makhsoos und B. G. Pollet, "Critical and strategic raw materials for electrolyzers, fuel cells, metal hydrides and hydrogen separation technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr. 71, S. 433–464, 2024.
- [31] M. Schmidt, *Rohstoffrisikobewertung - Platingruppenmetalle: Platin, Palladium, Rhodium*, 2014. Aufl. (DERA Rohstoffinformationen 26). Berlin: DERA Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2014.
- [32] Consortium for hydrogen and renewably generated e-fuels (CH2ARGE), Hg., "Critical Materials in Electrolyzers and Fuel Cells," Joint Center for Development & Research in Earth Abundant Materials (JCDREAM).
- [33] D. Gielen und M. Lyons, "Critical materials for the energy transition: Rare earth elements," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022.
- [34] European Commission, "Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report," 2023. [Online]. Verfügbar unter: 10.2873/725585
- [35] OECD, "Mapping the semiconductor value chain: Working towards identifying dependencies and vulnerabilities," Rep. 182, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://econpapers.repec.org/RePEc:oec:stiaac:182-en>

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langform
AEL	Alkalische Elektrolyse
AEMEL	Anionenaustauschmembran-Elektrolyse
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BA	Bundesagentur für Arbeit
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BoP	Balance of Plant
BoS	Balance of Stack
BWS	Bruttowertschöpfung
CAPEX	Capital Expenditure
CCM	Catalyst Coated Membrane
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DRC	Democratic Republic of the Congo (Demokratische Republik Kongo)
ECHA	European Chemicals Agency
EE	Erneuerbare Energien
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
EU	Europäische Union
EUR	Euro
FID	Final Investment Decision
FIGARO	Full International and Global Accounts for Research in input-output Analysis
FLH	Full Load Hours (Volllaststunden)
GDL	Gas Diffusion Layer
GIS	Geoinformationssystem
GRAS	Generalised RAS (Algorithmus)
GW	Gigawatt
GW/a	Gigawatt pro Jahr
h/a	Stunden pro Jahr
H ₂	Wasserstoff
IAA	Industrial Accelerator Act
IEA	International Energy Agency
IO	Input-Output
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISE	Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer)
IWO	Initiative für Wasserstoff in Ostdeutschland
JCDREAM	Joint Center for Development & Research in Earth Abundant Materials
KldB	Klassifikation der Berufe
kWh	Kilowattstunde
LAU2	Local Administrative Unit
LLM(s)	Large Language Model(s)
MEA	Membrane Electrode Assembly (Membran-Elektroden-Einheit)
MinPts	Mindestpunkte (DBSCAN-Parameter)
MR-GRAS	Multi-Regional Generalised RAS
Mt/a	Millionen Tonnen pro Jahr
MtH ₂ /a	Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr
MW	Megawatt

Abkürzung	Langform
MW/a	Megawatt pro Jahr
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne
NUTS	Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEMEL	Protonenaustauschmembran-Elektrolyse
PFAS	Per- und Polyfluoralkylsubstanzen
PGM	Platingruppenmetalle
PtL	Porous Transport Layer
SOEL	Festoxid-Elektrolyse
SRIA	Strategic Research and Innovation Agenda
TRL	Technology Readiness Level
TWh/a	Terawattstunden pro Jahr
WZ	Wirtschaftszweig(e)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensweise zur Ermittlung von potenziellen Fertigungskapazitäten für den globalen und den europäischen Elektrolysemarkt.	8
Abbildung 2: Prognostizierte Entwicklung des globalen, jährlichen Wasserstoffbedarfs in Mt _{H2} /a basierend auf den drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch).	9
Abbildung 3: Entwicklung der jährlichen, globalen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) zwischen den drei Szenarien über die Stützjahre hinweg.	11
Abbildung 4: Entwicklung der jährlichen, europäischen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) in den definierten Szenarien über die Stützjahre hinweg.	12
Abbildung 5: Entwicklung der globalen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate), aufgeteilt nach Stützjahr und geschätztem Marktanteil der Elektrolysetechnologie für das Basisszenario.	13
Abbildung 6: Entwicklung der europäischen Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate), aufgeteilt nach Stützjahr und geschätztem Marktanteil der Elektrolysetechnologie für das Basisszenario	14
Abbildung 7: Technologiedossiers: Übersicht der technischen Eigenschaften der betrachteten Elektrolysetechnologien.	17
Abbildung 8: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von PEMEL-Stackkomponenten.	18
Abbildung 9: Sektorale Produktionsstruktur der vier Elektrolysetechnologien aufgegliedert nach Wirtschaftsabteilungen der WZ-Klassifikation [in %].	23
Abbildung 10: Auswertung der Akteursliste für die ostdeutschen Bundesländer, aufgeteilt nach den untersuchten Hauptkategorien (Branchen).	24
Abbildung 11: Kartographische Darstellung der Akteursliste mit Bezug zur Elektrolyseurherstellung entsprechend der Branche in der untersuchten Region Ostdeutschland.	25
Abbildung 12: Clusterkarte von Ostdeutschland mit den Clusterwertungen nach Dichte, Breite und Balance, auf Gemeindeebene (LAU2) aufgelöst.	26
Abbildung 13: Fortsetzung des Fließschemas aus Abbildung 1 zeigt die weiteren Schritte zur Ableitung der Fertigungskapazitäten in Deutschland und der ostdeutschen Länder.	28
Abbildung 14: Entwicklung der benötigten Fertigungskapazität in GW/a (Zubaurate) und H ₂ -Bedarf in Mt/a, aufgeteilt nach Stützjahr und geschätzte Marktanteile der Elektrolysetechnologien für das Basisszenario in Deutschland.	29
Abbildung 15: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazität (Zubaurate) in GW/a für Ostdeutschland, in den drei Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch) für einen EU-Anteil am globalen Markt von 20 % bzw. 25 % und jeweils mit +/- 1/3 Unsicherheitsbereich.	30
Abbildung 16: Gesamte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Marktszenario, 2025–2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	31

Abbildung 17: Die Abbildung zeigt die indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2045 für die zehn wichtigsten Zulieferbranchen (in Mio. EUR, Preise von 2023).	34
Abbildung 18: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseur-Wertschöpfung in Ostdeutschland nach Szenario, 2025–2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	36
Abbildung 19: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Anforderungsniveau im Basisszenario 2045.	38
Abbildung 20: Zentrale Berufsgruppen des Beschäftigungseffekts der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	39
Abbildung 21: Potenzieller Entwicklungskorridor des europäischen Wasserstoffbedarfs in MtH ₂ /a basierend auf den prognostizierten jährlichen Wasserstoffbedarfen in Mt/a für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch).	57
Abbildung 22: Entwicklung der globalen, kumulierten Elektrolysekapazität [GW]; basierend auf den prognostizierten, jährlichen Wasserstoffbedarfen Mt/a für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch).	58
Abbildung 23: Entwicklung der kumulierten Elektrolysekapazität [GW] für Europa, basierend auf den prognostizierten, jährlichen Wasserstoffbedarfen [GW/a] für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch).	58
Abbildung 24: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazität (Zubaurate) für Deutschland in den definierten Szenarien Niedrig, Basis, und Hoch über die Stützjahre hinweg.	59
Abbildung 25: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazitäten (Zubaurate) im Szenario Basis in [GW/a] für die ostdeutschen Länder inkl. Unsicherheitsbereich im Vergleich zu Deutschland.	59
Abbildung 26: Prozentuale Herstellungskostenanteile der Hauptkomponenten der betrachteten Elektrolysetechnologien AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL.	60
Abbildung 27: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von AEL-Stackkomponenten.	60
Abbildung 28: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von AEMEL-Stackkomponenten.	61
Abbildung 29: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von SOEL-Stackkomponenten.	61
Abbildung 30: Exemplarische Darstellung zur Bildung der Cluster mittels DBSCAN. Räumlich in Verbindung stehende Punkte werden farblich dargestellt.	66
Abbildung 31: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im Basisszenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	82
Abbildung 32: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im erhöhten Szenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	82

Abbildung 33: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im niedrigen Szenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). 83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel der Datenerhebung für die MEA als Unterkomponente des PEM-Elektrolyse Stacks (Hauptkomponente).....	16
Tabelle 2: Übersicht der angenommenen, spezifischen Herstellkostenentwicklung der betrachteten Elektrolysetechnologien	20
Tabelle 3: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Referenzjahr 2025 und nach Marktszenario 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	32
Tabelle 4: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Referenzjahr 2025 und nach Marktszenario 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	37
Tabelle 5: Übersicht der gewählten Größen über die Stützjahre hinweg bzgl. der angenommenen Volllaststunden [FLH] und der elektrischen Systemeffizienz [kWh/kg] erzeugter H ₂	57
Tabelle 6: Sektorale Produktionsstruktur der PEMEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen.	62
Tabelle 7: Sektorale Produktionsstruktur der AEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen.	63
Tabelle 8: Sektorale Produktionsstruktur der AEMEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen.	64
Tabelle 9: Sektorale Produktionsstruktur der SOEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen.	65
Tabelle 10: Veränderbare Parameter zur Bildung der Cluster.	66
Tabelle 11: Übersicht der für die Wertung der Cluster zu Grund liegenden Parameter.	67
Tabelle 12: Bedeutung bzw. Wertung nach Balance-Faktor.	68
Tabelle 13: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	79
Tabelle 14: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im unteren Marktszenario (Niedrig), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	79
Tabelle 15: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im oberen Marktszenario (Hoch), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023).	80
Tabelle 16: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	80

Tabelle 17: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im unteren Marktszenario (Niedrig), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	81
Tabelle 18: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im oberen Marktszenario (Hoch), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	81
Tabelle 19: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Anforderungsniveau im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	83
Tabelle 20: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach zentralen Berufsgruppen im Basisszenario, 2025–2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen).	84
Tabelle 21: Engpasssituation in den zehn Berufen mit den größten modellierten absoluten Beschäftigungseffekten.	85
Tabelle 22: Übersicht der kritischen Rohstoffe, Importabhängigkeiten und Risikoeinstufung für Wertschöpfungsketten.	86

Anhang

Marktprojektionen, Szenarien und Annahmen

	2025	2030	2035	2040	2045
Volllaststunden [h]	4.000	4.000	4.500	4.500	5.000
Systemeffizienz [kWh/kg]	52	50	49	47	45

Tabelle 5: Übersicht der gewählten Größen über die Stützjahre hinweg bzgl. der angenommenen Volllaststunden [FLH] und der elektrischen Systemeffizienz [kWh/kg] erzeugter H₂. Quelle: Fraunhofer ISE – Eigene Daten

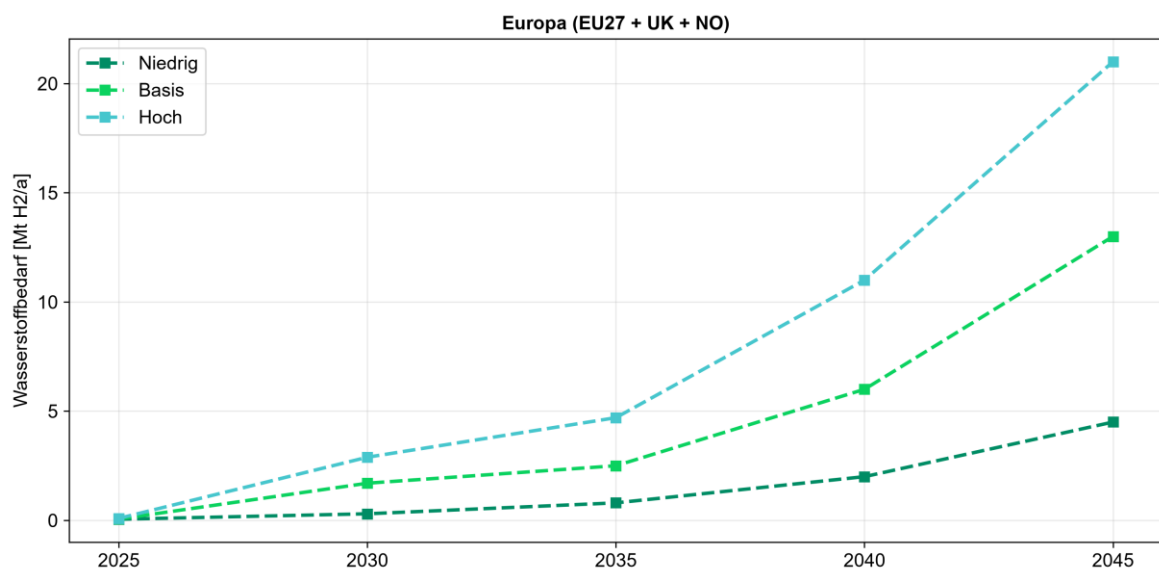


Abbildung 21: Potenzieller Entwicklungskorridor des europäischen Wasserstoffbedarfs in MtH₂/a basierend auf den prognostizierten jährlichen Wasserstoffbedarfen in Mt/a für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch). Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8].

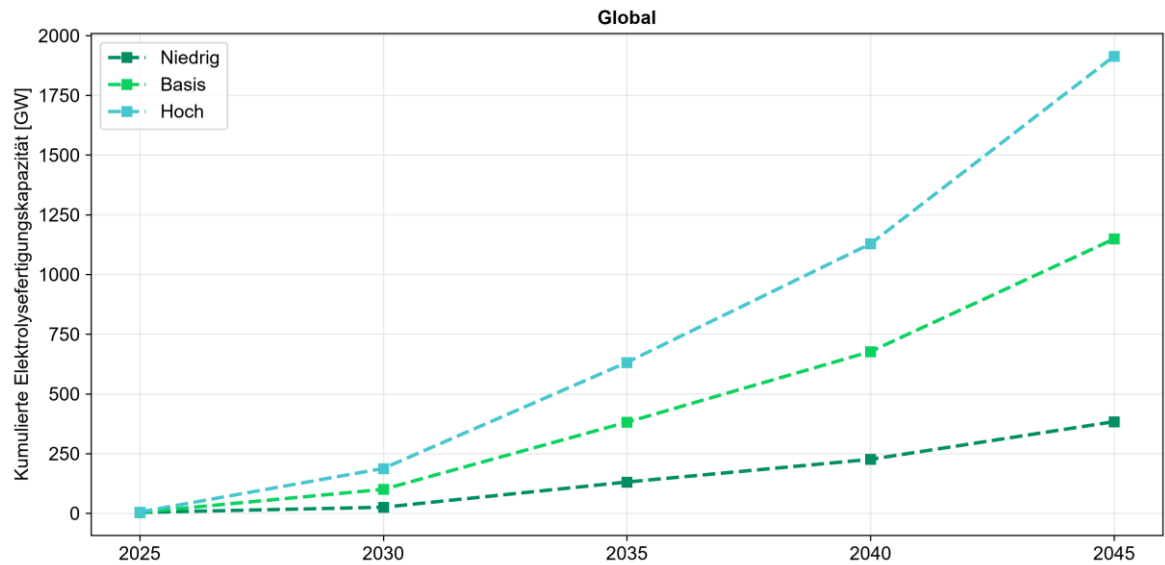


Abbildung 22: Entwicklung der globalen, kumulierten Elektrolysekapazität [GW]; basierend auf den prognostizierten, jährlichen Wasserstoffbedarfen Mt/a für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch). Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1–3].

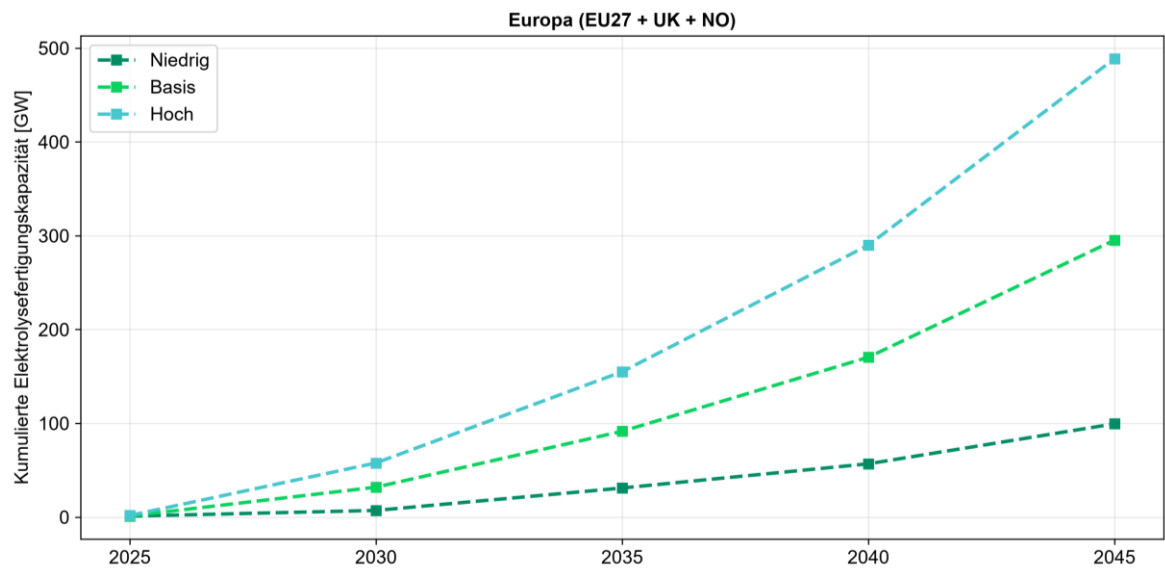


Abbildung 23: Entwicklung der kumulierten Elektrolysekapazität [GW] für Europa, basierend auf den prognostizierten, jährlichen Wasserstoffbedarfen [GW/a] für die drei definierten Szenarien (Niedrig, Basis, Hoch). Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8].

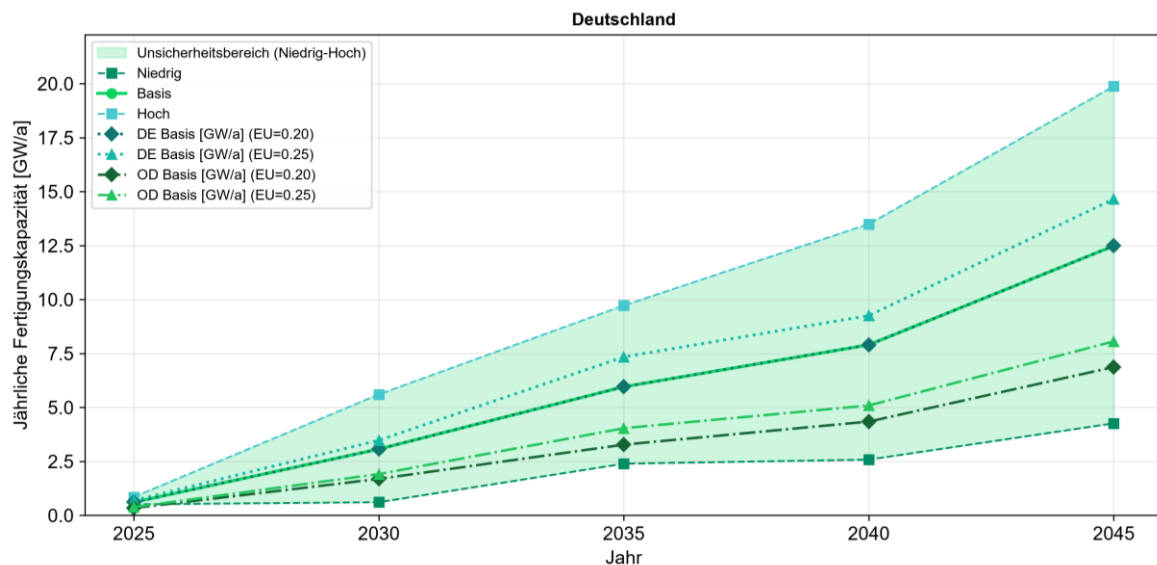


Abbildung 24: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazität (Zubaurate) für Deutschland in den definierten Szenarien Niedrig, Basis, und Hoch über die Stützjahre hinweg. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8] und eigenen Annahmen.

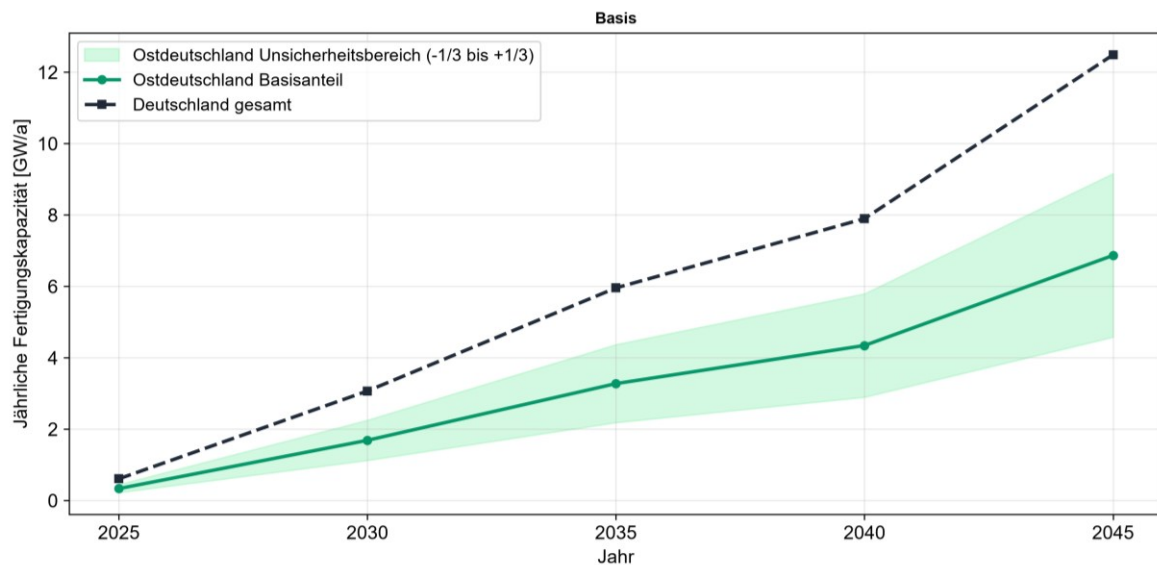


Abbildung 25: Entwicklung der jährlichen Fertigungskapazitäten (Zubaurate) (grüne Linie – 55 % Anteil an dt. Fertigung) im Szenario Basis in [GW/a] für die ostdeutschen Länder inkl. Unsicherheitsbereich (grünes Band) im Vergleich zu Deutschland. Quelle: Fraunhofer ISE – eigene Darstellung auf Basis der Meta-Analyse von [1, 4, 5, 8] und eigenen Annahmen.

Technologieanalyse- und Komponentenlisten inklusive Mapping

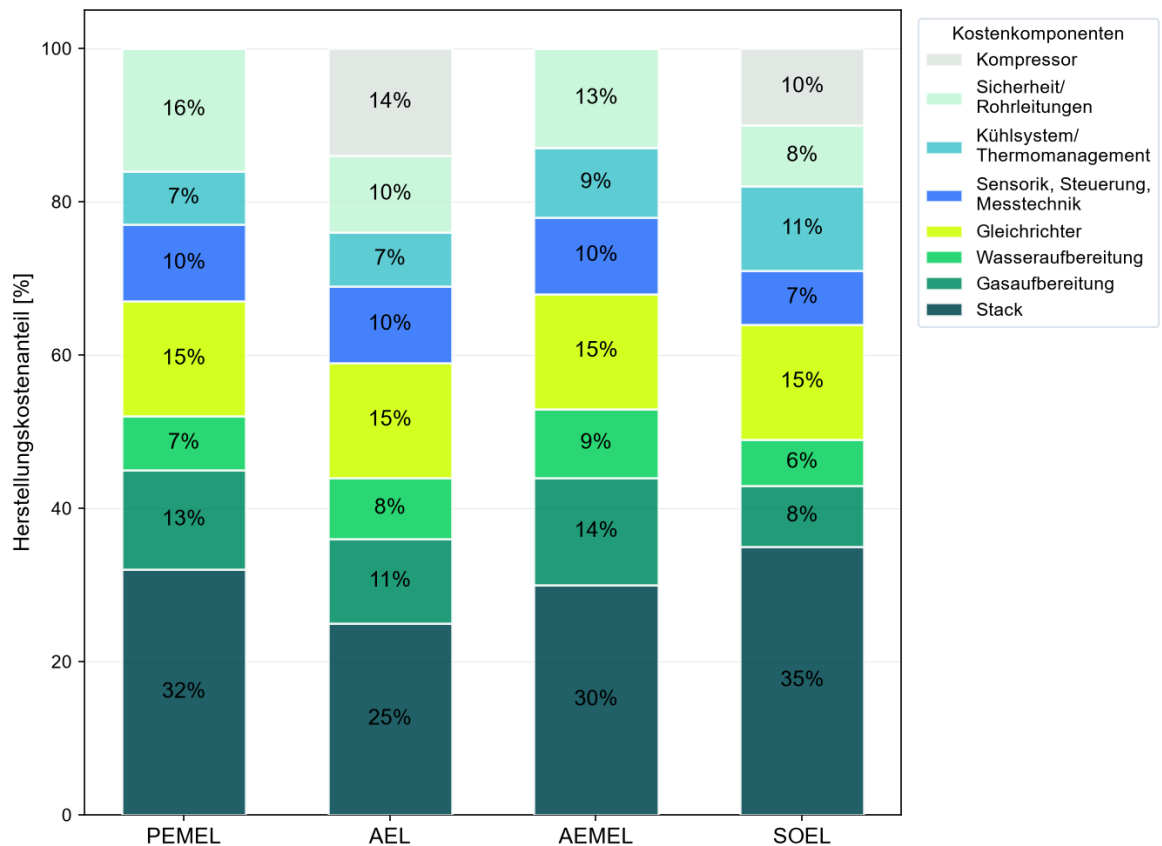


Abbildung 26: Prozentuale Herstellungskostenanteile der Hauptkomponenten der betrachteten Elektrolysetechnologien AEL, AEMEL, PEMEL und SOEL. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis der Analyse von Literatur [9–12], eigenen Daten und Experteninterviews.

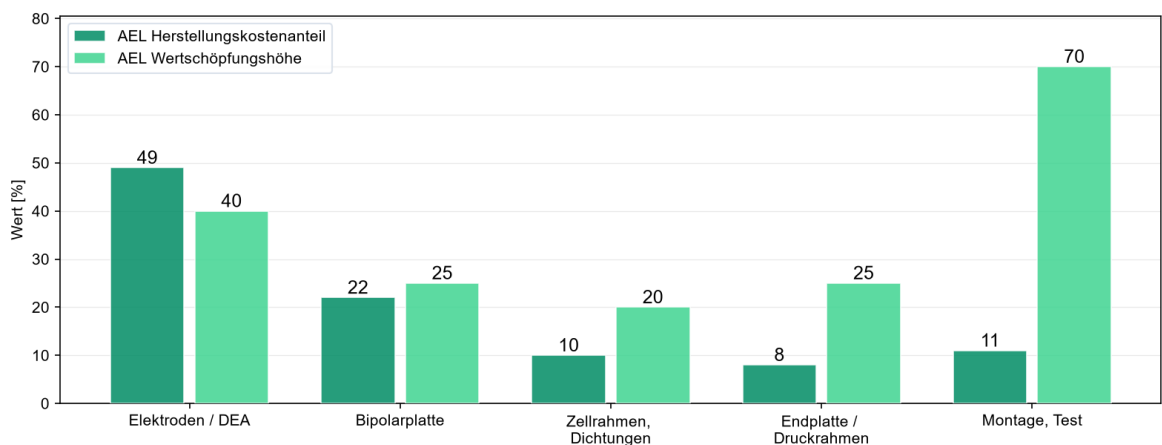


Abbildung 27: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von AEL-Stackkomponenten. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis von Literatur [9, 12], eigenen Daten und Experteninterviews

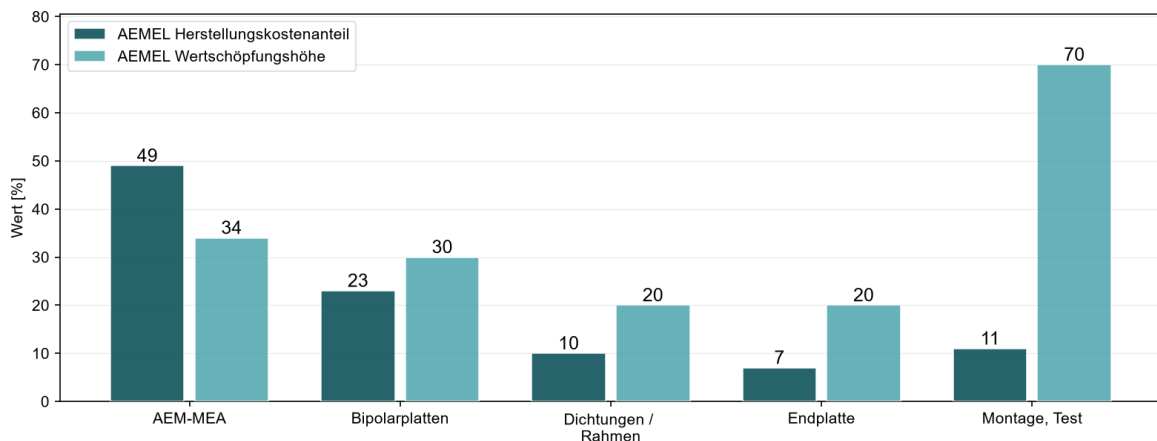


Abbildung 28: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von AEMEL-Stackkomponenten. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis von Literatur [21, 22], eigenen Daten und Experteninterviews

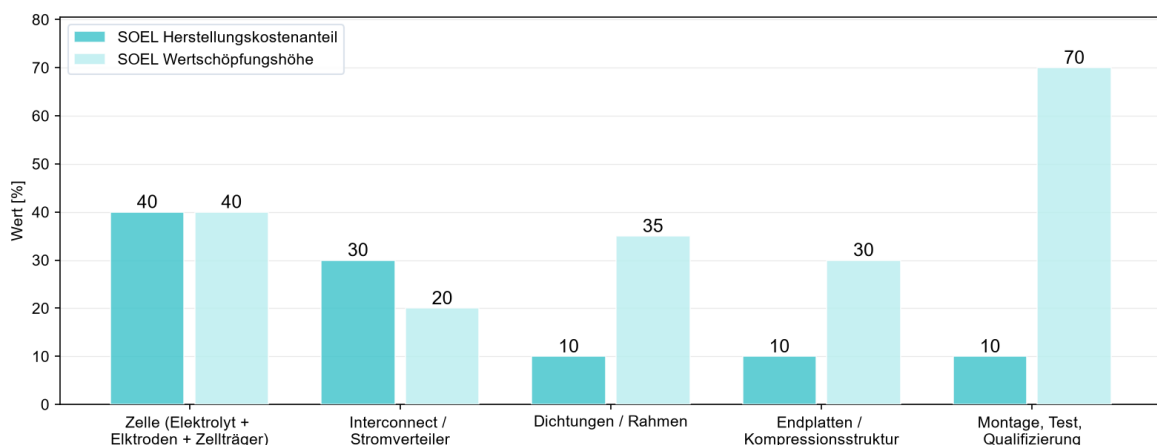


Abbildung 29: Herstellungskostenanteile und potenzielle OEM-Fertigungstiefe am Beispiel von SOEL-Stackkomponenten. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis von Literatur [18], eigenen Daten und Experteninterviews

Die folgenden Tabellen dokumentieren das vollständige Komponentenmapping für die vier betrachteten Elektrolyseurtechnologien und ergänzen die Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 3.2. Für jede Technologie wurde eine eigene Tabelle erstellt. Ausgangspunkt sind die im Rahmen der Technologieanalyse in Kapitel 3.1 identifizierten Haupt- und Unterkomponenten einschließlich ihrer Herstellungskostenanteile, eingesetzten Materialien und prägenden Herstellungsverfahren. Für jede Komponente wurden zunächst die potenziell relevanten Wirtschaftszweige auf Ebene der WZ-4-Steller geprüft. Anschließend wurde derjenige Wirtschaftszweig ausgewählt, der den wirtschaftlichen Schwerpunkt der jeweiligen Komponente am besten abbildet, und für die weitere Darstellung auf die Ebene der WZ-2-Steller aggregiert. Grundlage der Zuordnung ist die öffentlich zugängliche Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008) [23], einschließlich ihrer Erläuterungen, des Statistischen Bundesamtes.

PEMEL-Komponente	Anteil Herstellungs-kosten [in %]	OEM-Fertigungstiefe [%]	Zugeordneter Wirtschaftszweig
MEA, CCM	11,2	25	H. v. chemischen Erzeugnissen
Bipolarplatte	7,4	25	Metallerzeugung und -bearbeitung
Porous Transport Layer	8,0	20	Metallerzeugung und -bearbeitung
Endplatte	2,2	30	H. v. Metallerzeugnissen
Zellrahmen, Dichtungen	1,6	35	H. v. Gummi- und Kunststoffwaren
Montage, Test	1,6	75	Maschinenbau
Gasaufbereitung	13	21	H. v. Metallerzeugnissen
Wasseraufbereitung	7	24	H. v. chemischen Erzeugnissen
Leistungselektronik, Gleichrichter	15	15	H. v. elektrischen Ausrüstungen
Sensorik, Steuerung, Messtechnik	10	30	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kühlsystem, Thermomanagement	7	20	Maschinenbau
Sicherheit, Rohrleitungen	16	50	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen

Tabelle 6: Sektorale Produktionsstruktur der PEMEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen. Quelle: WifOR Institute – eigene Darstellung auf Basis der Technologieanalyse des Fraunhofer ISE. Anmerkungen: Die Abkürzung H. v. steht für „Herstellung von“. Die OEM-Fertigungstiefe gibt an, welcher Anteil der Wertschöpfung typischerweise beim Elektrolyseurhersteller stattfindet; die verbleibende Wertschöpfung entsteht entlang der Zulieferkette.

AEL-Komponente	Anteil Herstellungskosten [in %]	OEM- Fertigungstiefe [%]	Zugeordneter Wirtschaftszweig
Elektroden, DEA	12,3	40	H. v. Metallerzeugnissen
Bipolarplatte	5,5	25	Metallerzeugung und - bearbeitung
Zellrahmen, Dichtungen	2,5	20	H. v. Gummi- und Kunststoffwaren
Endplatte, Druckrahmen	2,0	25	H. v. Metallerzeugnissen
Montage, Test	2,8	70	Maschinenbau
Gasaufbereitung	11	21	H. v. Metallerzeugnissen
Wasseraufbereitung	8	27	H. v. chemischen Erzeugnissen
Leistungselektronik, Gleichrichter	15	15	H. v. elektrischen Ausrüstungen
Sensorik, Steuerung, Messtechnik	10	27	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kühlsystem, Thermomanagement	7	20	Maschinenbau
Sicherheit, Rohrleitungen	10	40	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kompressor	14	15	Maschinenbau

Tabelle 7: Sektorale Produktionsstruktur der AEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen. Quelle: WifOR Institute – eigene Darstellung auf Basis der Technologieanalyse des Fraunhofer ISE. Anmerkungen: Die Abkürzung H. v. steht für „Herstellung von“. Die OEM-Fertigungstiefe gibt an, welcher Anteil der Wertschöpfung typischerweise beim Elektrolyseurhersteller stattfindet; die verbleibende Wertschöpfung entsteht entlang der Zulieferkette.

AEMEL-Komponente	Anteil Herstellungskosten [in %]	OEM- Fertigungstiefe [%]	Zugeordneter Wirtschaftszweig
AEM-MEA (Membran-Elektroden-Einheit)	14,7	34	H. v. chemischen Erzeugnissen
Bipolarplatte	6,9	30	Metallerzeugung und -bearbeitung
Dichtungen, Rahmen	3,0	20	H. v. Gummi- und Kunststoffwaren
Endplatte	2,1	20	H. v. Metallerzeugnissen
Montage, Test	3,3	70	Maschinenbau
Gasaufbereitung	14	25	H. v. Metallerzeugnissen
Wasseraufbereitung	9	33	H. v. chemischen Erzeugnissen
Leistungselektronik, Gleichrichter	15	15	H. v. elektrischen Ausrüstungen
Sensorik, Steuerung, Messtechnik	10	28	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kühlsystem, Thermomanagement	9	20	Maschinenbau
Sicherheit, Rohrleitungen	13	36	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen

Tabelle 8: Sektorale Produktionsstruktur der AEMEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen. Quelle: WifOR Institute – eigene Darstellung auf Basis der Technologieanalyse des Fraunhofer ISE. Anmerkungen: Die Abkürzung H. v. steht für „Herstellung von“. Die OEM-Fertigungstiefe gibt an, welcher Anteil der Wertschöpfung typischerweise beim Elektrolyseurhersteller stattfindet; die verbleibende Wertschöpfung entsteht entlang der Zulieferkette.

SOEL-Komponente	Anteil Herstellungskosten [in %]	OEM- Fertigungstiefe [%]	Zugeordneter Wirtschaftszweig
Zelle (Elektrolyt + Elektroden + Zellträger)	14,0	40	H. v. Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
Interconnect, Stromverteiler	10,5	20	H. v. Metallerzeugnissen
Dichtungen, Rahmen	3,5	35	H. v. Gummi- und Kunststoffwaren
Endplatten, Kompressionsstruktur	3,5	30	H. v. Metallerzeugnissen
Montage, Test, Qualifizierung	3,5	70	Maschinenbau
Gasaufbereitung	8	20	H. v. Metallerzeugnissen
Wasseraufbereitung	6	24	H. v. chemischen Erzeugnissen
Leistungselektronik, Gleichrichter	15	15	H. v. elektrischen Ausrüstungen
Sensorik, Steuerung, Messtechnik	7	20	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kühlsystem, Thermomanagement	11	40	Maschinenbau
Sicherheit, Rohrleitungen	8	40	H. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
Kompressor	10	15	Maschinenbau

Tabelle 9: Sektorale Produktionsstruktur der SOEL – Technologiespezifische Zuordnung von Komponenten zu Wirtschaftszweigen. Quelle: WifOR Institute – eigene Darstellung auf Basis der Technologieanalyse des Fraunhofer ISE. Anmerkungen: Die Abkürzung H. v. steht für „Herstellung von“. Die OEM-Fertigungstiefe gibt an, welcher Anteil der Wertschöpfung typischerweise beim Elektrolyseurhersteller stattfindet; die verbleibende Wertschöpfung entsteht entlang der Zulieferkette.

Karten des GIS- Clusterings der Hersteller/Zuliefererlandschaft

Parameter	Bezeichnung	Bedeutung
ϵ (Epsilon)	Suchradius in Metern	Maximale Distanz zweier Punkte, um als Nachbarn zu gelten
MinPts	Mindestpunkte	Minimale Punktzahl im ϵ -Radius zur Bildung eines Kerns

Tabelle 10: Veränderbare Parameter zur Bildung der Cluster. Quelle: Fraunhofer ISE – Eigene Darstellung

Ein Cluster kann dabei nur entstehen, wenn min. x Unternehmen in einem Radius von y km zueinanderstehen. Die zu Grunde gelegten Parameterwerte für die Erstellung eines Clusters sind hier MinPts = 3 (Mindestanzahl an Akteuren) und $\epsilon = 15$ (Radius in km). So werden in einem ersten Schritt die Punkte des Punktlayers aus der Abbildung 11 Clustern mit eindeutigen IDs zugeordnet. Eine Exemplarische Darstellung der Erzeugung findet sich in Abbildung 30.

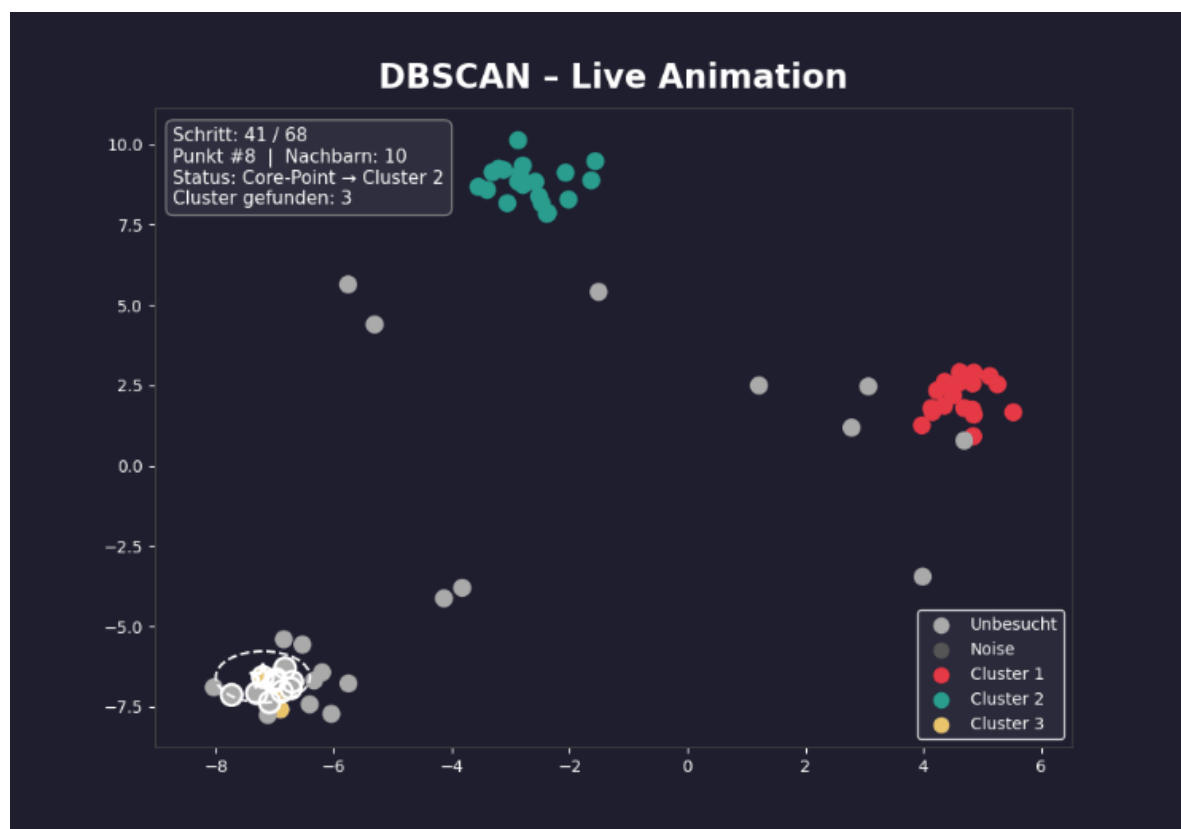


Abbildung 30: Exemplarische Darstellung zur Bildung der Cluster mittels DBSCAN. Räumlich in Verbindung stehende Punkte werden farblich dargestellt. Graue Punkte werden als Noise behandelt und keinem Cluster zugeordnet. Quelle: Fraunhofer ISE – Eigene Darstellung

Für eine weitergehende Aussage bzgl. der Güte der Cluster, findet anschließend eine Wertung statt, basierend auf Dichte der Punkte, Kategoriebreite (Anzahl der Branchen) und Balance. Die Bedeutung der Parameter zur Clusterwertung ist in Tabelle 11.

Eigenschaft	Frage	Je mehr ...
Dichte	Wie viele Firmen sind im Cluster?	... desto besser
Kategorienbreite	Wie viele verschiedene Branchen sind vertreten?	... desto besser
Balance	Sind die Kategorien gleichmäßig verteilt?	... desto besser

Tabelle 11: Übersicht der für die Wertung der Cluster zu Grund liegenden Parameter. Quelle: Fraunhofer ISE – Eigene Darstellung

Je höher die Wertung, desto besser ist das jeweilige Cluster in Bezug zu den Parametern aus Tabelle 11 zu verstehen. Die Dichte bestimmt sich nach:

$$Dichte = \log(1 + n_c)$$

N_c steht dabei für die Dichte der Punkte im Cluster selbst. Für die Kategoriebreite belohnt der lineare Faktor jede zusätzlich im Cluster vorkommende Kategorie (Branche) gleichmäßig. Die +1 stellt sicher, dass der Faktor nie null ist:

$$Breite = (1 + k_c)$$

Für die folgende Balance wird bestimmt, wie gleichmäßig die Firmen auf die vorhandenen Kategorien verteilt sind. Grundlage hierfür ist die normierte Shannon-Entropie:

$$H = \sum_{i=1}^k p_i * \log(p_i)$$

Mit p_i = Anteil der Kategorie an allen Cluster-Punkten.

$$H_{norm} = \frac{H}{\log_2(k)} \in [0,1]$$

Damit Cluster mit einer homogenen Verteilung auch eine positive Wertung erhalten und nicht völlig abgewertet werden, wird ein Balance-Faktor eingeführt (Tabelle 12). Sehr diverse Cluster werden aber durchgehend mit einer höheren Wertung beaufschlagt (belohnt).

$$Balance - Faktor = 0,5 + H_{Norm}$$

H_{norm}	Bedeutung	Beispiel
0,0	Völlig homogen	100% Forschung
0,5	Mäßig divers	70% Industrie, 30% Forschung
1,0	Maximal divers	Gleichverteilung auf alle Kategorien

Tabelle 12: Bedeutung bzw. Wertung nach Balance-Faktor. Quelle: Fraunhofer ISE – Eigene Darstellung

Für die finale Wertung werden alle zuvor erläuterten Komponenten multiplikativ miteinander verknüpft und anschließend normiert. Für eine möglichst hohe Wertung muss ein Cluster in allen drei Dimensionen gut abschneiden. Die gewerteten Cluster werden final auf eine Gemeindeebene (LAU2) verschnitten und aggregiert, so dass die dargestellten Cluster in eine administrative Ebene aufgehen. Erstrecken sich die gebildeten Cluster auf mehr als eine Gemeinde, werden diese zu einem Cluster zusammengezogen.

$$score(c) = \underbrace{\log(1 + n_c)}_{\text{Dichte}} * \underbrace{(1 + k_c)}_{\text{Breite}} * \underbrace{(0,5 + H_{norm,c})}_{\text{Balance}}$$

Regionale Input-Output-Modellierung

Zur Quantifizierung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Elektrolyseurproduktion wird eine multiregionale Input-Output-Analyse eingesetzt. Die Methode bildet die wirtschaftlichen Verflechtungen zwischen Wirtschaftszweigen und Regionen ab und ermöglicht es, nachzuvollziehen, welche Produktionsaktivitäten ein zusätzlicher Nachfrageimpuls sowohl bei den unmittelbar beteiligten Unternehmen als auch entlang der vorgelagerten Lieferketten auslöst. Die regionale Differenzierung des Modells erlaubt es dabei, die innerhalb Ostdeutschlands entstehenden Effekte von Lieferbeziehungen nach Westdeutschland und ins Ausland abzugrenzen.

Ausgangspunkt der Berechnung ist eine Input-Output-Tabelle, in der die Vorleistungslieferungen zwischen den Wirtschaftszweigen sowie deren Produktionswert, Wertschöpfung und Lieferungen an die Endnachfrage erfasst werden. Aus den beobachteten Lieferbeziehungen werden technische Koeffizienten abgeleitet, die angeben, welche Vorleistungen ein Wirtschaftszweig für die Herstellung einer Einheit seines Outputs benötigt. Mithilfe der Leontief-Inversen werden neben dem ursprünglichen Nachfrageimpuls auch sämtliche daraus resultierenden vorgelagerten Produktionsrunden berücksichtigt. Die so ermittelten Outputwirkungen werden anschließend über sektorspezifische Koeffizienten in Bruttowertschöpfung und Beschäftigung übersetzt.

Die Input-Output-Analyse ist ein wissenschaftlich etablierter Ansatz zur konsistenten Erfassung gesamtwirtschaftlicher Lieferketteneffekte. Ihre Aussagekraft beruht insbesondere auf der systematischen Verknüpfung amtlicher volkswirtschaftlicher Daten, der Erfassung der modellierten Vorleistungsverflechtungen und der Vermeidung von Doppelzählungen. Zugleich handelt es sich um ein lineares und nachfragegetriebenes Modell. Es wird angenommen, dass die Vorleistungsstruktur

innerhalb eines Modelljahres konstant bleibt, die Produktion proportional auf zusätzliche Nachfrage reagiert und keine Kapazitätsengpässe, Preisänderungen oder Substitutionseffekte auftreten. Die Ergebnisse sind daher nicht als punktgenaue Prognosen zu verstehen, sondern als modellbasierte Abschätzung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale unter den jeweils zugrunde gelegten Markt-, Produktions- und Beschaffungsannahmen.

Im Folgenden werden zunächst der Aufbau und die Datengrundlage des regionalen Input-Output-Modells beschrieben. Anschließend wird erläutert, wie die Szenarien zur Elektrolyseurproduktion in einen sektoral und regional differenzierten Nachfrageimpuls übersetzt und daraus die wirtschaftlichen Effekte berechnet werden. Die zentralen Annahmen und Grenzen der Interpretation werden abschließend zusammengefasst.

Aufbau des Modells

Das Modell basiert auf einer eigens für die Studie erstellten multiregionalen Input-Output-Tabelle. Diese bildet Deutschland getrennt nach Ost- und Westdeutschland ab und erfasst zugleich die wirtschaftlichen Verflechtungen mit dem Ausland. Die regionale Differenzierung ist erforderlich, um nicht nur die insgesamt in Deutschland ausgelösten Effekte zu bestimmen, sondern auch abzubilden, welcher Anteil der Produktion und Wertschöpfung in Ostdeutschland verbleibt, nach Westdeutschland ausstrahlt oder im Ausland entsteht.

Die Tabelle unterscheidet 64 Wirtschaftszweige gemäß NACE Rev. 2 beziehungsweise WZ 2008. Ausgangspunkt ist das Basisjahr 2017. Die Modellstruktur wird zunächst anhand beobachteter nationaler Input-Output-Tabellen bis 2023 fortgeschrieben und anschließend für die Szenariojahre bis 2045 projiziert. Der Aufbau erfolgt in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten.

Regionale Ausgangsbasis

Die regionale Ausgangsstruktur wird der Eurostat-Datenbank FIGARO-REG [24] entnommen. FIGARO-REG stellt für das Jahr 2017 eine symmetrische Input-Output-Tabelle mit interregionalen Lieferbeziehungen für 305 räumliche Einheiten bereit, darunter 288 europäische NUTS-2-Regionen. Die Datenquelle weist damit eine deutlich höhere räumliche Auflösung auf als nationale Input-Output-Tabellen. Sie wird im Modell als empirische Ausgangsstruktur für die regionale Verteilung von Produktion, Vorleistungslieferungen und Handelsbeziehungen verwendet.

Deutschland wird in FIGARO-REG in 38 NUTS-2-Regionen unterteilt. Acht dieser Regionen werden Ostdeutschland zugeordnet: Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Dresden, Chemnitz, Leipzig, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Die übrigen deutschen NUTS-2-Regionen bilden Westdeutschland. Die NUTS-2-Ebene dient ausschließlich der Konstruktion und Regionalisierung der Input-Output-Tabelle. Für die Berechnung und Darstellung der Studienergebnisse werden die regionalen Werte anschließend zu Ost- und Westdeutschland zusammengefasst.

Während des Modellaufbaus umfasst die Tabelle insgesamt 83 räumliche Einheiten: 38 deutsche NUTS-2-Regionen sowie 45 ausländische Volkswirtschaften beziehungsweise Länderaggregate. Die räumliche Auflösung unterscheidet sich dabei nach Art der Lieferbeziehung:

- Lieferungen innerhalb Deutschlands werden auf Ebene der deutschen NUTS-2-Regionen abgebildet;

- Lieferungen zwischen deutschen Regionen und dem Ausland verbinden die regionalen deutschen Konten mit nationalen ausländischen Konten;
- Lieferungen zwischen ausländischen Volkswirtschaften verbleiben auf Länderebene.

Diese hybride Struktur ermöglicht eine detaillierte Abbildung der innerdeutschen Verflechtungen, ohne die internationalen Lieferketten aus dem Modell auszublenden.

Sektorale Disaggregation

FIGARO-REG unterscheidet lediglich zwischen zehn aggregierten Wirtschaftsbereichen. Für die Untersuchung der Elektrolyseurproduktion ist diese sektorale Auflösung nicht ausreichend. So werden in FIGARO-REG unter anderem der Maschinenbau, die chemische Industrie, die Metallherzeugung und die Herstellung von Metallherzeugnissen gemeinsam dem Verarbeitenden Gewerbe zugeordnet. Da diese Wirtschaftszweige innerhalb der Elektrolyseur-Lieferketten unterschiedliche Funktionen und Wertschöpfungsintensitäten aufweisen, werden die regionalen Daten auf die 64 Wirtschaftszweige der nationalen FIGARO-Tabellen disaggregiert.

Hierfür wird die sektorale Zusammensetzung der nationalen symmetrischen FIGARO-Tabellen verwendet. Diese enthalten für die erfassten europäischen und außereuropäischen Volkswirtschaften sowie für ein Rest-der-Welt-Aggregat die vollständige Gliederung nach 64 Wirtschaftszweigen.

Jeder in FIGARO-REG beobachtete Lieferstrom zwischen zwei übergeordneten Sektorblöcken wird anhand der nationalen sektoralen Lieferstruktur auf die zugehörigen 64 Wirtschaftszweige verteilt. Jede beobachtete 10-x-10-Regionalzelle wird durch eine gemeinsame Anteilsformel zu einer 64-x-64-Teilmatrix erweitert: Für einen beobachteten Strom des Werts V vom Sektorblock r zum Block c erhält die Teilzelle, die FIGARO-Sektor i innerhalb von r mit Sektor j innerhalb von c verbindet,

$$Z^{64}(i, j) = V \times \frac{F(i, j)}{\sum_{i' \in r, j' \in c} F(i', j')}$$

wobei F die nationale FIGARO-Strommatrix des Ursprungslands ist. Da der Nenner alle Zellen des betreffenden Blockpaars aggregiert, summieren sich die Anteile innerhalb jedes Blocks zu eins, und die disaggregierten Werte reproduzieren den beobachteten regionalen Gesamtwert exakt. Dadurch bleibt der in FIGARO-REG beobachtete regionale Gesamtstrom vollständig erhalten: Die sektorale Disaggregation verändert nicht die Höhe der regionalen Lieferungen, sondern ausschließlich deren Verteilung auf die 64 Wirtschaftszweige.

Die sektoralen Anteile werden für jedes Ursprungsland separat berechnet. Zudem wird zwischen Lieferungen für die inländische Verwendung und Exportlieferungen unterschieden. Damit wird berücksichtigt, dass sich die sektorale Zusammensetzung exportierter Güter und Dienstleistungen von der Zusammensetzung der für den heimischen Markt bestimmten Produktion unterscheiden kann.

Kann für eine Kombination aus Ursprungsland, Sektorblock und Art des Lieferstroms kein nationaler Anteil berechnet werden, weil der entsprechende Gesamtstrom null beträgt, wird ersatzweise der globale Durchschnitt der jeweiligen Stromart verwendet. Dies betrifft vor allem einzelne Exportströme in Wirtschaftszweigen, in denen grenzüberschreitende Lieferungen selten oder statistisch nicht ausgewiesen sind. Das Ersatzverfahren betrifft 0,49 Prozent der zu disaggregierenden Fälle, jedoch

weniger als 0,001 Prozent des insgesamt zugeordneten Werts. Sein Einfluss auf die aggregierten Modellergebnisse ist entsprechend gering.

Neben den Vorleistungslieferungen werden auch die übrigen Bestandteile der Input-Output-Tabelle disaggregiert. Arbeitnehmerentgelt, Bruttobetriebsüberschuss und sonstige Nettoproduktionsabgaben werden als separate Wertschöpfungskomponenten erhalten und dem Standort des jeweils produzierenden Wirtschaftszweigs zugeordnet. Die Endnachfrage wird nach Ländern, Nachfragekategorien, übergeordneten Sektorblöcken und der Art des Handelsstroms differenziert.

Abgleich mit den nationalen FIGARO-Tabellen

Die disaggregierte regionale Tabelle kombiniert Informationen aus zwei Datenquellen: FIGARO-REG bestimmt im Wesentlichen die räumliche Verteilung der Lieferströme, während die nationalen FIGARO-Tabellen deren sektorale Zusammensetzung vorgeben. Da beide Datenquellen unterschiedliche Aggregationsstufen und Erstellungsverfahren aufweisen, stimmt die zunächst konstruierte Tabelle nicht automatisch mit allen amtlich ausgewiesenen nationalen Gesamtwerten überein.

Die Tabelle wird daher mithilfe des Multi-Regional Generalised RAS-Verfahrens (MR-GRAS) [25] abgeglichen. Das Verfahren erweitert den klassischen GRAS-Algorithmus [26] um zusätzliche Restriktionen für multiregionale Tabellen. Neben den vorgegebenen Zeilen- und Spaltensummen wird sichergestellt, dass sich die regionalen Einträge innerhalb jedes nationalen Blocks exakt zu den entsprechenden Werten der nationalen FIGARO-Tabelle aggregieren.

Der Abgleich verfolgt damit zwei Ziele:

- Die regionalen Lieferstrukturen aus FIGARO-REG sollen so weit wie möglich erhalten bleiben.
- Die Summe der regionalen Ergebnisse muss mit den amtlich ausgewiesenen nationalen Produktions-, Vorleistungs-, Wertschöpfungs- und Endnachfragewerten übereinstimmen.

Die Anpassung erfolgt multiplikativ und vorzeichenerhaltend. Positive beziehungsweise negative Einträge behalten daher ihr Vorzeichen. Gleichzeitig können grundsätzlich keine neuen Lieferbeziehungen erzeugt werden, wenn an der entsprechenden Stelle der Ausgangsmatrix kein Strom vorhanden ist. Diese Eigenschaft verhindert eine rein modellgetriebene Entstehung bislang nicht beobachteter Lieferströme, begrenzt jedoch zugleich die Möglichkeit, neu entstehende Lieferbeziehungen abzubilden.

Für das Basisjahr 2017 beträgt die stromgewichtete absolute Anpassung innerhalb des deutschen Regionalblocks 21,95 Prozent. Bei den jährlichen Fortschreibungen liegt sie für die deutschen regionalen Lieferströme zwischen 8,06 und 16,65 Prozent und für die ausländischen Lieferströme zwischen 6,67 und 19,95 Prozent. Die Anpassungen spiegeln insbesondere wider, dass eine regionale Ausgangstabelle mit zehn breiten Wirtschaftsbereichen mit vollständigen nationalen Konten für 64 Wirtschaftszweige in Einklang gebracht wird.

Als ergänzendes Maß für den Erhalt der regionalen Ausgangsstruktur wird die Korrelation, zwischen der zunächst konstruierten und der abgeglichenen Tabelle betrachtet. Für das Jahr 2017 beträgt sie

0,982 für alle deutschlandbezogenen Lieferströme und 0,997 für die Lieferungen innerhalb Deutschlands. Die hohen Korrelationen zeigen, dass der Abgleich die grundlegende räumliche Struktur von FIGARO-REG weitgehend erhält. Sie sind jedoch nicht als Beleg dafür zu verstehen, dass jeder einzelne regionale Lieferstrom unmittelbar beobachtet wird. Die sektorale Verteilung innerhalb der breiten FIGARO-REG-Blöcke bleibt eine modellbasierte Schätzung.

Fortschreibung bis 2023

Da FIGARO-REG nur für das Jahr 2017 vorliegt, wird die regionale Tabelle schrittweise bis zum Jahr 2023 fortgeschrieben. Hierfür dient die abgeglichene Tabelle des jeweiligen Vorjahres als Ausgangsstruktur für das Folgejahr. Die nationalen FIGARO-Tabellen des jeweiligen Jahres liefern die neuen Zeilen-, Spalten- und nationalen Gesamtsummen.

Durch dieses sequenzielle Vorgehen werden Veränderungen der nationalen Produktions-, Vorleistungs- und Handelsstrukturen schrittweise in das Regionalmodell übertragen. Die regionalen Strukturen verändern sich dadurch nicht sprunghaft, sondern werden von Jahr zu Jahr an die beobachtete gesamtwirtschaftliche Entwicklung angepasst.

Vor jedem Fortschreibungsschritt wird geprüft, ob die Struktur der vorhandenen, nicht vorhandenen und gegebenenfalls negativen Einträge mit der nationalen Tabelle des Zieljahres vereinbar ist. Zudem werden die regionalen Zielwerte so konstruiert, dass sie sich exakt zu den jeweiligen nationalen Gesamtwerten aggregieren und eine konsistente Berechnung der Input-Output-Effekte ermöglichen.

Projektion bis 2045

Für die Jahre nach 2023 liegen keine beobachteten FIGARO-Tabellen vor. Die Tabellen für die relevanten Szenariojahre von 2025 bis 2045 werden daher ausgehend von der abgeglichenen Tabelle des Jahres 2023 projiziert. Grundlage sind länderspezifische kumulierte BIP-Wachstumsfaktoren der OECD [27], die auf das Jahr 2023 indexiert werden.

Die Produktionswerte, Wertschöpfungskomponenten und Endnachfragegrößen einer Volkswirtschaft werden mit dem jeweiligen länderspezifischen Wachstumsfaktor skaliert. Anschließend werden die nationalen und regionalen Tabellen erneut abgeglichen, damit die Zeilen-, Spalten- und Gesamtsummen konsistent bleiben.

Die Projektion schreibt damit im Wesentlichen die Produktions- und Handelsstruktur des Jahres 2023 fort. Sie unterstellt keine eigenständigen Veränderungen der sektoralen Vorleistungsstruktur, der regionalen Produktionsanteile oder der bilateralen Handelsbeziehungen, soweit diese nicht aus der Skalierung und dem erneuten Tabellenabgleich resultieren. Diese Annahme ist erforderlich, weil für eine belastbare Prognose des strukturellen Wandels auf Ebene von 64 Wirtschaftszweigen und zahlreichen Regionen keine hinreichend detaillierte Datengrundlage vorliegt.

Die Projektion ist daher nicht als eigenständige sektorale oder regionale Strukturprognose zu interpretieren. Sie stellt vielmehr eine konsistente Fortschreibung der Wirtschaftsstruktur von 2023 unter länderspezifischen gesamtwirtschaftlichen Wachstumspfaden dar.

Die FIGARO-Tabellen werden in jeweiligen Preisen veröffentlicht, während die verwendeten BIP-Wachstumsraten reale Veränderungen abbilden. Da die Ausgangswerte des Jahres 2023 mit realen

Wachstumsfaktoren fortgeschrieben werden, sind die ausgewiesenen Szenarioergebnisse als preisbereinigte Werte zu Preisen von 2023 zu interpretieren.

Übersetzung der Elektrolyseurproduktion in einen Nachfrageimpuls

Die in den Szenarien ausgewiesenen Ausgaben für Elektrolyseure können nicht unmittelbar als Nachfragevektor in die Input-Output-Tabelle übernommen werden. Sie müssen zunächst in eine sektoral und regional differenzierte Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen übersetzt werden.

Ausgangspunkt sind die Szenarioergebnisse zur Elektrolyseurproduktion, die nach Herkunftsregion, Szenariojahr und Elektrolysetechnologie differenziert vorliegen. Über das in Kapitel 3 beschriebene Mapping werden die einzelnen Technologien zunächst in Haupt- und Unterkomponenten zerlegt und anschließend den jeweils relevanten Wirtschaftszweigen zugeordnet.

Für jede Kombination aus Komponente und Wirtschaftszweig werden insbesondere folgende Größen berücksichtigt:

- der Anteil der Komponente an den Herstellungskosten des Elektrolyseurs;
- der Anteil der lokalen Wertschöpfung des Elektrolyseurherstellers;
- der Anteil der von vorgelagerten Zulieferern bezogenen Leistungen;
- der Anteil dieser Zulieferleistungen, der unter den jeweiligen Szenarioannahmen aus Ostdeutschland bezogen wird.

Die Herstellungskosten werden unter Annahme einer Umsatzmarge von 5,9 Prozent mit dem Faktor $1/(1 - 0,059)$ in Umsätze umgerechnet. [28] Auf dieser Grundlage wird für jedes Szenariojahr ein sektoral differenzierter Nachfragevektor für die vorgelagerten Zulieferleistungen konstruiert.

Der ostdeutsche Anteil der Zulieferleistungen kann nicht unmittelbar beobachtet werden und stellt eine zentrale Szenarioannahme dar. Neben einer mittleren Variante auf Basis, der im Input-Output-Modell beobachteten, regionalen Lieferstrukturen und der in der Technologieanalyse definierten Produktionsstrukturen werden daher eine untere und eine obere Variante berechnet. Diese dienen auch der Analyse der Frage, welchen Effekt eine erhöhte, beziehungsweise verringerte, Ansiedlung von Zulieferern in Ostdeutschland haben könnte. Hierfür wird der aus dem Input-Output-Modell abgeleitete ostdeutsche Anteil an den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen in der unteren und oberen Variante jeweils um 25 Prozent verringert beziehungsweise erhöht und anschließend auf den Wertebereich zwischen null und hundert Prozent begrenzt.

Die lokale Wertschöpfung des Elektrolyseurherstellers wird nicht in den Nachfragevektor der Zulieferindustrien aufgenommen. Sie wird separat als direkter OEM-Effekt berechnet. Durch diese Trennung wird verhindert, dass dieselbe wirtschaftliche Aktivität sowohl beim Elektrolyseurhersteller als auch innerhalb der vorgelagerten Lieferkette berücksichtigt und damit doppelt gezählt wird.

Der resultierende Nachfragevektor umfasst somit ausschließlich die unter den jeweiligen Szenarioannahmen regional zugeordneten Zulieferleistungen. Er bildet den Ausgangspunkt für die im nächsten Kapitel beschriebene Berechnung der Effekte.

Berechnung der Effekte

Ausgangspunkt der Effektberechnung ist die abgeglichene multiregionale Vorleistungsmatrix (Z). Sie enthält die Lieferungen von Gütern und Dienstleistungen zwischen allen im Modell abgebildeten

Kombinationen aus Regionen und Wirtschaftszweigen. Der Vektor (x) weist den jeweiligen Gesamtoutput dieser Region-Sektor-Kombinationen aus.

Alle folgenden Größen beziehen sich auf ein einzelnes Modelljahr; die Berechnung wird für jedes Modelljahr separat durchgeführt. Zeit-, Szenario- und Technologieindizes werden zur besseren Lesbarkeit nicht dargestellt.

Technische Koeffizienten und Leontief-Inverse

Aus der Vorleistungsmatrix werden zunächst die technischen Koeffizienten berechnet:

$$A = Z\hat{x}^{-1}$$

Dabei bezeichnet $\hat{x}^{-1}$ eine Diagonalmatrix mit den reziproken Gesamtoutputs. Jedes Element $A(i, j)$ gibt an, welcher Output des liefernden Region-Sektors (i) benötigt wird, um eine Einheit Output im empfangenden Region-Sektor (j) herzustellen. Für Region-Sektor-Kombinationen ohne ausgewiesenen Output werden die entsprechenden Koeffizienten auf null gesetzt.

Auf dieser Grundlage wird die Leontief-Inverse berechnet:

$$L = (I - A)^{-1}$$

Sie bildet neben den unmittelbar benötigten Vorleistungen auch alle weiteren vorgelagerten Produktionsrunden ab. Das Element $L(i, j)$ gibt an, welcher gesamte Output im Region-Sektor (i) erforderlich ist, wenn die Nachfrage nach dem Output des Region-Sektors (j) um eine Einheit steigt. Berücksichtigt werden damit sowohl die direkten Zulieferungen an den nachfragenden Wirtschaftszweig als auch die Vorleistungen, die diese Zulieferer ihrerseits von weiteren Wirtschaftszweigen und Regionen beziehen.

Das Modell wird als offenes Input-Output-Modell berechnet. Die Nachfrage der privaten Haushalte bleibt exogen und wird nicht durch zusätzlich entstehende Einkommen erhöht. Die Ergebnisse umfassen daher Typ-I-Effekte, also die im Nachfragevektor enthaltene erste Zulieferrunde und alle daraus entstehenden vorgelagerten Lieferketteneffekte. Induzierte Konsumeffekte werden nicht berücksichtigt.

Für die Effektberechnung werden die deutschen NUTS-2-Regionen zu Ost- und Westdeutschland zusammengefasst. Die ausländischen Volkswirtschaften verbleiben auf nationaler Ebene beziehungsweise in den verwendeten Länderaggregaten. Dadurch kann ausgewiesen werden, welche Wirkungen in Ostdeutschland entstehen, nach Westdeutschland ausstrahlen oder auf ausländische Produktionsstandorte entfallen.

Berechnung der vorgelagerten Lieferketteneffekte

Der hergeleitete Wasserstoff-Nachfragevektor (f) enthält die unter den jeweiligen Szenario- und Local-Content-Annahmen regional zugeordneten Zulieferleistungen. Der gesamte Produktionsbedarf lässt sich dabei zerlegen in:

$$Lf = f + (L - I)f,$$

Der erste Bestandteil (f) umfasst die Nachfrage bei den unmittelbar betroffenen Zulieferern. Der zweite Bestandteil $((L - I)f)$ erfasst die Produktion, die in allen weiteren vorgelagerten Stufen der Lieferkette erforderlich ist.

Aus klassischer Input-Output-Perspektive umfasst (Lf) somit sowohl die erste als auch die nachgelagerten Produktionsrunden des eingespeisten Nachfrageimpulses. In der Ergebnisdarstellung der Studie werden diese Wirkungen gemeinsam als vorgelagerte Lieferketteneffekte, bzw. Indirekte Effekte bezeichnet. Diese Bezeichnung folgt der Perspektive der Elektrolyseurproduktion: Alle über (Lf) ermittelten Aktivitäten entstehen außerhalb der separat betrachteten Wertschöpfung des Elektrolyseurherstellers.

Die lokale Wertschöpfung des Elektrolyseurherstellers ist nicht Bestandteil des Nachfragevektors (f). Sie wird auf Grundlage des Technologie- und Komponenten-Mappings separat bestimmt und als direkter OEM-Effekt ausgewiesen. Die separate Berechnung stellt sicher, dass die lokale Aktivität des Elektrolyseurherstellers nicht zugleich, als Bestandteil des Zulieferimpulses berücksichtigt wird. Direkte OEM- und vorgelagerte Lieferketteneffekte überschneiden sich daher nicht. Der Gesamteffekt ergibt sich somit aus der Summe des direkten OEM-Effekts und des vorgelagerten Lieferketteneffekts.

Überführung der Outputwirkungen in Wertschöpfung

Die über das Input-Output-Modell berechneten Outputwirkungen werden mithilfe sektorspezifischer Koeffizienten in Bruttowertschöpfung (BWS) übersetzt. Für einen beliebigen Outputvektor (y) gilt:

$$BWS = v^T y$$

Dabei enthält (v) die Bruttowertschöpfungskoeffizienten der Region-Sektor-Kombinationen. Diese geben an, wie viel Bruttowertschöpfung je Einheit Output entsteht. Der Koeffizient wird jeweils auf den relevanten Outputvektor angewendet:

- beim direkten OEM-Effekt auf den aus der lokalen OEM-Wertschöpfung abgeleiteten Produktionswert;
- bei den vorgelagerten Lieferketteneffekten auf den über (Lf) berechneten Outputvektor.

Der Output oder Produktionswert selbst stellt dabei eine rechnerische Zwischengröße dar. Als zentrale wirtschaftliche Ergebnisse werden die Bruttowertschöpfungs- und die im später im Kapitel beschriebenen Beschäftigungseffekte ausgewiesen.

OEM-Multiplikator

Ergänzend wird für einzelne Ergebnisgrößen das Verhältnis zwischen dem vorgelagerten Lieferketteneffekt und dem direkten OEM-Effekt berechnet:

$$m = \frac{\text{vorgelagerter Lieferketteneffekt}}{\text{direkter OEM-Effekt}}$$

Die Kennzahl zeigt, wie hoch die zusätzlich entlang der vorgelagerten Lieferkette entstehenden Effekte im Verhältnis zur unmittelbaren Aktivität der Elektrolyseurhersteller ausfallen. Ein Wert von $m=0,8$ bedeutet beispielsweise, dass je Einheit direkter OEM-Wertschöpfung weitere 0,8 Einheiten Wertschöpfung in der vorgelagerten Lieferkette entstehen. Jeder Multiplikator ist für dasselbe Szenario, dasselbe Jahr und, sofern zutreffend, dieselbe Technologie berechnet.

Ableitung sektoraler Beschäftigungseffekte

Die Beschäftigungseffekte werden aus den sektoral und regional differenzierten Outputwirkungen abgeleitet. Hierzu wird die Input-Output-Tabelle mit einem Beschäftigungssatelliten verknüpft, der für

jede Kombination aus Region und Wirtschaftszweig die Zahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten ausweist.

Für jede Region-Sektor-Kombination wird ein Beschäftigungskoeffizient berechnet. Dieser gibt an, wie viele sozialversicherungspflichtig Beschäftigte mit einer Million Euro Produktionswert verbunden sind:

$$e_{r,s,t} = \frac{E_{r,s}^{2024}}{x_{r,s,t}}$$

Dabei bezeichnet $E_{r,s}^{2024}$ die beobachtete Zahl der Beschäftigten im Jahresdurchschnitt 2024 in der Region (r) und dem Wirtschaftszweig (s). Der Wert $x_{r,s,t}$ entspricht dem im Input-Output-Modell ausgewiesenen Produktionswert dieser Region-Sektor-Kombination im jeweiligen Modelljahr (t). Die Koeffizienten bilden damit die durchschnittliche Beschäftigungsintensität der einzelnen Wirtschaftszweige ab. Da der Beschäftigungsbestand im Zähler konstant gehalten wird, verändert sich der Beschäftigungskoeffizient über die Modelljahre mit dem jahresspezifischen Produktionswert im Nenner. Seine zeitliche Entwicklung bildet damit einen impliziten Produktivitätspfad ab; sie ist keine eigenständige Beschäftigungsprognose.

Die sektoralen Beschäftigungseffekte ergeben sich durch Multiplikation der Beschäftigungskoeffizienten mit den jeweiligen sektorspezifischen Produktionswerten. Für die vorgelagerten Lieferketteneffekte wird der über (Lf) ermittelte Produktionswert verwendet. Die direkte Beschäftigung beim Elektrolyseurhersteller wird entsprechend aus dem zuvor abgeleiteten direkten OEM-Produktionswert berechnet. Da die direkte OEM-Aktivität nicht Bestandteil des Zulieferrückfragevektors ist, können beide Beschäftigungskomponenten anschließend ohne Doppelzählung zum gesamten Beschäftigungseffekt addiert werden.

Die Berechnung erfolgt zunächst für jede Region-Sektor-Kombination getrennt. Dadurch bleibt sichtbar, in welchen Wirtschaftszweigen und Regionen die Beschäftigungseffekte entstehen. Für die Ergebnisdarstellung können die Werte anschließend nach Ost- und Westdeutschland, Wirtschaftszweigen, Elektrolysetechnologien, Szenarien und Modelljahren aggregiert werden. Mithilfe der im nächsten Abschnitt beschriebenen Beschäftigungsstrukturen lassen sich die sektoralen Effekte zusätzlich auf Berufsgruppen und Anforderungsniveaus verteilen.

Berechnung der Beschäftigungsstruktur

Die arbeitsmarktbezogene Datengrundlage der Beschäftigungsstruktur bildet eine Sonderauswertung der Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit. Die Auswertung weist die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Ostdeutschland nach dem Arbeitsortprinzip für den Jahresdurchschnitt 2024 aus. Die Sonderauswertung wurde am 9. April 2026 durch den Zentralen Statistik-Service der Bundesagentur für Arbeit erstellt.

Die Beschäftigtenzahlen liegen als Kreuztabelle aus Wirtschaftsabteilungen und ausgeübten Tätigkeiten vor. Die wirtschaftliche Zuordnung erfolgt nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 auf Ebene der WZ-2-Steller. Die ausgeübten Tätigkeiten werden nach der Klassifikation der Berufe 2010 [29] auf Ebene der KldB-3-Steller beziehungsweise Berufsgruppen differenziert. Für jede Kombination aus Wirtschaftsabteilung und Berufsgruppe werden neben der Gesamtzahl der Beschäftigten auch die vier Anforderungsniveaus Helfer, Fachkraft, Spezialist und Experte

ausgewiesen. Damit lässt sich für jeden Wirtschaftszweig bestimmen, welche Berufsgruppen und Tätigkeitsniveaus die jeweilige Beschäftigungsstruktur in Ostdeutschland prägen.

Die berufliche Zuordnung bezieht sich auf die aktuell im Betrieb ausgeübte Tätigkeit und nicht auf den erlernten Beruf oder den formalen Bildungsabschluss der Beschäftigten. Auch das Anforderungsniveau beschreibt die Komplexität der ausgeübten Tätigkeit und ist daher nicht unmittelbar mit dem individuellen Qualifikationsabschluss gleichzusetzen.

Die Daten umfassen ausschließlich sozialversicherungspflichtige Beschäftigungsverhältnisse. Andere Erwerbsformen, insbesondere Selbstständige, Beamtinnen und Beamte sowie ausschließlich geringfügig Beschäftigte, sind nicht enthalten. Die abgeleiteten Berufs- und Anforderungsstrukturen bilden damit nicht die Gesamtheit aller Erwerbstätigen ab. Abweichungen von der gesamtwirtschaftlichen Beschäftigungsstruktur können insbesondere in Wirtschaftszweigen und Berufsgruppen auftreten, in denen nicht sozialversicherungspflichtige Erwerbsformen eine größere Bedeutung haben.

Aus Gründen der statistischen Geheimhaltung werden Fallzahlen von eins oder zwei sowie Werte, aus denen sich entsprechende Fallzahlen ableiten lassen, anonymisiert. Dies gilt auch bei einer sehr geringen Zahl von Betrieben oder bei einer starken Konzentration der Beschäftigung auf einzelne Betriebe. Darüber hinaus kennzeichnet die Bundesagentur für Arbeit beruflich tief gegliederte Ergebnisse mit weniger als 100 Fällen als nur eingeschränkt aussagekräftig. Die Geheimhaltungsregeln können daher insbesondere bei seltenen Kombinationen aus Wirtschaftszweig, Berufsgruppe und Anforderungsniveau die Vollständigkeit und Belastbarkeit der Daten einschränken. Für stärker besetzte Wirtschafts- und Berufsgruppen ist dagegen von einer deutlich geringeren Beeinträchtigung auszugehen.

Die sektoralen Berufs- und Anforderungsstrukturen bilden die Grundlage, um die im Input-Output-Modell ermittelten Beschäftigungseffekte der Elektrolyseurproduktion den voraussichtlich nachgefragten Berufsgruppen und Anforderungsniveaus zuzuordnen. Für jede Wirtschaftsabteilung werden die Anteile der Berufsgruppen und Anforderungsniveaus an der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigung berechnet. Diese sektoralen Beschäftigungsstrukturen werden anschließend auf die im Input-Output-Modell ermittelten Beschäftigungseffekte des jeweils zugeordneten Wirtschaftszweigs übertragen. Die Summe der zugeordneten Berufs- und Anforderungsniveaueffekte entspricht dabei dem zuvor ermittelten sektoralen Beschäftigungseffekt.

Annahmen und Einschränkungen

Die Ergebnisse der multiregionalen Input-Output-Modellierung sind als szenarienbasierte Abschätzung möglicher Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte zu verstehen. Das Modell zeigt, welche wirtschaftlichen Wirkungen unter den jeweils angenommenen Produktions-, Beschaffungs- und Lieferstrukturen entstehen können. Es eignet sich damit insbesondere zur Einordnung von Größenordnungen sowie zum Vergleich von Szenarien, Technologien und regionalen Beschaffungsvarianten. Einzelne langfristige Punktwerte sollten dagegen stets im Zusammenhang mit den zugrunde liegenden Annahmen interpretiert werden.

Wie bei Input-Output-Modellen üblich, werden konstante technische Koeffizienten und eine proportionale Reaktion der Produktion auf zusätzliche Nachfrage unterstellt. Kapazitätsengpässe, Preisreaktionen, Substitutionseffekte oder technologische Veränderungen der Produktionsverfahren werden nicht endogen abgebildet. Die Ergebnisse beschreiben daher das wirtschaftliche Potenzial

unter der Voraussetzung, dass die benötigten Produktionskapazitäten, Vorleistungen und Arbeitskräfte grundsätzlich verfügbar sind. Die lineare Modellierung ermöglicht zugleich, die Auswirkungen unterschiedlicher Produktions- und Beschaffungsannahmen konsistent und transparent miteinander zu vergleichen.

Das Modell berücksichtigt die unmittelbaren Zulieferleistungen sowie alle weiteren vorgelagerten Produktionsrunden. Zusätzliche Konsumeffekte, die aus den entstehenden Einkommen resultieren könnten, werden nicht einbezogen. Die ausgewiesenen Effekte sind damit gegenüber einer Modellierung einschließlich induzierter Effekte eher zurückhaltend. Gleichzeitig werden zusätzliche Annahmen zu Konsum-, Spar- und regionalen Ausgabenstrukturen vermieden.

Die regionale Ausgangsstruktur basiert auf FIGARO-REG, das eine hohe räumliche Auflösung bietet, jedoch nur zehn aggregierte Wirtschaftsbereiche unterscheidet. Die für die Analyse der Elektrolyseurproduktion erforderliche Aufteilung auf 64 Wirtschaftszweige wird daher mithilfe der nationalen FIGARO-Tabellen geschätzt. Regionale Spezialisierungen innerhalb der breiten Wirtschaftsbereiche können dadurch nur teilweise abgebildet werden. Die Verbindung beider Datenquellen stellt jedoch den bestmöglichen Ansatz auf Grundlage der öffentlich verfügbaren amtlichen Daten dar: FIGARO-REG liefert die räumlichen Verflechtungen, während die nationalen FIGARO-Tabellen die erforderliche sektorale Tiefe und die Konsistenz mit den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen sicherstellen.

Für die Jahre nach 2023 wird die Wirtschaftsstruktur des Jahres 2023 mithilfe länderspezifischer BIP-Wachstumsfaktoren fortgeschrieben. Eigenständige Veränderungen der sektoralen Vorleistungsstruktur, der Handelsbeziehungen oder der wirtschaftlichen Verteilung zwischen Ost- und Westdeutschland werden nicht separat prognostiziert. Die langfristigen Ergebnisse sind daher als konsistente Projektion unter weitgehend stabilen Produktions- und Lieferstrukturen zu verstehen. Dieses Vorgehen vermeidet zusätzliche Strukturannahmen, für die auf der erforderlichen regionalen und sektoralen Ebene keine hinreichend belastbare Datengrundlage vorliegt. Die monetären Ergebnisse werden in konstanten Preisen von 2023 ausgewiesen.

Die Beschäftigungseffekte werden aus durchschnittlichen sektoralen Beschäftigungskoeffizienten abgeleitet und beziehen sich auf sozialversicherungspflichtig Beschäftigte am Arbeitsort. Selbstständige, Beamtinnen und Beamte sowie ausschließlich geringfügig Beschäftigte sind nicht enthalten; ausgewiesen werden Personen und keine Vollzeitäquivalente. Für die berufliche und qualifikatorische Differenzierung wird die aktuell beobachtete Beschäftigungsstruktur der Wirtschaftszweige auf die Szenarioergebnisse übertragen. Veränderungen durch Automatisierung, neue Berufsbilder oder veränderte Qualifikationsanforderungen werden damit nicht eigenständig prognostiziert. Die Ergebnisse ermöglichen dennoch eine fundierte Einordnung, in welchen Wirtschaftszweigen, Berufsgruppen und Anforderungsniveaus zusätzliche Beschäftigungsnachfrage besonders relevant werden kann.

Ergänzende Auswertungen der Input-Output Modellierung

Effekt Basisszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	100	390	560	640	900
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	70	270	390	430	620
• aktuelle Zulieferstruktur	50	210	310	350	500
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	40	160	230	260	370
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	150	600	870	990	1.400

Tabelle 13: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Effekt Niedriges Marktszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	100	80	230	210	310
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	70	50	160	140	210
• aktuelle Zulieferstruktur	50	40	120	110	170
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	40	30	90	90	130
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	150	120	350	320	480

Tabelle 14: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im unteren Marktszenario (Niedrig), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Effekt Hohes Marktszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	100	700	920	1.090	1.430
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	70	490	630	750	980
• aktuelle Zulieferstruktur	50	390	510	600	780
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	40	290	380	450	590
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	150	1.090	1.430	1.690	2.210

Tabelle 15: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im oberen Marktszenario (Hoch), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Effekt Basisszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	1.080	4.150	5.800	6.130	8.080
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	740	2.880	4.020	4.250	5.610
• aktuelle Zulieferstruktur	590	2.300	3.220	3.400	4.490
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	440	1.730	2.410	2.550	3.370
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	1.670	6.450	9.020	9.530	12.570

Tabelle 16: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Effekt Niedriges Marktszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	1.080	820	2.330	2.000	2.760
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	740	570	1.610	1.390	1.910
• aktuelle Zulieferstruktur	590	460	1.290	1.110	1.530
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	440	340	970	830	1.150
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	1.670	1.280	3.620	3.110	4.290

Tabelle 17: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im unteren Marktszenario (Niedrig), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Effekt Hohes Marktszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Direkter OEM-Effekt	1.080	7.570	9.460	10.470	12.860
Indirekter Effekt:					
• erhöhter regionaler Zulieferanteil (+25 %)	740	5.260	6.560	7.260	8.930
• aktuelle Zulieferstruktur	590	4.210	5.250	5.810	7.150
• verringerter regionaler Zulieferanteil (-25 %)	440	3.160	3.940	4.360	5.360
Gesamteffekt bei aktueller Zulieferstruktur	1.670	11.780	14.710	16.280	20.010

Tabelle 18: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland im oberen Marktszenario (Hoch), Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Der indirekte Effekt ist zusätzlich nach dem regionalen Zulieferanteil ($\pm 25\%$) aufgeschlüsselt. Die Werte für 2025 beziehen sich auf das Basis-Marktszenario und sind daher in allen Szenarien identisch. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

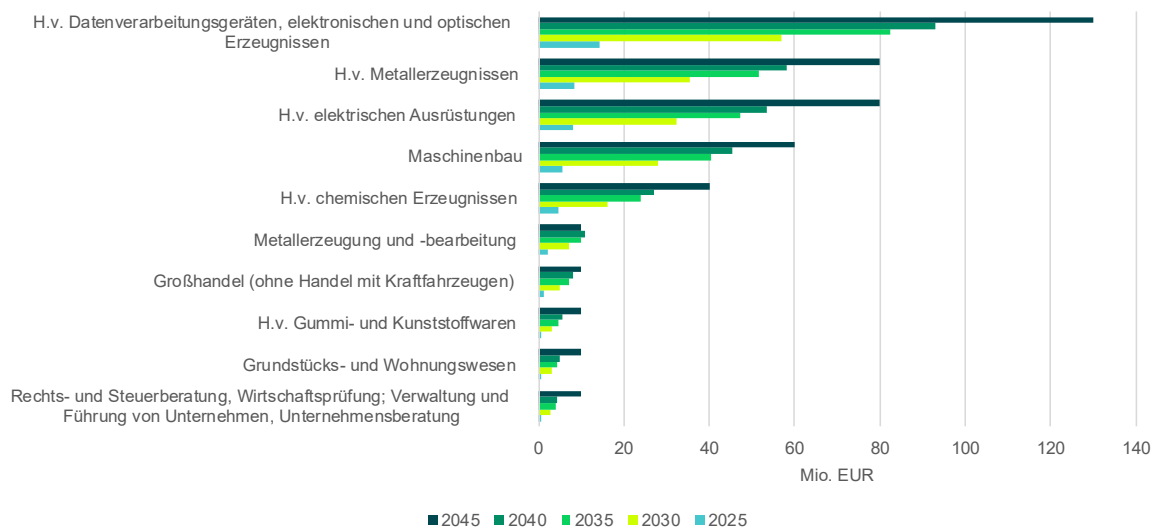


Abbildung 31: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im Basisszenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023), absteigend nach der Bedeutung der Branchen geordnet. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

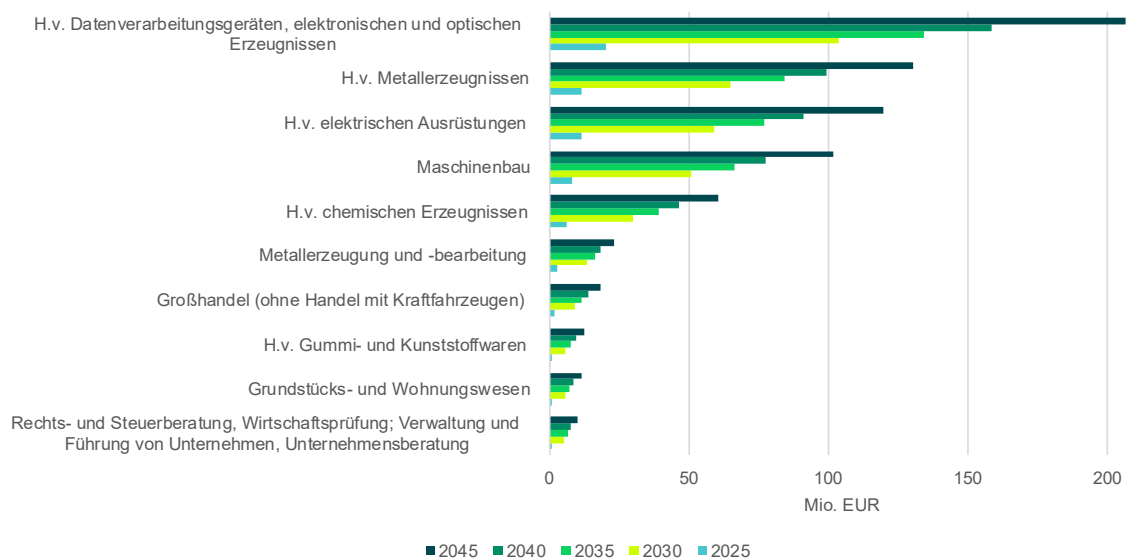


Abbildung 32: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im erhöhten Szenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023), absteigend nach der Bedeutung der Branche geordnet. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

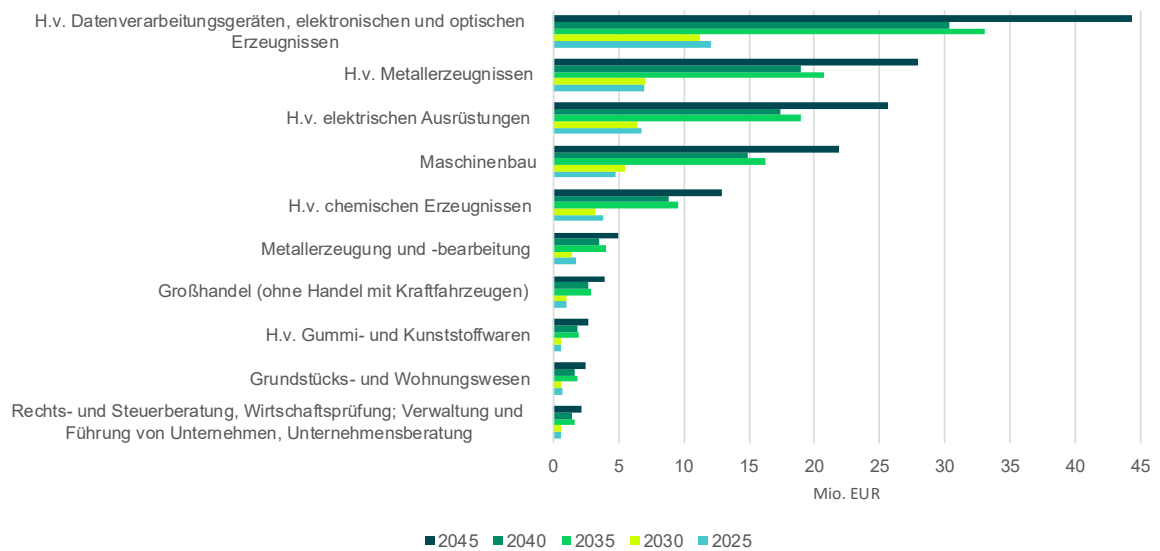


Abbildung 33: Indirekte Bruttowertschöpfung in Ostdeutschland nach Wirtschaftsbereichen im niedrigen Szenario für die Stützjahre 2025 bis 2045 (in Mio. EUR, Preise von 2023), absteigend nach der Bedeutung der Branchen geordnet. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Anforderungsniveau im Basisszenario	2025	2030	2035	2040	2045
Helfer	200	790	1.100	1.170	1.540
Fachkraft	950	3.690	5.160	5.460	7.210
Spezialist	270	1.050	1.470	1.550	2.040
Experte	240	920	1.280	1.350	1.770

Tabelle 19: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach Anforderungsniveau im Basisszenario, Referenzjahr 2025 bis Zieljahr 2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Dargestellt ist der gesamte Beschäftigungseffekt (direkt und indirekt) bei aktueller Zulieferstruktur, aufgeteilt nach den vier Anforderungsniveaus Helfer, Fachkraft, Spezialist und Experte. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Berufsgruppen	2025	2030	2035	2040	2045
Technische Forschung und Entwicklung	40	160	220	230	290
Energietechnik	50	200	270	290	370
Chemie	60	210	300	320	420
Einkauf und Vertrieb	70	250	350	370	480
Büro und Sekretariat	70	250	350	370	480
Lagerwirt., Post, Zustellung, Güterumschlag	80	290	400	430	560
Unternehmensorganisation und -strategie	90	320	450	480	620
Metallbau und Schweißtechnik	110	440	600	630	830
Technische Produktionsplanung, -steuerung	130	470	650	690	910
Elektrotechnik	150	560	770	810	1.050
Metallbearbeitung	160	670	930	980	1.280
Maschinenbau- und Betriebstechnik	200	770	1.080	1.140	1.500

Tabelle 20: Beschäftigungseffekt der Elektrolyseurproduktion in Ostdeutschland nach zentralen Berufsgruppen im Basisszenario, 2025–2045 (in sozialversicherungspflichtig beschäftigten Personen). Ausgewiesen ist der gesamte Beschäftigungseffekt (direkt und indirekt) bei aktueller Zulieferstruktur für die zwölf bedeutendsten Berufsgruppen, aufsteigend nach der Höhe des Effekts geordnet. Die ausgewiesenen Werte sind auf volle Zehner gerundet, rundungsbedingt kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen. Quelle: WifOR Institute – eigene Berechnungen.

Ergänzend zu den modellierten Beschäftigungseffekten wurde untersucht, in welchen besonders beschäftigungsrelevanten Berufsgruppen bereits heute Fachkräfteengpässe bestehen. Hierfür wurden die zehn Berufsgruppen mit den größten absoluten Beschäftigungseffekten mit der Engpassanalyse der Bundesagentur für Arbeit abgeglichen. Die BA bewertet die Arbeitsmarktsituation differenziert nach Anforderungsniveau anhand mehrerer Indikatoren. Da keine Gesamtwerte für Ostdeutschland ausgewiesen werden, wird jeweils der Durchschnitt der verfügbaren Werte der ostdeutschen Bundesländer verwendet. Die Ergebnisse bilden die aktuelle Engpasssituation ab und sind nicht als langfristige Fachkräfteprognose zu verstehen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Fachkräftesituation zwischen den Berufsgruppen und Anforderungsniveaus deutlich unterscheidet. Besonders angespannt ist die Lage in der Elektrotechnik sowie in der Metallbau- und Schweißtechnik. Auch in weiteren für die Elektrolyseurproduktion relevanten Berufsgruppen, etwa in der Maschinenbau- und Betriebstechnik oder der technischen Produktionsplanung und -steuerung, gibt es bereits heute Hinweise auf Engpässe. Für den weiteren Hochlauf wird es daher wichtig sein, diese Berufsgruppen gezielt in den Blick zu nehmen und bestehende Qualifikationspotenziale frühzeitig weiterzuentwickeln.

Berufsgruppe	Fachkräfte	Spezialisten	Experten
Maschinenbau- und Betriebstechnik	1,5	1,7	1,6
Metallbearbeitung	1,9	-	-
Elektrotechnik	1,7	2,0	2,2
Technische Produktionsplanung, und -steuerung	-	1,9	1,5
Metallbau und Schweißtechnik	2,1	-	-
Unternehmensorganisation und -strategie	1,8	1,3	1,3
Lagerwirt., Post, Zustellung, Güterumschlag	1,1	-	-
Büro und Sekretariat	0,9	1,1	-
Einkauf und Vertrieb	1,7	1,7	1,3
Chemie	1,3	-	1,8

kleiner 1,5: kein Engpassberuf
 1,5 bis unter 2,0: Berufe unter Beobachtung
 2,0 bis 3,0: Engpassberuf

Tabelle 21: Engpasssituation in den zehn Berufen mit den größten modellierten absoluten Beschäftigungseffekten. Berufe sind absteigend nach der Höhe des modellierten Beschäftigungseffekts sortiert. Dargestellt ist jeweils der durchschnittliche Gesamtwert der Engpassindikatoren der ostdeutschen Bundesländer, differenziert nach Anforderungsniveau. Ein Strich („-“) kennzeichnet, dass keine Engpassdaten ausgewiesen sind. Die Top-10-Berufsgruppen wurden anhand ihrer gesamten modellierten Beschäftigungseffekte ausgewählt, ohne zwischen den Anforderungsniveaus zu unterscheiden. Quelle: WifOR – eigene Darstellung.

Resilienz industrieller Wertschöpfungsketten

Kritische Rohstoffe & Vorprodukte	Technologie	Importkonzentration des globalen Angebots	Risiko
Iridium	PEMEL	Südafrika ~82 %, Russland ~9 %	Sehr hoch
Platin	PEMEL	Südafrika ~72 %, Russland ~12 %	Hoch
Titan (Platten, PTL)	PEMEL	China ~57 %, Russland ~23 %	Mittel
Nickel	AEL, AEMEL	Indonesien ~48 %, Philippinen ~10 %, (Raffination: China ~65 %)	Mittel
Kobalt	AEL, AEMEL	DR Kongo ~71 % (Raffination: China ~65 %)	Hoch
Zirkonium (Diaphragma)	AEL	Australien ~40 %, Südafrika ~25 %, Mosambik ~16 %	Mittel
Seltene Erden (Yttrium, Lanthan, Scandium)	SOEL	China ~60 % Förderung, ~85 % Raffination & Verarbeitung	Sehr hoch
PFAS-Membranen (Ionomere, z. B. Nafion)	PEMEL	Mögliches PFAS-Verbot auf EU-Ebene	Hoch
Gleichrichter (Leistungshalbleiter)	ALLE	China ~40 %, Taiwan ~30 % Fertigungskapazität global stark ausgelastet	Mittel– Hoch
Transformatoren (Kupfer, Elektrobleche)	ALLE	Fertigungskapazität global stark ausgelastet	Hoch

Tabelle 22: Übersicht der kritischen Rohstoffe, Importabhängigkeiten und Risikoeinstufung für Wertschöpfungsketten. Hinweis: Importkonzentrationsangaben beziehen sich auf Förderung bzw. primäre Verarbeitungsstufen; Raffinationskonzentrationen (insbesondere China) können davon abweichen. Quelle: Fraunhofer ISE – Daten auf Basis einer Literaturanalyse [30–35].

Über die IWO

Die Initiative Wasserstoff Ostdeutschland e.V. (IWO) hat als gemeinsame Plattform der sechs Bundesländer im Osten Deutschlands die Mission Chancen und Potentiale der sich entwickelnden Wasserstoffwirtschaft zu erschließen und Ostdeutschland als Schlüsselregion für die Wasserstoffwirtschaft zu etablieren.

Heute tragen die ostdeutschen Länder als ordentliche Mitglieder gemeinsam den Verein, während der Bund als Netzwerkmitglied eingebunden ist. Die Vorstandsbesetzung folgt einem Rotationsprinzip, das sich am jährlich wechselnden Vorsitz der Ministerpräsidentenkonferenz orientiert und so die gemeinsame Verantwortung ausgewogen verteilt.

Disclaimer

Diese Studie wurde vom WifOR Institute und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE im Auftrag der Initiative für Wasserstoff in Ostdeutschland (IWO) e.V. erstellt. Weder WifOR Institute, das Fraunhofer ISE, die IWO noch in ihrem Namen handelnde Dritte übernehmen Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der in diesem Bericht enthaltenen Informationen. Eine Haftung für Nutzung, Folgen der Nutzung oder Verbreitung von Informationen, Ergebnissen oder Schlussfolgerungen aus diesem Bericht, sowie für jegliche weitere Nutzung oder darauf basierende Entscheidungen Dritter, ist ausgeschlossen. Solche Handlungen erfolgen stets auf eigenes Risiko.

Für die Recherche sowie sprachliche und redaktionelle Überarbeitung wurden unterstützend Large Language Models (LLMs) eingesetzt. Es wurden keine vertraulichen, personenbezogenen oder schutzbedürftigen Daten an solche Systeme übermittelt. Die fachliche Verantwortung für den Inhalt sowie die endgültige Prüfung und Genehmigung des Berichts verbleiben ausschließlich bei den Autor/-innen sowie den beauftragenden Institutionen.