

BERICHT ÜBER INGENIEUR- UND BERATUNGSLEISTUNGEN

Inhalt

STANDORTSTUDIE WIND-WASSERSTOFF REGION UNTERELBE - STRUKTUREN UND POTENZIALE

Auftraggeber

AGENTUR FÜR WIRTSCHAFTSFÖRDERUNG LANDKREIS CUXHAVEN, AGENTUR FÜR WIRTSCHAFTSFÖRDERUNG STADT CUXHAVEN, ENTWICKLUNGSGESELLSCHAFT WESTHOLSTEIN MBH, HANDELSKAMMER HAMBURG, IHK FLENSBURG, PROJEKTENTWICKLUNG STADE GMBH & CO. KG, SÜDERELBE AG, WIRTSCHAFTSFÖRDERUNG LANDKREIS STADE GMBH

Auftragnehmerin

IPP ESN POWER ENGINEERING GMBH

Rendsburger Landstraße 196-198
24113 Kiel

in Zusammenarbeit mit

HYPION GMBH

Hamburger Hof 3
25756 Heide

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK UND
ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG - IFAM

Wiener Straße 12
28359 Bremen

Ihr Ansprechpartner*innen:

JÜRGEN MEEREIS
E-Mail j.meereis@ipp-esn.de
Tel. +49 431 64959-844

ANNE NIETERS
E-Mail anne.nieters@ifam.fraunhofer.de
Tel. +49 421 2246-7010

Kiel / Heide / Bremen, den 30. November 2021 (Informationsstand: 27. August 2021)

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Vorgehensweise..... | 2 |
| 3 | Definition von Wasserstoffwelten 2022, 2027 und 2032..... | 3 |
| 3.1 | Methodik..... | 3 |
| 3.2 | Ergebnisse..... | 7 |
| 3.3 | Szenarien..... | 9 |
| 4 | Regionalwirtschaftliche Effekte..... | 11 |
| 4.1 | Methodik..... | 11 |
| 4.1.1 | Analyse der Wertschöpfungseffekte..... | 11 |
| 4.1.2 | Analyse der Beschäftigungseffekte..... | 13 |
| 4.1.3 | Annahmen..... | 13 |
| 4.2 | Ergebnisse..... | 14 |
| 4.2.1 | Basisszenario..... | 14 |
| 4.2.2 | Szenario Netzdienlichkeit der Elektrolyseure..... | 21 |
| 4.2.3 | Szenario dezentralere Elektrolyseure..... | 22 |
| 4.2.4 | Szenario Förderung..... | 24 |
| 4.3 | Sensitivitätsanalysen..... | 25 |
| 5 | Zusammenfassung und Empfehlungen..... | 31 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 33 |
| 7 | Abkürzungsverzeichnis..... | 35 |
| 8 | Anhang: Annahmen..... | 36 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Untersuchungsregion..... | 2 |
| Abbildung 2: Wasserstoffnachfrage Region Unterelbe | 4 |
| Abbildung 3: Strombilanz Region Unterelbe | 5 |
| Abbildung 4: Basisszenario 2022..... | 8 |
| Abbildung 5: Basisszenario 2027..... | 8 |
| Abbildung 6: Basisszenario 2032..... | 9 |
| Abbildung 7: Komponenten der regionalen Wertschöpfung..... | 13 |
| Abbildung 8: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, jährlich | 15 |
| Abbildung 9: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert | 15 |
| Abbildung 10: Regionale Beschäftigung (VZÄ), gesamt, Basisszenario, jährlich | 16 |
| Abbildung 11: Zusammensetzung der regionalen direkten Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert bis 2032 | 16 |
| Abbildung 12: Zusammensetzung der regionalen indirekten Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert bis 2032 | 17 |
| Abbildung 13: Regionale Wertschöpfung durch Errichtung und Betrieb Elektrolyseure sowie restliche Aktivitäten (Rest), Basisszenario, kumuliert bis zum jeweiligen Jahr..... | 18 |
| Abbildung 14: Zusammensetzung der regionalen Wertschöpfung, Technologien, Basisszenario, kumuliert bis 2032..... | 19 |
| Abbildung 15: Regionale Beschäftigung, Technologien, Basisszenario, kumuliert..... | 19 |
| Abbildung 16: Regionale Wertschöpfung pro eingesetztem Euro, Technologien, Basisszenario, über die gesamte Betriebszeit | 20 |
| Abbildung 17: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Netzdienlichkeit, kumuliert..... | 21 |
| Abbildung 18: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Szenario der Dezentralen Elektrolyseure | 23 |
| Abbildung 19: Regionale Beschäftigung, gesamt, Basisszenario und Szenario der Dezentralen Elektrolyseure..... | 24 |
| Abbildung 20: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Förderung, kumuliert..... | 25 |
| Abbildung 21: Regionale Wertschöpfung Elektrolyse, gesamt, Basisszenario und Varianten, kumuliert | 26 |
| Abbildung 22: Regionale Beschäftigung, gesamt, Basisszenario und Variante Regionale Elektrolyse-Installateure, kumuliert..... | 26 |
| Abbildung 23: Regionale Wertschöpfung, kumuliert, Basisszenario und Varianten Marge / nicht spezifische Betriebskosten | 27 |
| Abbildung 24: Differenz regionale Wertschöpfung, Basisszenario und Variante „nicht spezifische Betriebskosten“, kumuliert bis zum Jahr 2032 | 28 |
| Abbildung 25: Regionale indirekte Beschäftigung, Basisszenario und Varianten Marge / nicht spezifische Betriebskosten, kumuliert bis zum jeweils angegebenen Jahr..... | 29 |
| Abbildung 26: Differenz regionale indirekte Beschäftigung, Technologien, Basisszenario und Variante „nicht spezifische Betriebskosten“, kumuliert bis zum jeweils angegebenen Jahr..... | 30 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Installierte Leistung Elektrolyseure 2022, 2027, 2032 (Annahmen)..... | 6 |
| Tabelle 2: Übersicht H ₂ -Erzeugung und -Verbrauch sowie Logistik..... | 7 |
| Tabelle 3: Betrachtete Technologien und Aktivitäten..... | 12 |
| Tabelle 4: Annahmen (Auswahl) für das Basisszenario..... | 14 |
| Tabelle 5: Wasserstoffproduktion in Tonnen Wasserstoff (t H ₂) in den Szenarien..... | 21 |
| Tabelle 6: Annahmen bzgl. ausgewählter Kosten und weiterer Größen im Basisszenario..... | 36 |
| Tabelle 7: Annahmen zu Einkommens- und Materialkomponenten sowie Regionalisierungsgrad – Technologie spezifisch, im Basisszenario | 38 |
| Tabelle 8: Annahmen zu Einkommens- und Materialkomponenten sowie Regionalisierungsgrad – allgemein, im Basisszenario..... | 39 |

1 EINLEITUNG

Die zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele unerlässliche Dekarbonisierung der unterschiedlichen Verbrauchssektoren setzt zwingend eine deutliche Steigerung der Erzeugung oder des Imports regenerativer Energien voraus. Wasserstoff spielt dabei eine zentrale Rolle, zum einen, weil er angesichts fluktuierender Erzeugung von Strom aus Windkraftanlagen und Photovoltaik als Speichermedium einsetzbar ist, zum zweiten, weil er als Schlüssel zur Sektorenkopplung fungieren kann und zum dritten, weil er bei einem Import leichter über lange Strecken transportierbar ist als etwa Strom.

In diesem Sinne haben die Wirtschafts- und Verkehrsminister der norddeutschen Küstenländer eine Norddeutsche Wasserstoffstrategie verabschiedet (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, 2019). In dieser wird nicht nur die klimabezogene Bedeutung von Wasserstoff geschildert, sondern Wasserstoff auch als wirtschaftspolitische Chance gesehen: „... so ergeben sich für die Region neue, attraktive wirtschaftliche Chancen, verbunden mit einem Angebot an qualifizierten Arbeitsplätzen. Insbesondere für Regionen in Norddeutschland mit bislang wenig ausgeprägter Industriestruktur ist die Schaffung einer neuen Wertschöpfungskette ein wichtiger wachstums- und strukturpolitischer Anreiz, den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft voranzutreiben. Zudem würde der Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft insbesondere für deutsche Hersteller die Möglichkeit eröffnen, sich beim Thema Wasserstoff / Elektrolyse einen Technologievorsprung zu erarbeiten und industrielle Produktion, z. B. für Anlagentechnik, in Deutschland auszurollen“ (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, 2019, S. 4 f).

Die Nationale Wasserstoffstrategie (BMWi, 2020) wurde nach der Norddeutschen Wasserstoffstrategie verabschiedet. Neben wichtigen inhaltlichen Aspekten wie etwa der Befreiung von grünem Elektrolysestrom von der EEG-Umlage sieht sie vor, „... dass weitere 7 Mrd. Euro für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien in Deutschland und weitere 2 Mrd. Euro für internationale Partnerschaften bereitgestellt werden“ (BMWi, 2020, S. 3). In der Nutzung dieser Fördermittel liegen erhebliche Chancen, Know how und Wertschöpfung zu generieren.

Vor diesem Hintergrund hat sich ein intensiver Wettbewerb vieler Regionen in Deutschland um Fördermittel und um eine führende Position einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft entwickelt. Damit auch die Region Unterelbe eine maßgebliche Rolle in diesem Wettbewerb spielen kann, benötigt sie eine geeignete strategische Positionierung. Dabei wäre es kein sinnvolles Ziel, „irgendwelche“ Wasserstoff-Projekte für die Region zu gewinnen. Vielmehr lohnt sich vor allem die Akquisition solcher Projekte, Infrastrukturen etc., mit deren Realisierung eine möglichst hohe Wertschöpfung für die Region verbunden ist. Informationen über die Wertschöpfung sind also wichtig für die strategische Positionierung einer Region, um basierend darauf zielgerichtete Impulse bei der Wirtschaftsförderung und ggf. auch bei ergänzenden regionalen Fördermitteln, mit denen u. U. auch eine Hebelwirkung durch Akquisition von Fördermitteln des Bundes oder der EU erreicht werden kann, zu setzen.

Dabei soll betont werden, dass der Aufbau der Wasserstoff-Anwendungen, -Erzeugungskapazitäten und -Infrastrukturen alleine schon für die zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele unerlässliche Sektorenkopplung notwendig ist. Die regionale Wertschöpfung ist also nicht der ausschließliche Treiber entsprechender Aktivitäten. Ziel der Region sollte es jedoch sein, aus diesem ohnehin notwendigen Aufbau die größtmöglichen regionale Wertschöpfung zu generieren.

Mit entsprechenden Untersuchungen haben verschiedenste Wirtschaftsförderungsgesellschaften und Kammern der Region Unterelbe eine Arbeitsgemeinschaft aus IPP ESN Power Engineering GmbH („IPP ESN“), dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung („IFAM“) sowie der Hypion GmbH beauftragt.

2 VORGEHENSWEISE

Als Basis für die Beschreibung regionalwirtschaftlicher Effekte haben in der Arbeitsgemeinschaft zunächst IPP ESN und Hypion „Wasserstoffwelten“ definiert, wie sie in der Region Unterelbe in den Jahren 2022, 2027 und 2032 entstanden sein könnten, bestehend aus Erzeugung, Anwendung und der sie verbindenden Infrastruktur (Kapitel 3). Für diese Wasserstoffwelten hat dann das IFAM auf Basis der Additionsmethode und Beschäftigungsintensitäten die Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung ermittelt (Kapitel 4). Im Zuge von verschiedenen Szenarien wurden die Wasserstoffwelten variiert und wiederum die Auswirkungen auf die Wertschöpfung und Beschäftigung berechnet.

Insofern verstehen sich die vorliegenden Untersuchungen, insbesondere die Beschreibung von Wasserstoffwelten, ausdrücklich *nicht als Prognose* dessen, was in den Jahren 2022, 2027 und 2032 zu erwarten ist, sondern vielmehr als Darstellung von *Möglichkeiten*. Ziel ist es, den Auftrag gebenden Institutionen - Wirtschaftsförderungsgesellschaften u. ä. - Handlungshinweise zu geben, bei welchen der in den Beschreibungen enthaltenen Komponenten sich besondere Initiativen zur Ansiedlung und Realisierung lohnen.

Auftragsgemäß wurde in der vorliegenden Studie immer die Gesamtregion betrachtet (siehe Abbildung 1). Die Verortung einzelner Komponenten (Elektrolyseure, Tankstellen etc.) der Wasserstoffwirtschaft erfolgt daher in der Regel nur exemplarisch und ist nicht mit einer inhaltlichen Einschätzung oder Empfehlung verbunden.

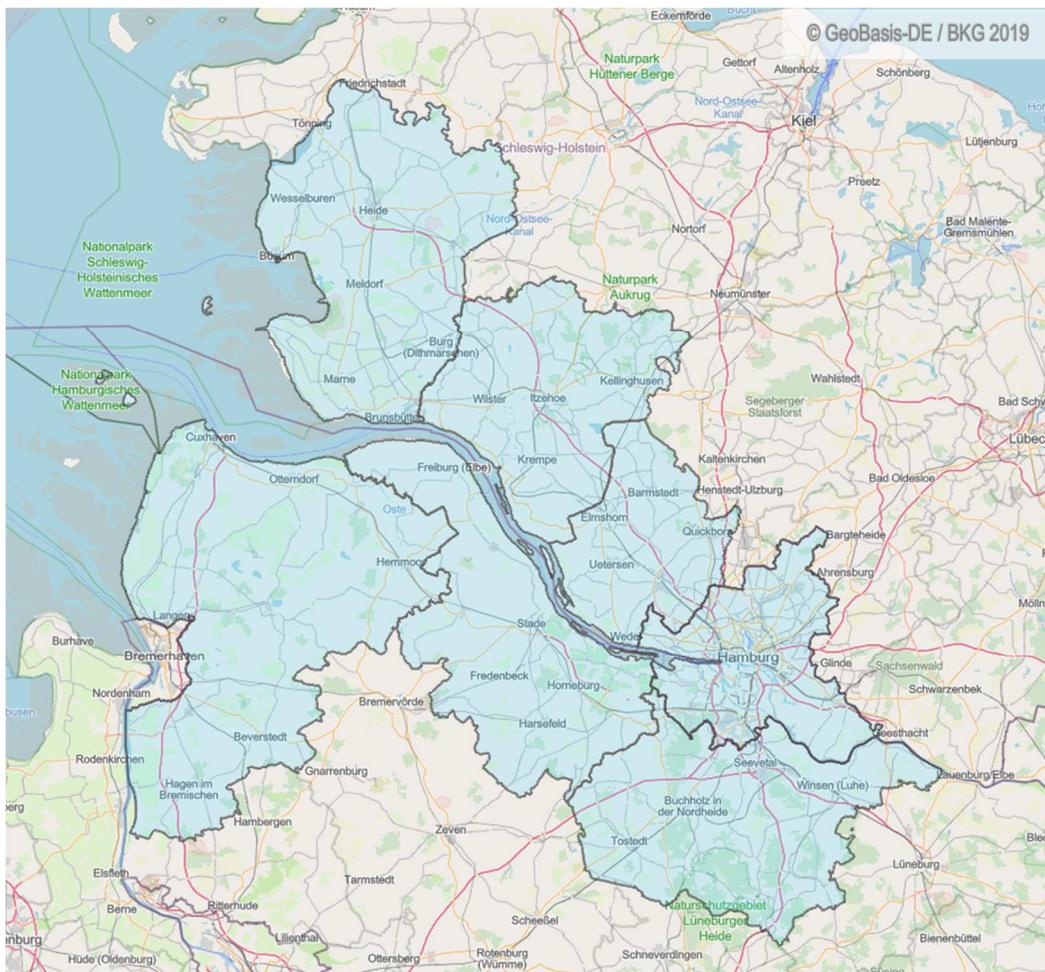


Abbildung 1: Untersuchungsregion

3 DEFINITION VON WASSERSTOFFWELTEN 2022, 2027 UND 2032

3.1 METHODIK

Die regionalwirtschaftlichen Effekte der zu definierenden Szenarien dienen als Entscheidungsgrundlage für Politik, Wirtschaftsförderung etc. der Region hinsichtlich sinnvoller strukturpolitischer Impulse. Es ist wie eingangs beschrieben nicht Ziel der Untersuchungen, eine Prognose der zu erwartenden Entwicklung der Wasserstoff-Wirtschaft abzugeben, wie etwa der Geschwindigkeit des Markthochlaufs oder der Anteile der verschiedenen Verbrauchssektoren. Stattdessen werden die Größenordnungen möglicher Entwicklungen von Dritten übernommen (zum Beispiel ChemCoast, MELUND-Gutachten zu H₂-Erzeugung und Märkten in SH, Landes-Ausbauziele Windkraft etc.). Basierend auf diesen Prognosen Dritter und gegenwärtig verfügbaren Informationen zu Wasserstoffprojekten wird ein Basisszenario erstellt. Die Variation verschiedener Parameter beschreibt weitere unterschiedliche Ausprägungen der Wasserstoffwirtschaft und bildet weitere Szenarien.

Studien wie die ChemCoast-Studie (ChemCoast, 2012) und das MELUND-Gutachten zu H₂-Erzeugung und Märkten in SH (MELUND, 2021) sehen eine Wasserstoffnachfrage kurz bis mittelfristig vor allem im Mobilitätssektor und der Industrie. Hierbei ist es für die Region Unterelbe entscheidend zu differenzieren, inwiefern sowohl die Herstellung, die Anwendung als auch die Produktion von Komponenten in der Region erfolgt.

Die Wasserstoffnachfrage der Industrie in der Region Unterelbe beruht maßgeblich auf den in der ChemCoast Studie ermittelten Mengen (ChemCoast, 2012). Die ChemCoast-Studie wurde bereits 2012 erstellt, nach Aussage der Auftraggeber der Studie hat sich die damals prognostizierte Nachfrage für 2020 aus heutiger Sicht jedoch als zutreffend bestätigt. Die ausgewiesenen Mengen wurden daher unter Berücksichtigung einer Trendfortschreibung für die Jahre 2022 und 2027 übernommen (in der ChemCoast Studie wurden lediglich die Stützjahre 2020 und 2025 betrachtet). Für das Jahr 2032 wurden entsprechend weitere Daten herangezogen. Das Gutachten H₂-Erzeugung und Märkte Schleswig-Holstein beschreibt ebenfalls mögliche Wasserstoffnachfragen in der Industrie in Szenarien (MELUND, 2021). Die Studie bezieht sich nicht wie die ChemCoast-Studie auf die Region Unterelbe, sondern auf Schleswig-Holstein und Hamburg. Die Daten müssen entsprechend angepasst werden. Da die wesentlichen industriellen Wasserstoff-Verbraucher in Schleswig-Holstein in der hier betrachteten Region ansässig sind und Hamburg mitberücksichtigt ist, müssen die Zahlen nur um die der Landkreise Stade, Cuxhaven und Harburg erweitert werden. Mit dieser Methodik wird nachfolgend auch der Anteil an der Nachfrage nach explizit grünem Wasserstoff in der Region Unterelbe in den Stützjahren bestimmt; diese werden ebenfalls aus dem MELUND-Gutachten entnommen.

Neben der Industrie ist der Verkehr das zweite wesentliche Anwendungsfeld für grünen Wasserstoff. Zur Bestimmung der Mengen in den Jahren 2022, 2027 und 2032 wurde wiederum das Gutachten H₂-Erzeugung und Märkte Schleswig-Holstein herangezogen. Die Daten sind auf die relevanten Kreise Dithmarschen, Pinneberg, Steinburg, die Landkreise Stade Cuxhaven und Harburg sowie die Freie- und Hansestadt Hamburg über einen Einwohnerschlüssel skaliert. Es ergibt sich ein Gesamt-Nachfragebild in der Region Unterelbe gemäß Abbildung 2.

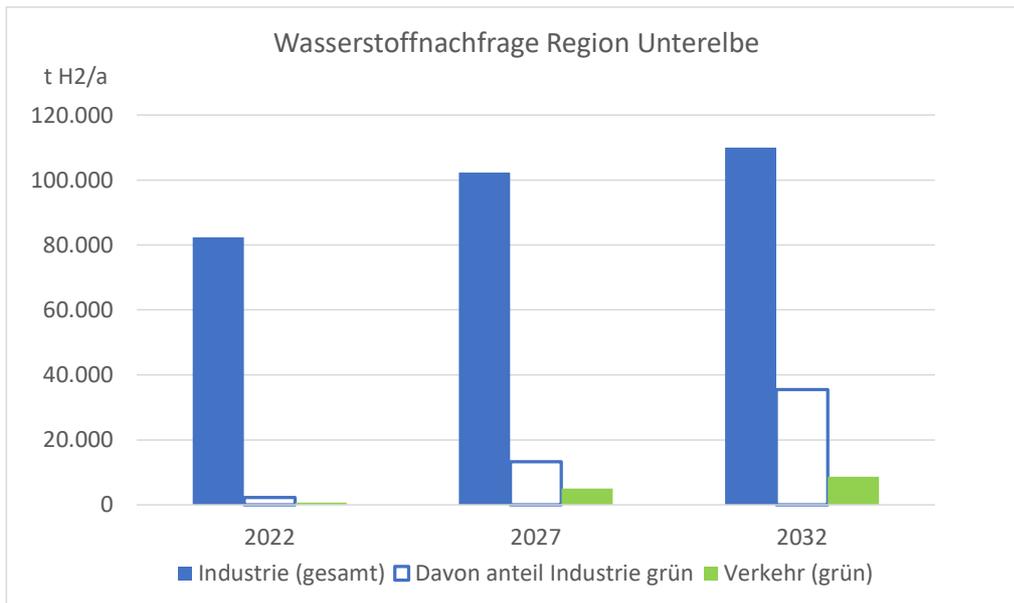


Abbildung 2: Wasserstoffnachfrage Region Unterelbe

Es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob in der Region ausreichend grüner Strom zur Deckung der prognostizierten Wasserstoffnachfrage zur Verfügung stehen wird. Dazu werden die Erzeugungsdaten aus Erneuerbaren Energien (inklusive Offshore) den Verbrauchsdaten aus dem Jahr 2019 gegenübergestellt. Strom-Im- und -Exporte aus der Region werden hierbei nicht berücksichtigt, d. h. es wird zunächst ein Vorrang der regionalen Wertschöpfung, die auf der Stromproduktion basiert, gegenüber Stromexporten unterstellt. Die Daten werden kleinteilig für die einzelnen Kreise erhoben und aggregiert.

Kreise Dithmarschen, Pinneberg und Steinburg: Die Bruttostromerzeugung Schleswig-Holsteins 2019 (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2020) wird auf die drei Kreise skaliert. Die Strommenge aus Windenergie Onshore ergibt sich anteilig über die installierte Windkraftanlagenleistung in den Kreisen im Vergleich zum gesamten Land Schleswig-Holstein. Die Zugehörigkeit der Strommenge aus Windenergie Offshore ergibt sich über den Ort der Stromanlandung. Übrige EE-Stromerzeugungsmengen (PV, Biogas, Abfälle etc.) werden über den Einwohneranteil skaliert.

Freie und Hansestadt Hamburg: Die Bruttostromerzeugung Hamburg 2019 wird direkt übernommen (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2020).

Landkreise Cuxhaven, Harburg und Stade: Direktes Auslesen der Landkreisdaten aus dem Energiewendebericht 2019 (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, 2020).

Somit lässt sich ein heutiges Erzeugungsprofil für die Region Unterelbe darstellen. Für den festgelegten Betrachtungsrahmen ist das Erzeugungsprofil bis in das Jahr 2032 fortzuschreiben. Hierfür wurden wiederum drei Ansätze gewählt. Die Stromerzeugung Wind Onshore wird anhand der Länder-Ausbauziele in Relation der bereits installierten Windkraftleistung im Untersuchungsgebiet hochskaliert. (STK Niedersachsen, 2020; EEK.SH, 2021)¹ Die Stromerzeugung Wind Offshore wird als konstant angenommen. Im Branchenportal Offshore-Windindustrie heißt es dazu: „Aktuell (11.01.2021) befindet sich in Deutschland kein Offshore-Windpark mehr im Bau. [...] Mangels fehlender Offshore-Projekte sind mittelfristig keine nennenswerten Installationszahlen in Deutschland zu erwarten“ (Branchenportal Offshore-

¹ Für Hamburg wurde eine leichte Steigerung des Ausbaupotentials durch z. B. Repowering angenommen. Das Flächenpotential für Neuanlagen ist aufgrund der dichten Besiedlungsstruktur stark begrenzt.

Windindustrie, 2021). Übrige EE-Stromerzeugungsmengen (PV, Biogas, Abfälle etc.) werden mit Daten aus einer Studie von Fraunhofer ISI abgeschätzt (Fraunhofer ISI, 2020). Die Studie weist in verschiedenen Klimaschutz- und Energiewendeszenarien erwartbare Stromerzeugungsmengen durch PV, Biogas, Abfälle etc. für den Zeitraum 2030 bis 2050 je Einwohner aus (EE-Stromeinspeisung pro Kopf in MWh/Einwohner). Über die Einwohneranzahl der Gebiete kann auf diese Weise eine Abschätzung der Erzeugungsmengen erfolgen.

Die Verbrauchsdaten beziehen sich auf Angaben aus dem Statistischen Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2020), dem Energieportal Hamburg (Stromnetz Hamburg, o. J.) und dem Energiewendebericht Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, 2020). Es wird ein konstanter Stromverbrauch bis 2030 angenommen (IWR Online, 2020). Es ergibt sich die Strombilanz gemäß Abbildung 3.

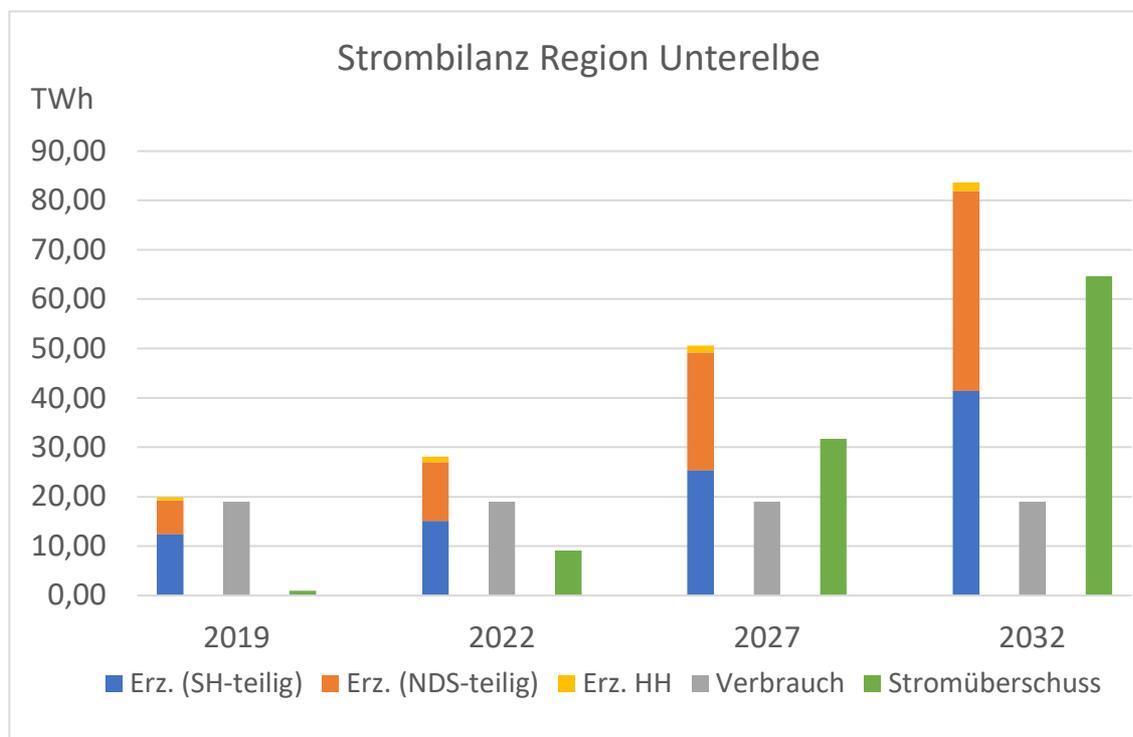


Abbildung 3: Strombilanz Region Unterelbe

Im Vergleich zeigt sich bilanziell ein deutlicher Stromüberschuss in den verschiedenen Stützjahren, der zur Erzeugung grünen Wasserstoffs in der Region zur Verfügung stehen kann. Es ist jedoch nicht anzunehmen, dass der gesamte Überschuss auch entsprechend über Elektrolyse in Wasserstoff umgesetzt wird. Die Mengen nach Abbildung 3 entsprechen einer Elektrolyseursleistung von 5 GW (2027)² und knapp 10 GW (2032). Gemäß der Norddeutschen Wasserstoffstrategie sind für den norddeutschen Raum bis 2025 zunächst 0,5 GW und für 2030 5 GW Elektrolyseleistung anvisiert. Die hier angenommene Verteilung der Elektrolyseursleistung orientiert sich daher maßgeblich an diesen festgesetzten Ausbauzielen und berücksichtigt dabei den Stand der heute vorhandenen und zukünftig geplanten Elektrolysestandorte in der Region.

² Bei den hier angegebenen Leistungen der Elektrolyseure handelt es sich stets um die elektrische Eingangsleistung.

Tabelle 1: Installierte Leistung Elektrolyseure 2022, 2027, 2032 (Annahmen)

| Installierte Leistung Ely. | 2022 | 2027 | 2032 | Einheit |
|---|------|----------|------------|---------|
| HH | 25 | 105 | 400 | MW |
| HEI, IZ, PI | 0 | 300 | 1000 | MW |
| CUX, STD, WL | 10 | 50 | 700 | MW |
| Gesamtregion | 35 | 455 | 2.100 | MW |
| Norddeutsche H₂-Strategie³ | | min. 500 | min. 5.000 | MW |

An dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass es sich um exemplarische Annahmen handelt. Die konkrete, letztendliche Verteilung ist für die regionalwirtschaftlichen Effekte der Gesamtregion praktisch nicht von Relevanz.⁴ Mit einer Gesamtleistung von 455 MW in 2027 und 2.100 MW in 2032 fügt sich die installierte Elektrolyseurleistung der Region Unterelbe in die Norddeutsche Wasserstoffstrategie ein. Bei zukünftig angenommenen 5.000 Vollbenutzungsstunden und einem Energiebedarf von 56 kWh/kg ergeben sich für 2022 3.500 t, für 2027 45.500 t und für 2032 210.000 t grünen Wasserstoffs. Entscheidend hierbei ist die zu erreichende Gesamtleistung in einem Jahr, die räumliche Verteilung auf einzelne Standorte ist für die regionalwirtschaftlichen Effekte nebensächlich.

Abzüglich des Stromeinsatzes zur Wasserstoffgewinnung verbleibt somit bilanziell ein Stromüberschuss von ca. 9 TWh in 2022, 29 TWh in 2027 und 53 TWh in 2032 für den Stromexport aus der Region. Im Jahr 2019 entsprach der Überschuss lediglich ca. 1 TWh (vgl. Abbildung 3).

Tabelle 2 gibt eine zusammenfassende Übersicht der bisherigen Erkenntnisse zu Wasserstoff-Erzeugung und -Verbrauch der Region Unterelbe und weist hieraus folgend erste resultierende Eckdaten in Logistik und Tankstelleninfrastruktur aus.

Bei einem angenommenen Wasserstoffabsatz von zunächst 1.000 kg/Tag für eine LKW-Tankstelle, lässt sich der grüne Wasserstoffverbrauch im Verkehr 2022 aus zwei Tankstellen bedienen. Die Tankstellen werden hierbei über Trailer-Transporte mit Wasserstoff versorgt, über die Jahre nimmt die Tankstellenanzahl und damit auch die Anzahl der Transporte entsprechend der steigenden Verbrauchsmengen zu. Anzahl und Fahrleistungen in den Stützjahren sind unten dargestellt. Sie berücksichtigen einen über die Jahre zunehmenden Wasserstoffabsatz an den Tankstellen.⁵ Es wird bei der Berechnung der Wertschöpfungseffekte angenommen, dass der Wasserstoff ausschließlich im Schwerlastverkehr Anwendung findet.⁶ Dieser wird unterteilt in Abfallsammelfahrzeuge (ASF), Busse und Logistik (LKW). Eine Annäherung an eine zukünftig mögliche prozentuale Verteilung der Segmente erfolgt auf Grundlage von in der Studie „Entwicklungspfade einer Wasserstoffwirtschaft an der Westküste“ dargestellten Akteursgesprächen in der Region Westküste. (IPP ESN, Hypion, BBG, 2020) Die dort in Akteursgesprächen herausgearbeitete Wasserstoffnachfrage (t/a) in den drei Segmenten werden prozentual auf die Region übertragen und die resultierende Anzahl über durchschnittliche Jahresfahrleistungen und Wasserstoffverbräuche der Fahrzeuge ermittelt.⁷ Die Daten werden in Kapitel 4 aufgegriffen.

³ Ziele beziehen sich auf die Jahre 2025 bzw. 2030.

⁴ Auswirkungen hat sie lediglich aufgrund von Skaleneffekten (der Aufwand für zwei Elektrolyseure à 10 MW ist höher als für einen mit 20 MW) und hinsichtlich der resultierenden Transporte zu Tankstellen u. ä.

⁵ Angenommener Tankstellenabsatz 2022: 1.000 kg / Tag, 2027: 1.500 kg / Tag, 2032: 2.000 kg / Tag.

⁶ Im PKW-Bereich dürften aus Gründen der Energieeffizienz rein batterieelektrische Fahrzeuge dominieren. Auch hier wird es Wasserstoff-Anwendungen geben, z. B. wenn besonders hohe tägliche Verkehrsleistungen zu erbringen oder schwere Anhängerlasten zu ziehen sind. Die daraus resultierenden Absatzmengen dürften jedoch im Vergleich zum Schwerlastverkehr gering sein.

⁷ AFS: 26.000 km / a und 14,03 kg H₂ / 100 km; Busse: 71.000 km / a und 8,2 H₂ / 100 km; LKW: 68.000 km und 7,3 kg / 100 km (IPP ESN, 2019).

Tabelle 2: Übersicht H₂-Erzeugung und -Verbrauch sowie Logistik

| | 2022 | 2027 | 2032 | Einheit |
|--|---------|---------|-----------|------------------|
| H ₂ -Erzeugung | 3.500 | 45.500 | 210.000 | t H ₂ |
| H ₂ -Verbrauch Industrie (grün) | 2.222 | 13.333 | 35.556 | t H ₂ |
| H ₂ -Verbrauch Verkehr (grün) | 721 | 5.050 | 8.656 | t H ₂ |
| Überschussmenge für Export (Differenz) | 556 | 27.117 | 165.788 | t H ₂ |
| LKW Tankstellen | 2 | 9 | 12 | Stk. |
| H ₂ -Verteilung Tankstellen | | | | |
| Anzahl Strecken (Hin- und Rückweg) | 2 | 9 | 12 | Stk. |
| Anzahl Trailertransporte (300 bar) | 1.460 | 10.220 | 17.520 | Stk. |
| Fahrleistung bei Ø 90 km/Strecke (300 bar) | 131.400 | 919.800 | 1.576.800 | km |
| Anzahl Fahrzeuge gesamt | 144 | 1.010 | 1.749 | Stk. |
| Anzahl ASF (Sättigung bei 531 Fhz.) | 29 | 203 | 348 | Stk. |
| Anzahl Busse | 49 | 342 | 486 | Stk. |
| Anzahl Logistik | 67 | 466 | 915 | Stk. |

3.2 ERGEBNISSE

Es ergeben sich die folgenden Wasserstoff-Landkarten für die drei Stützjahre 2022, 2027 und 2032. Dargestellt sind die benannten Elektrolyseure und mögliche Tankstellen (vgl. Kapitel 3.1), ergänzt um die jeweils aktuell bekannten Wasserstoffprojekte in der Region entsprechend der IHK Nord Wasserstofflandkarte (IHK Nord, 2021). Weiter werden die angedachten Pipeline-Planungen aus dem Wasserstoff-Backbone berücksichtigt (Enagás, Energinet et al., 2020) und der stetige Ausbau der Windkraftleistung entsprechend der Ziele der Landesregierungen dargestellt (vgl. Kapitel 3.1).

Im Verlauf der Jahre zeigt sich eine deutliche Zunahme der Wasserstoffaktivitäten in der Region. Erzeuger und Anwender kristallisieren sich im Sinne der Norddeutschen Wasserstoffstrategie (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, 2019, S. 16 ff) an zentralen „Hubs“, die voraussichtlich 2027 bereits über den Wasserstoff-Backbone an ein gesamtdeutsches Netz angeschlossen und untereinander z. T. vernetzt sein werden. Neben der allgemeinen Zunahme an Wasserstoffmengen in Erzeugung und Verbrauch, einer wachsenden Anzahl an LKW-Tankstellen und der steigenden Erzeugung aus Windkraftanlagen seien exemplarisch einzelne angedachte oder bereits in Realisierung befindliche Großprojekte genannt: eine Versuchserzeugungsanlage für synthetisches Kerosin zur Belieferung des Flughafens Hamburgs und ein Kavernenspeicher in Heide ab 2027, eine grüne Wasserstoffelektrolyse in einer Größenordnung von zunächst etwa 50 MW im ChemCoast Park Brunsbüttel u. a. zur Dekarbonisierung der Produktion von Covestro, eine Anlage von DOW in Stade zur e-Methanolsynthese im industriellen Maßstab, verschiedene Großelektrolyseure in Hamburg zum Einsatz von grünem Wasserstoff bei der Stahlproduktion von ArcelorMittal sowie der Bau und Betrieb eines Importterminals zur Anbindung an den Wasserstoff-Backbone im Jahr 2032, an dessen Ansiedlung verschiedene Standorte in der Region Unterelbe interessiert sind. Die Karten beschreiben hierbei in ihrer Gesamtheit ein Basisszenario wie sich die Region nach gegenwärtigem Stand entwickeln könnte.⁸

⁸ Die Benennung von Projekten erfolgt dabei lediglich exemplarisch und erhebt nicht den Anspruch einer vollständigen Auflistung oder einer vergleichenden Bewertung verschiedener Projekte. Eine relativ breite Auflistung von Projekten findet sich in (IHK Nord, 2021).

STANDORTSTUDIE WIND-WASSERSTOFF REGION UNTERELBE - STRUKTUREN UND POTENZIALE
DATUM: 30. November 2021

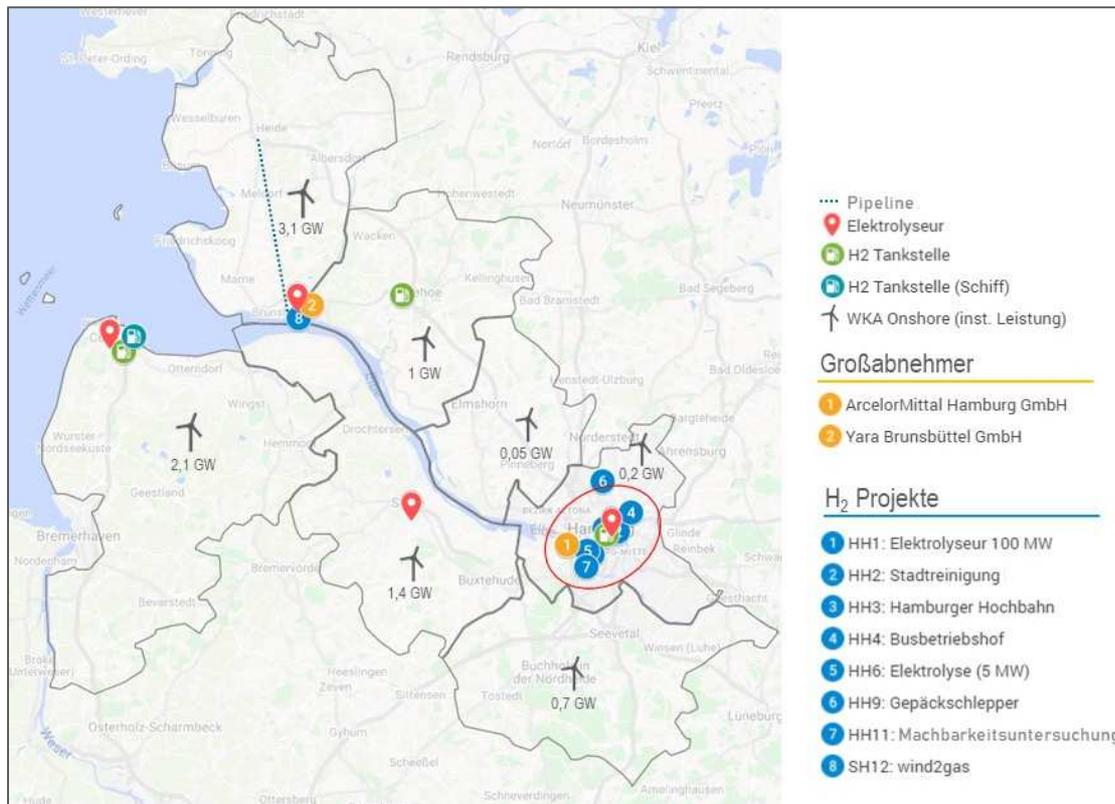


Abbildung 4: Basisszenario 2022

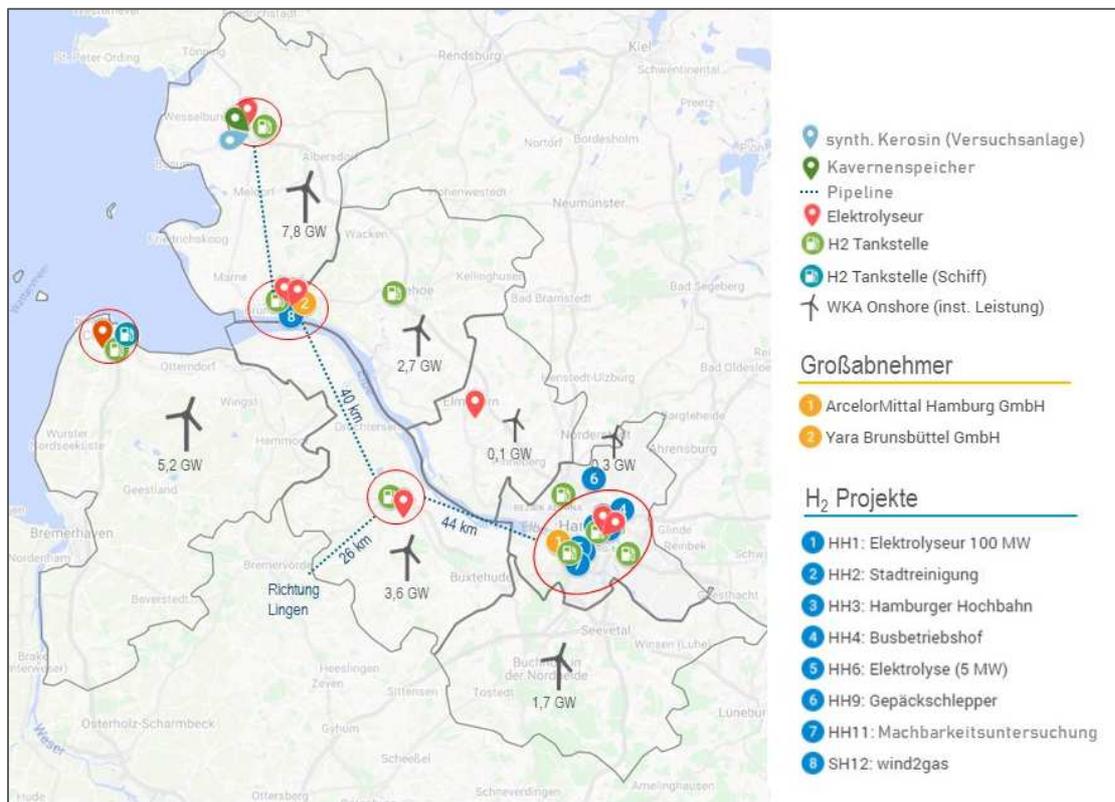


Abbildung 5: Basisszenario 2027

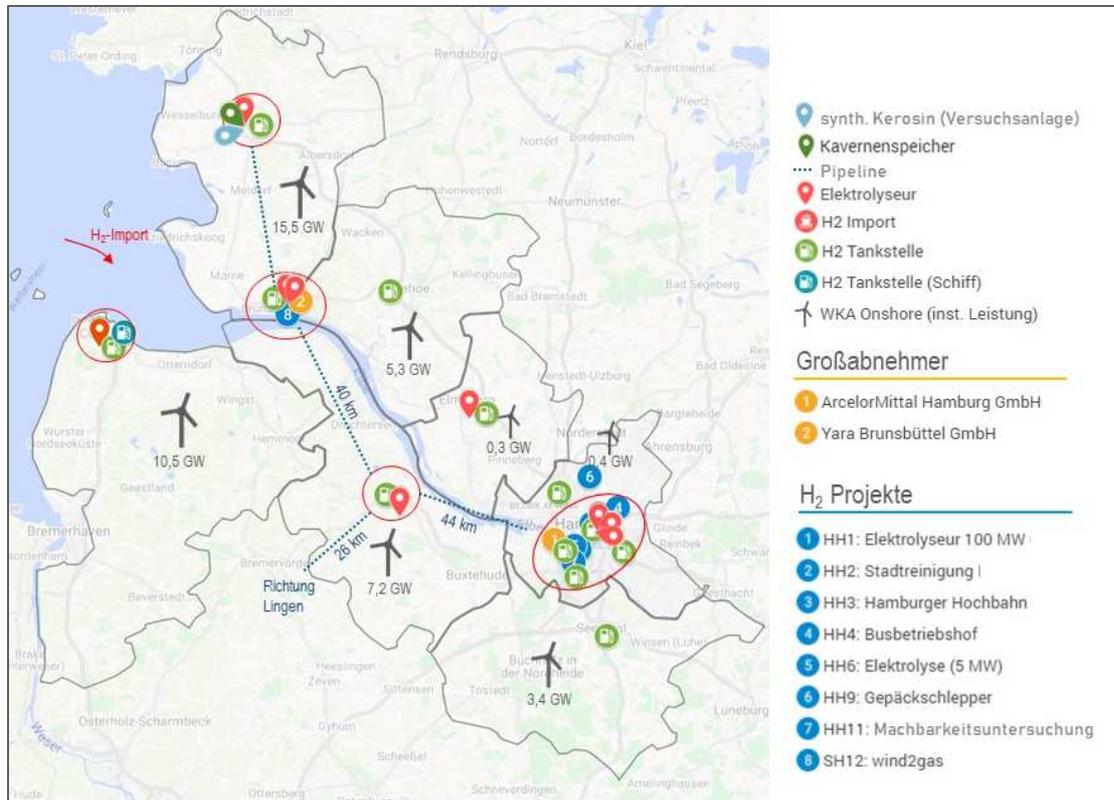


Abbildung 6: Basisszenario 2032

3.3 SZENARIEN

Zur Analyse der regionalökonomischen Effekte der Wasserstoffwirtschaft in der Region Unterelbe wurden ein Basisszenario wie zuvor beschrieben und, ausgehend von diesem, weitere Szenarien betrachtet:

1. Basisszenario

Im Basisszenario sind zunächst alle Anlagen und Aktivitäten so berücksichtigt, wie sie oben beschrieben sind.

2. Dezentrale Elektrolyse:

In diesem Szenario werden die Tankstellen außerhalb von Hamburg durch dezentrale Elektrolyseure versorgt. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Tankstellen unverändert bleibt, die Anzahl der zur Verfügung stehenden Elektrolyseure allerdings erhöht wird. Die erzeugte Menge an Wasserstoff bleibt ebenfalls gleich. Insgesamt müssen geringere Entfernungen für den Transport des Wasserstoffs zu den Tankstellen zurückgelegt werden und die Investitionskosten für die Elektrolyseure fallen höher aus.

3. Netzdienliche Elektrolyse:

In diesem Szenario wird die Netzdienlichkeit der Elektrolyseure variiert. Die Auslastung von 5.000 Vollbenutzungsstunden im Basisszenario wird jeweils um i) 30 % reduziert und ii) um 30 % erhöht, wodurch sich die Netzdienlichkeit entsprechend erhöht bzw. verringert.

4. Förderung

In den nächsten Jahren wird voraussichtlich ein beträchtlicher Anteil an Fördergeldern seitens des Bundes, der Länder oder der Europäischen Union in Wasserstofftechnologien fließen. Welchen Einfluss eine finanzielle Förderung von 50 % auf die Investitionskosten hat, wird in diesem Szenario berechnet.

Darüber hinaus werden ausgehend vom Basisszenario verschiedene Sensitivitäten untersucht.

a) Regionale Elektrolyse-Installateure:

Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass die Unternehmen, die die Elektrolyseure errichten, zu 20 % in der Region Unterelbe verortet werden können. Dieser Anteil wird auf 80 % erhöht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Komponenten außerhalb der Region hergestellt werden. In der Region Unterelbe generiert mangels ortsansässiger Firmen lediglich die Errichtung der Elektrolyseure Wertschöpfung sowie der Betrieb durch den Verkauf des Wasserstoffs.

b) Marge:

In den Umsätzen der Unternehmen, die mit der Errichtung und Installation der Anlagen und Betriebsstätten betraut sind, wird im Basisszenario von einer Gewinnmarge in Höhe von 3 % ausgegangen. Diese Marge wird auf 8 % erhöht.

c) Nicht-spezifische Betriebskosten:

Unter den nicht spezifischen Betriebskosten werden Kosten für Dienstleistungen im Bereich der Versicherung, der Rechts- und Steuerberatung, Verwaltungskosten sowie Ausgaben für Sonstiges verstanden. Für jede der Positionen wurden im Ausgangsszenario Kosten zwischen 0,5 % und 1,5 % angenommen. Für die Sensitivitätsrechnung wurden diese auf 3 % erhöht.

d) Unternehmenssitze:

Der bzw. die Betreiber der Elektrolyseure haben im Basisszenario ihren Unternehmenssitz ausschließlich in der Region Unterelbe, so dass die Erlöse für den Verkauf des Wasserstoffs zu 100 % in die Region fließen. Dieser Anteil wird auf 50 % reduziert.

4 REGIONALWIRTSCHAFTLICHE EFFEKTE

4.1 METHODIK

Die Analyse der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte, die durch einen Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in der Region Unterelbe entstehen, ist auf Basis unterschiedlicher Methoden möglich. Hierunter fallen bspw. die Input-Output-Analyse (IO Analyse), die Methode der berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodelle, die Additionsmethode oder beschäftigungsspezifisch ein Ansatz auf Basis von Beschäftigungsfaktoren ((Coon, Hodur, & Bangsund, 2012), (Jenniches, 2018, S. 35-51), (Rutovitz & Atherton, 2009), (Wei, Patadia, & Kammen, 2010), (Hirschl, et al., 2015)). Die Analyse auf Basis der IO Methode ist auf regionaler Ebene mit einem sehr hohen Aufwand für Modellierung und Datenbeschaffung verbunden. Beispielweise müssten eigens Daten erhoben werden, denn Regionen unterscheiden sich sowohl bezüglich der intraregionalen als auch der interregionalen Verflechtungsstrukturen und wichtiger ökonomischer Indikatoren (Arbeitsproduktivität etc.). Für eine Analyse auf Basis von allgemeinen Gleichgewichtsmodellen werden vielfältige und umfangreiche empirische Daten benötigt. Teilweise werden diese durch die amtliche Statistik zur Verfügung gestellt, müssen jedoch sehr häufig noch angepasst werden. Darüber hinaus ist die Ausgangsbasis der Modelle die Annahme vollkommener Märkte, d. h. Aspekte wie Unsicherheiten, asymmetrische Informationen oder strategisches Verhalten müssten im Modell ergänzt werden. Die hierfür notwendigen Datenerhebungen sind sehr aufwendig. Überdies sind aufgrund der notwendigen Detailgenauigkeit, die mit einem sehr hohen Arbeitsaufwand verbunden ist, allgemeine Gleichgewichtsmodelle für kleine Untersuchungsregionen und einzelne wissenschaftliche Fragestellungen weniger gut geeignet.

Für diese Studie, in der eine relativ kleine Region untersucht wird, wird daher zur Berechnung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte die Additionsmethode in Kombination mit Beschäftigungsfaktoren angewendet. Durch diese Methode kann klar identifiziert werden, wie hoch die regionale Wertschöpfung in den Industrien ist, die an Installation und Betrieb der Anlagen direkt und indirekt beteiligt sind. Preisänderungen können relativ einfach in die Analyse integriert werden, indem die Kosten der spezifischen Technologien angepasst werden und auch Skaleneffekte können berücksichtigt werden, indem verschiedene Kostenstrukturen je nach Anlagengröße einfließen.⁹ Falls keine großen Unterschiede zwischen den Kosten der Technologien oder Arbeitsproduktivitäten vorliegen, kann der Ansatz für verschiedene Regionen eines Landes angewandt werden.

4.1.1 ANALYSE DER WERTSCHÖPFUNGSEFFEKTE

Die Additionsmethode geht zurück auf die Entstehungs- und Verteilungsrechnung der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Sie erfasst die wirtschaftlichen Tätigkeiten aller Wirtschaftseinheiten, die ihren ständigen Sitz in dem zu betrachtenden Wirtschaftsgebiet haben. Die jeweiligen Wirtschaftseinheiten werden entsprechend ihrer Struktur in Sektoren zusammengefasst.

Die Nettowertschöpfung setzt sich dabei (um Abschreibungen bereinigt) aus den an der Leistungserstellung beteiligten Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital und dem Anteil des Staates in Form von Steuern und sonstigen Abgaben zusammen. Die Betrachtung bezieht sich auf die Installations- sowie Betriebsphasen der Anlagen und Fahrzeuge, die mit der Wasserstoffwirtschaft in Verbindung stehen. Die Betriebsphase der Anlagen und Fahrzeuge wird über die anfallenden Betriebskosten und den daraus ableitbaren regionalen Wertschöpfungseffekten abgebildet. Mit Ausnahme der Elektrolyse, für die der Verkauf des produzierten Wasserstoffs in der Betriebsphase angerechnet wird, werden keine weiteren Erlöse aus den Aktivitäten im Betrieb, wie bspw. durch den Wasserstoffverkauf an der Tankstelle, in den Berechnungen berücksichtigt. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass in die Berechnungen nur die Aktivitäten einfließen, die im Rahmen der Wasserstoffwirtschaft *zusätzlich* in der Region stattfinden. Zum anderen darauf, dass es

⁹ Aufgrund mangelnder Informationen konnten in dieser Berechnung allerdings keine Skaleneffekte berücksichtigt werden.

im Rahmen dieser Studie nicht möglich ist, verschiedene Geschäftsmodelle genauer zu analysieren, u. a. weil notwendige Informationen nicht vorliegen. So liegen bspw. Kostendaten über die Umwidmung einer Salzkaverne zu einem Kavernenspeicher vor, aber keine Informationen über mögliche Geschäftsmodelle bzgl. des An- und Verkaufs des gespeicherten Wasserstoffs.

Die Datengrundlage bilden dabei Kostenrechnungen der im Basisszenario für die Wasserstoffwirtschaft in der Region Unterelbe identifizierten Anlagen und Anwendungen. Es werden in den Berechnungen die folgenden Komponenten berücksichtigt:

Tabelle 3: Betrachtete Technologien und Aktivitäten

| Komponente | Aktivität / Phase |
|----------------------------|---|
| Elektrolyseur | Errichtung, Betrieb, H ₂ -Vertrieb |
| H ₂ -Tankstelle | Errichtung, Betrieb ¹⁰ |
| LKW, Busse | Umrüstung ¹¹ auf H ₂ |
| ASF | H ₂ -Verbraucher, Betrieb |
| Pipeline | Errichtung, Betrieb |
| Transport | Transportprozess durch Tanklastfahrzeug |
| Export, Industrie | H ₂ -Verbraucher |
| Importterminal | Errichtung, Betrieb ¹² |
| Kavernenspeicher | Umrüstung, Betrieb |

Die für die Wertschöpfungsermittlung relevanten Umsätze werden aus den betrachteten Phasen abgeleitet. Die Investitionskosten und Investitionsnebenkosten, die bei der Installation anfallen, werden bspw. zur Ermittlung der Finanzierungskosten einbezogen. Ein Überblick über die angenommenen Kostengrößen findet sich im Anhang. Direkte Wertschöpfungseffekte fallen sowohl auf Ebene des Anlagenbetreibers als auch bei den Unternehmen an, die direkt an der Installation der Anlagen beteiligt sind (dabei kann es sich auch um ein und dasselbe Unternehmen handeln). Der Vorsteuer-Gewinn des Betreibers der Anlagen ergibt sich als Differenz zwischen den Erträgen der Wasserstoffproduktion (Elektrolyseure) und den Betriebskosten (inkl. der Stromkosten) des Betreibers sowie der Gewinnmarge, die für die Umrüstungen / Errichtungen der Komponenten anfallen. Der Gewinn des Unternehmens, das bspw. mit der Errichtung betraut ist, ergibt sich aus dem erwartbaren Umsatz abzüglich der Kosten für Material, Arbeit etc. Die Gewinn- und Ertragssteuern werden abgezogen und die Verteilung der ermittelten Steuerzahlungen auf die Kommunen berücksich-

¹⁰ Ein Tankstellenshop bzw. die Umsätze, die in diesem getätigt werden, werden nicht berücksichtigt. Für den Shop an sich ist es unerheblich, ob an der Zapfsäule herkömmlicher Treibstoff oder Wasserstoff getankt werden kann. Insofern hat in diesem Punkt die Umstellung auf Wasserstoff keine regionalwirtschaftlichen Auswirkungen.

¹¹ Der Fokus bei der Berechnung liegt auf der Umrüstung von LKW und Bussen. Der Bezug von LKW und Bussen mit Brennstoffzellenantrieb wird nicht berücksichtigt, da mit Clean Logistics ein Umrüstungs-Unternehmen in der Region Unterelbe beheimatet ist, jedoch kein Unternehmen, das Neufahrzeuge herstellt. Durch den Bezug von (Neu-) Fahrzeugen aus anderen Regionen werden keine zusätzlichen Wertschöpfungseffekte in der Region Unterelbe generiert.

¹² Da das Importterminal unter den hier getroffenen Annahmen erst 2032 fertiggestellt wird, sind in die berechneten Zahlen allerdings noch keine Effekte des Betriebs eingeflossen.

tigt. Als direkte Wertschöpfungseffekte werden neben den regionalen Nachsteuergewinnen und Steuern auch die regional verbleibenden Zinszahlungen bei Aufnahme von Fremdkapital sowie die Personalkosten (Einkommen) für die mit Errichtung / Umrüstung und Betrieb direkt beschäftigten Arbeitnehmer berücksichtigt.

Darüber hinaus ermöglicht es die Methode, indirekte Wertschöpfungseffekte zu ermitteln. Diese resultieren aus der Nachfrage nach Vorleistungen und Dienstleistungen durch Unternehmen desselben oder eines anderen Wirtschaftssektors und beschreiben die Effekte, die auf vorgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette entstehen. Beispiele hierfür sind Dienstleistungen im Bereich der Steuerberatung oder Versicherung oder das benötigte Material zur Reparatur einer Anlage. Die Kosten setzen sich aus Einkommen und Materialkosten zusammen. Da diese beiden Komponenten in unterschiedlichem Maße zur Wertschöpfung beitragen, werden die Anteile der Einkommen bzw. Materialkosten für die verschiedenen Kostenpositionen (z. B. Verwaltung, Wartung und Reparatur etc.) geschätzt. Da nicht alle Kosten in der betrachteten Region verbleiben, müssen auch deren regionale Anteile geschätzt werden.

Die zusätzliche Wertschöpfung in der Region, die letztlich zu einer Verausgabung der durch den Ausbau der Wasserstoffwirtschaft zusätzlichen Einkommen führt, löst einen Multiplikatorprozess aus, der über mehrere Runden die Nachfrage in der Region Unterelbe stimuliert und somit ebenfalls die regionale Wertschöpfung erhöht. Hierbei spricht man von induzierten Wertschöpfungseffekten. Die Multiplikatoranalyse basiert auf regionalen Quoten (marginaler Konsum, indirekte und direkte Steuer, Transfer und Import), die abgeleitet oder ökonometrisch geschätzt werden.

In Abbildung 7 wird dargestellt, aus welchen Komponenten sich die regionale Wertschöpfung zusammensetzt.

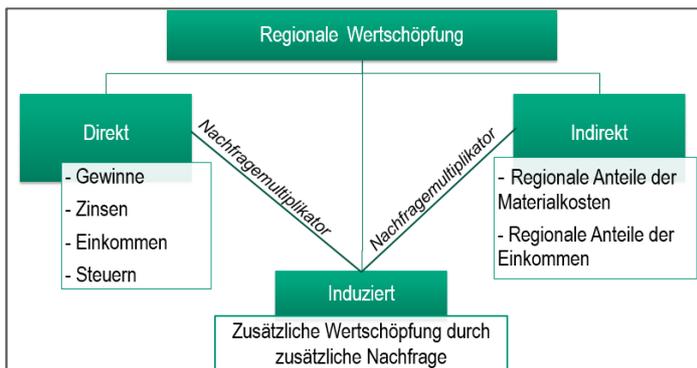


Abbildung 7: Komponenten der regionalen Wertschöpfung

4.1.2 ANALYSE DER BESCHÄFTIGUNGSEFFEKTE

Der direkte Beschäftigungseffekt, der durch die Ausweitung der Wasserstoffwirtschaft in der Region Unterelbe zu erwarten ist, lässt sich auf Basis von Beschäftigungsintensitäten ermitteln. Dazu wird analysiert, wie viele Personen in den für die Wasserstoffwirtschaft als typisch identifizierten Branchen beschäftigt sind, um den entsprechenden jährlichen Umsatz zu erwirtschaften. Bei der Beschäftigungsintensität handelt es sich somit um den Quotienten aus branchenspezifischen Beschäftigten und Umsätzen. Auf Basis der in der Region Unterelbe durch die Wasserstoffwirtschaft generierten Umsätze sowie der Beschäftigungsintensität lässt sich somit analysieren, wie viele Beschäftigte (in Vollzeitäquivalenten) der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in der Region benötigt.

4.1.3 ANNAHMEN

Für die Berechnungen auf regionaler Ebene ist es unabdingbar, Annahmen hinsichtlich verschiedener Aspekte zu treffen. Einige dieser Annahmen können entsprechend ihrer Bedeutung für die regionale Wertschöpfung Ergebnisse stärker beeinflussen als andere. So hat es bspw. einen weitaus stärkeren Einfluss auf die Wertschöpfung, ob der Betreiber der Elektrolyseure in der Region verortet werden kann, da er dann, wenn er in der Region verortet ist, auch mit seinen dauerhaft anfallenden Aufwendungen (von der Druckerpatrone über den Versicherungsvertrag bis zum Personal) in

deutlich stärkerem Maße regionale Effekte auslöst. Einige Annahmen konnten durch Literatur oder Informationen aus persönlichen Gesprächen untermauert werden. Entscheidende Annahmen, die den Rahmen für das Basisszenario bilden, finden sich in Tabelle 4. Im Anhang findet sich darüber hinaus eine Übersicht über weitere Annahmen.

Tabelle 4: Annahmen (Auswahl) für das Basisszenario

| | 2022 | 2027 | 2032 | Quelle |
|---|--|--|--|----------------------------------|
| Wasserstoffpreis | 8 €/kg | 6,4 €/kg | 5,5 €/kg | Studien, u. a. (MELUND, 2021) |
| Strompreise EE | 6,9 ct/kWh | 6,3 ct/kWh | 6 ct/kWh | (MELUND, 2021) |
| Fremdfinanzierungsanteil | 50 % | 50 % | 50 % | Eigene Annahme |
| Marge | 3 % | 3 % | 3 % | Eigene Annahme |
| Nicht spezifische Betriebskosten | 0,5 % - 1 % von Invest | 0,5 % - 1 % von Invest | 0,5 % - 1 % von Invest | Eigene Annahme |
| Sitz des Betreibers Elektrolyseur | 100 % regional | 100 % regional | 100 % regional | Eigene Annahme |
| Sitz Betriebe Errichtung, Umrüstung | Je nach Technologie 20 % - 67 % regional | Je nach Technologie 20 % - 67 % regional | Je nach Technologie 20 % - 67 % regional | Eigene Annahme, Unternehmensinfo |
| Reg. Anteil nicht spezifischer Betriebskosten | 50 % bis 100 % | 50 % bis 100 % | 50 % bis 100 % | Eigene Annahme |

4.2 ERGEBNISSE

4.2.1 BASISZENARIO

Im Basisszenario entfalten die im vorhergehenden Kapitel genannten Aktivitäten in der Wasserstoffwirtschaft Unterelbe im Beobachtungszeitraum von 2022 bis 2032 stetig anwachsende positive Effekte auf die regionale Wertschöpfung. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass einige Komponenten erst im Laufe der Jahre auf- oder ausgebaut werden (z. B. Importterminal und Kavemenspeicher). Zum anderen sorgen die Investitionen bzw. insbesondere die stetig ansteigenden Investitionsnebenkosten für positive Effekte auf die Wertschöpfung. Dies wird am Beispiel der Elektrolyse veranschaulicht. Die Installation der Elektrolyseleistungen erfolgt in der Modellierung auf jährlicher Basis, d. h. jedes Jahr im Betrachtungszeitraum kommt eine gewisse Elektrolyseleistung hinzu. Die Investitionskosten fallen lediglich im jeweiligen Installationsjahr an, die Investitionsnebenkosten (z. B. Annuitätenzahlungen) laufen jedoch über den gesamten Abschreibungszeitraum und summieren sich auf. Im Jahr 2023 fallen beispielsweise nicht nur Investitionsnebenkosten für die in dem Jahr installierte Leistung an, sondern zusätzlich diejenigen für die Vorjahre.

Gleiches gilt für die daraus abgeleiteten Wertschöpfungseffekte. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Entwicklung der regionalen Wertschöpfung aller Wasserstoffaktivitäten im Basisszenario im Zeitverlauf. Zu Beginn im Jahr 2022 liegt die zusätzliche regionale Wertschöpfung durch die Wasserstoffwirtschaft in der Region bei rund 32 Mio. Euro. Sie steigt bis zum Jahr 2027 auf rund 158 Mio. Euro an und beträgt im Jahr 2032 über 530 Mio. Euro jährlich. In kumulierten Werten bedeutet dies, dass bis zum Jahr 2032 im Basisszenario insgesamt rund 2,35 Mrd. Euro durch die beschriebenen Wasserstoffaktivitäten in der Region Unterelbe verbleiben können.

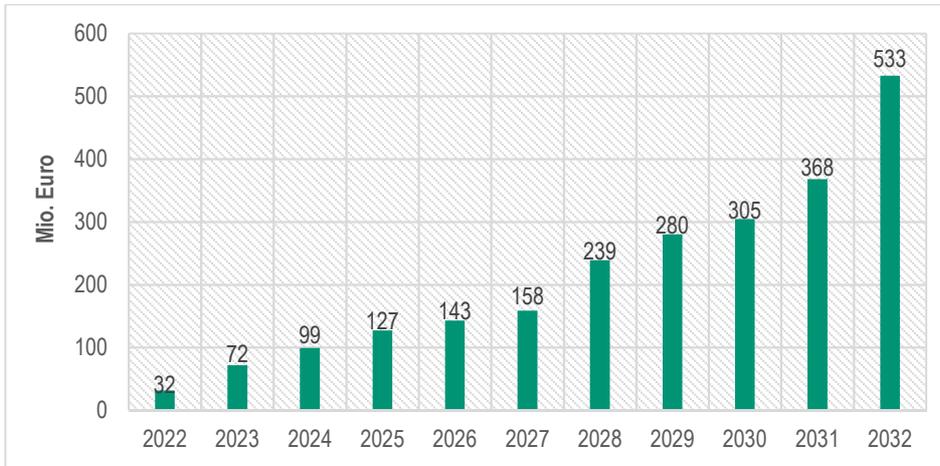


Abbildung 8: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, jährlich

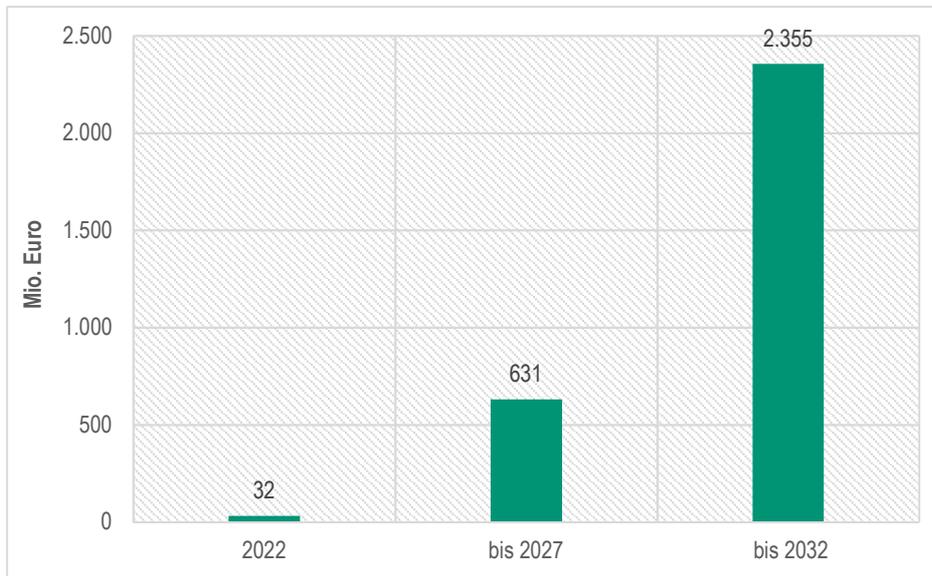


Abbildung 9: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert

Die regionale Beschäftigung durch die Wasserstoffaktivitäten in der Region Unterelbe entwickelt sich im Zeitablauf positiv. In Abbildung 10 ist zu beobachten, dass sie im Zeitraum zwischen 2022 und 2027 zwischen rund 140 und 280 Vollzeitäquivalenten (VZÄ) jährlich liegt. In den darauffolgenden Jahren werden zwischen 500 und 540 VZÄ jährlich für die Verrichtung der Aufgaben benötigt und im Jahr 2032 verdreifacht sich die Beschäftigung, besonders getrieben durch den Bau des Importterminals. Insgesamt überwiegen die direkten Beschäftigungseffekte, die durch Errichtung, Umrüstung und Installation der Komponenten sowie Anlagen ausgelöst werden im Vergleich zu den indirekten Beschäftigungseffekten, die sich auf vorgelagerten Wertschöpfungsstufen ergeben.

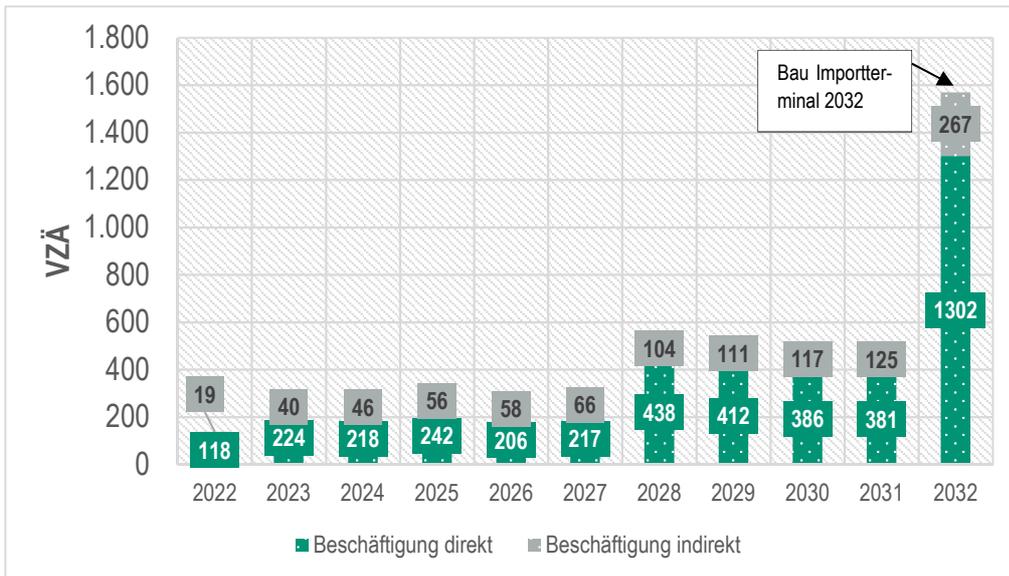


Abbildung 10: Regionale Beschäftigung (VZÄ), gesamt, Basisszenario, jährlich

Die direkte und indirekte Wertschöpfung setzen sich dabei folgendermaßen zusammen: Mit kumuliert rund 831 Mio. Euro zwischen den Jahren 2022 und 2032 spielen die regional verbleibenden Gewinne mit Abstand die größte Rolle bei der Generierung von direkter regionaler Wertschöpfung (siehe Abbildung 11). Die Gewinne resultieren aus den Erlösen des Wasserstoffverkaufs sowie aus den Umrüstungs- und Errichtungstätigkeiten in der Region. Welche Auswirkungen eine Verringerung des „Regionalisierungsgrades“ des Betreibers von 100 % auf 50 % auf die Wertschöpfung im Basisszenario haben kann, wird im Kapitel 4.2.4 zur Sensitivitätsanalyse beschrieben (Variante „Unternehmenssitz“). Die zweitstärkste Komponente sind die in der Region verbleibenden Zinszahlungen mit rund 376 Mio. Euro. Durch dieses Ergebnis wird unterstrichen, wie wichtig es ist regionale Betreiber für die Elektrolyseure zu gewinnen und dass das Kapital für die Anlagen von regionalen Banken und Finanzdienstleistern bereitgestellt wird.

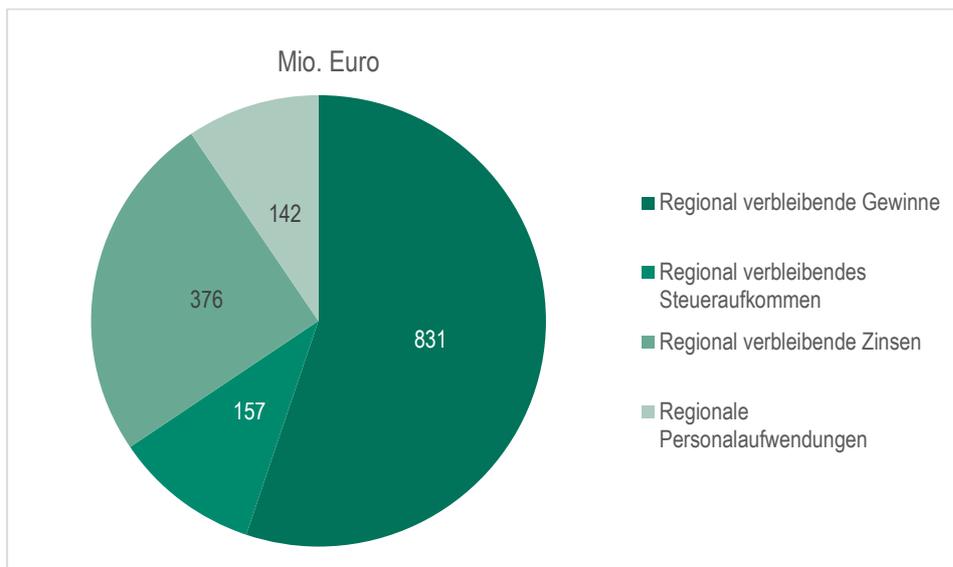


Abbildung 11: Zusammensetzung der regionalen direkten Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert bis 2032

Auch bei der Zusammensetzung der indirekten regionalen Wertschöpfungseffekte gibt es mit dem regional verbleibenden wertschöpfungsrelevanten Einkommen eine Komponente, die die regionale Wertschöpfung maßgeblich treibt. Mit

kumuliert rund 91 Mio. Euro bis zum Jahr 2032 führt die Einkommenskomponente zu einer deutlich größeren Wertschöpfung als die Materialkomponente mit 4,3 Mio. Euro oder der regionale Anteil der Einkommenssteuer mit ebenfalls rund 4,3 Mio. Euro kumuliert bis 2032. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Einkommenskomponente rund viermal so wertschöpfungsrelevant ist wie die Materialkomponente. Zum anderen ist der Einkommensanteil an den Kostenpositionen im Dienstleistungsbereich (Rechts- und Steuerberatung, Versicherung etc.) deutlich höher als der Materialanteil. Zur Bestimmung der „Wertschöpfungsrelevanz“ des Einkommens und des Materials wurde die Berechnung von (Kosfeld, et al., 2013) herangezogen. Die Wertschöpfung aus Einkommen wird darin als Quotient aus Brutto- und Nettolöhnen und die des Materials als Quotient des Bruttoproduktionswerts und der Nettowertschöpfung zu Faktorkosten der jeweiligen Wirtschaftssektoren geschätzt. Hinsichtlich des Anteils von Einkommen und Material an den Kosten werden Annahmen getroffen (siehe Anhang). Der Anteil des Materials bei den Versicherungskosten wurde bspw. mit 10 % angesetzt, während er bei Brennstoffkosten bspw. bei 80 bis 90 % liegt.

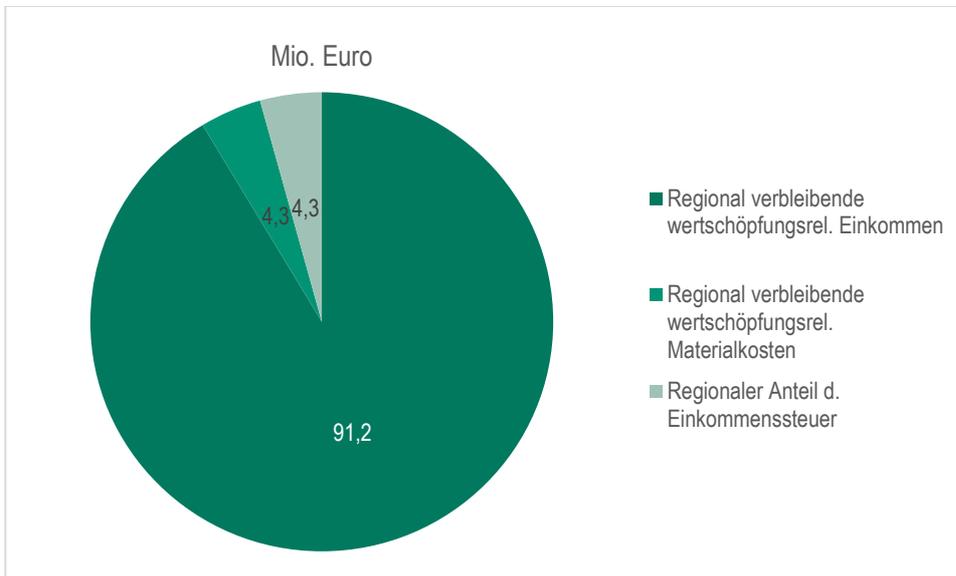


Abbildung 12: Zusammensetzung der regionalen indirekten Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario, kumuliert bis 2032

Weiterhin stellt sich die Frage, welche der im Basisszenario berücksichtigten Aktivitäten die Treiber der Wertschöpfung und Beschäftigung sind. Insgesamt führen die Errichtung und der Betrieb der Elektrolyseure mit Abstand zu den höchsten Wertschöpfungseffekten. Kumuliert sind bis zum Jahr 2032 mit rund 1,8 Mrd. Euro fast 76 % der generierten Wertschöpfung auf die Aktivitäten rund um die Elektrolyseure zurückzuführen (siehe Abbildung 13).

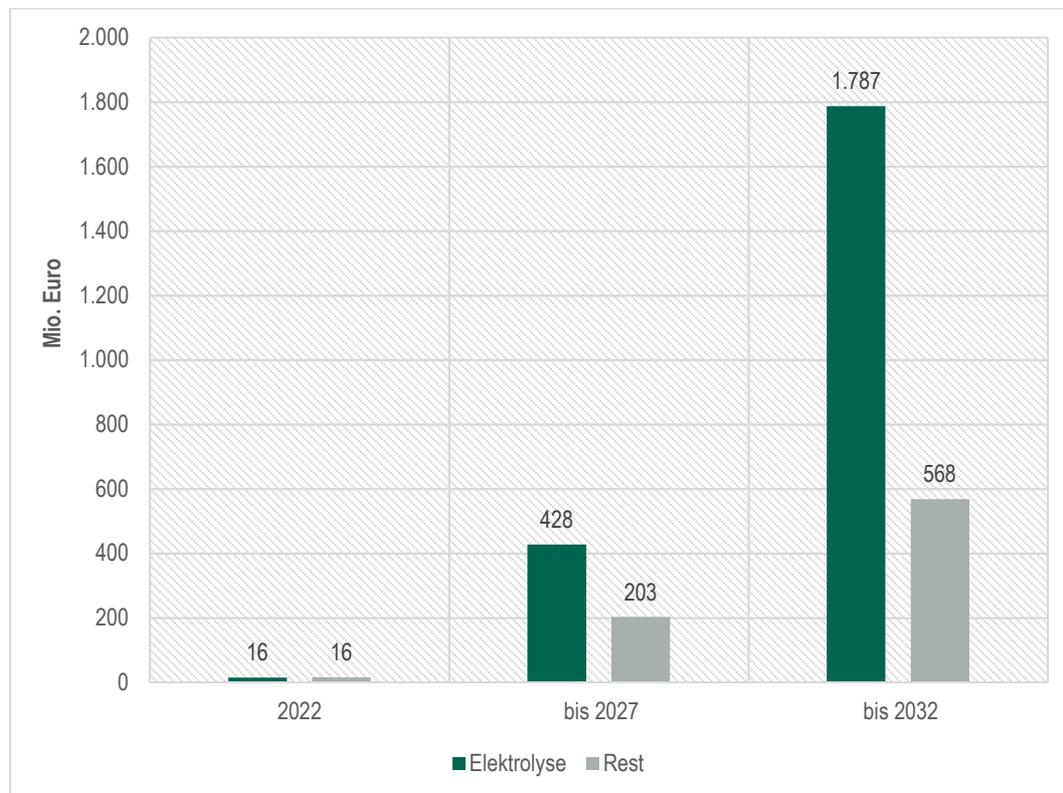


Abbildung 13: Regionale Wertschöpfung durch Errichtung und Betrieb Elektrolyseure sowie restliche Aktivitäten (Rest), Basisszenario, kumuliert bis zum jeweiligen Jahr

Die anderen Aktivitäten haben, wie in Abbildung 14 dargestellt, im Vergleich zur Elektrolyse deutlich weniger Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung. Auffällig unter den anderen Aktivitäten sind die Umrüstungen von LKW und Bussen in der Region, die zusammen bis zum Jahr 2032 für rund 340 Mio. Euro Wertschöpfung sorgen. Hier ist anzumerken, dass die Gesamtheit der im Basisszenario umzurüstenden LKW und Busse gegenwärtig nicht von einem in der Region Unterelbe ansässigen Unternehmen, das sich auf die Umrüstung dieser Fahrzeuge spezialisiert hat, übernommen werden kann, da die Kapazitäten trotz eines Kapazitätsausbaus im nächsten Jahr nicht reichen.¹³ Dies ist bei der Berechnung berücksichtigt worden. Inwiefern die von Clean Logistics umgebauten Fahrzeuge in die Region Unterelbe verkauft oder „exportiert“ werden, ist dabei für die Berechnung der regionalen Effekte unerheblich.

Der Bau des Importterminals führt kumuliert mit rund 103 Mio. Euro bis zum Ende des Betrachtungszeitraums ebenfalls zu hohen Wertschöpfungseffekten. Die Effekte des Wasserstofftransports von den Elektrolyseuren zu den Tankstellen und die Umwidmung der Salzkaverne in einen Kavernenspeicher auf die regionale Wertschöpfung sind mit vier bzw. fünf Mio. Euro eher vernachlässigbar. Gleiches gilt für die Errichtung einer ersten Anlage zur Herstellung synthetischen Kerosins mit einer regionalen Wertschöpfung von ca. 11 Mio. Euro - dabei handelt es sich um eine Anlage, in der sich zunächst rund 600 t synthetisches Kerosin im Jahr herstellen lassen. Dieses Kerosin ist in der Form auch noch nicht als „grünes“ Kerosin an den Flughafen Hamburg lieferbar, da zunächst ein mehrjähriges Zertifizierungsverfahren durchlaufen werden muss. Da eine Produktion in industriellem Maßstab frühestens ab 2035 zu erwarten ist,¹⁴ wird in dieser Untersuchung lediglich die Errichtung der Versuchsanlage berücksichtigt.

¹³ Informationsaustausch am 13.04.2021 mit Markus Körner von Clean Logistics.

¹⁴ Informationsaustausch am 20.05.2021 mit einem Unternehmen der chemischen Industrie.

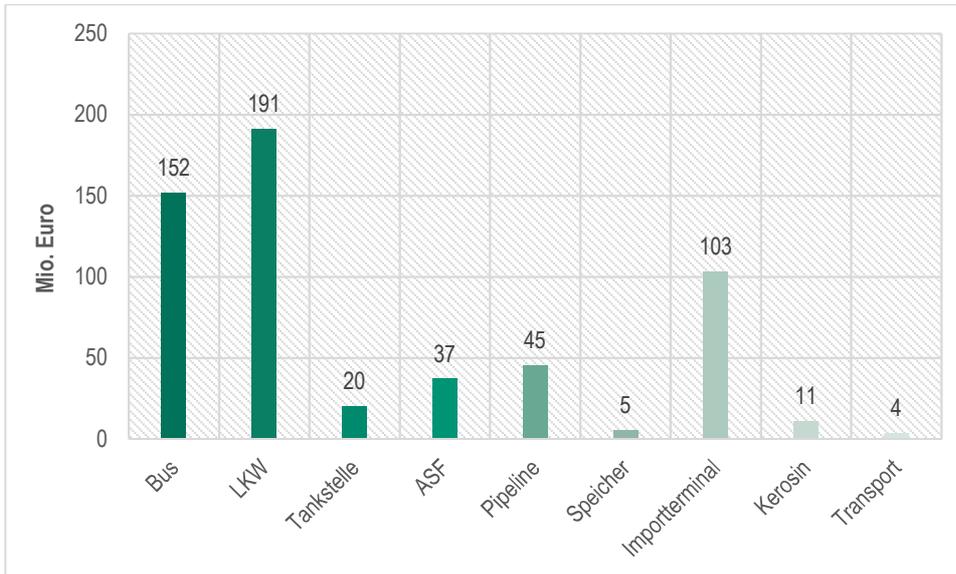


Abbildung 14: Zusammensetzung der regionalen Wertschöpfung, Technologien, Basisszenario, kumuliert bis 2032

Beim Blick auf die Beschäftigungseffekte in Abbildung 15 sticht ebenfalls die Elektrolyse heraus. Bis zum Jahr 2032 werden für die Aktivitäten rund um Errichtung und Betrieb der Elektrolyse mehr als 2.850 Beschäftigte benötigt. Der Bau des Importterminals führt zu einem Beschäftigungseffekt von mehr als 1.000 VZÄ. Rund 800 davon werden in den kommenden Jahren benötigt, um die im Basisszenario genannte Anzahl an Bussen und LKW umzurüsten.¹⁵

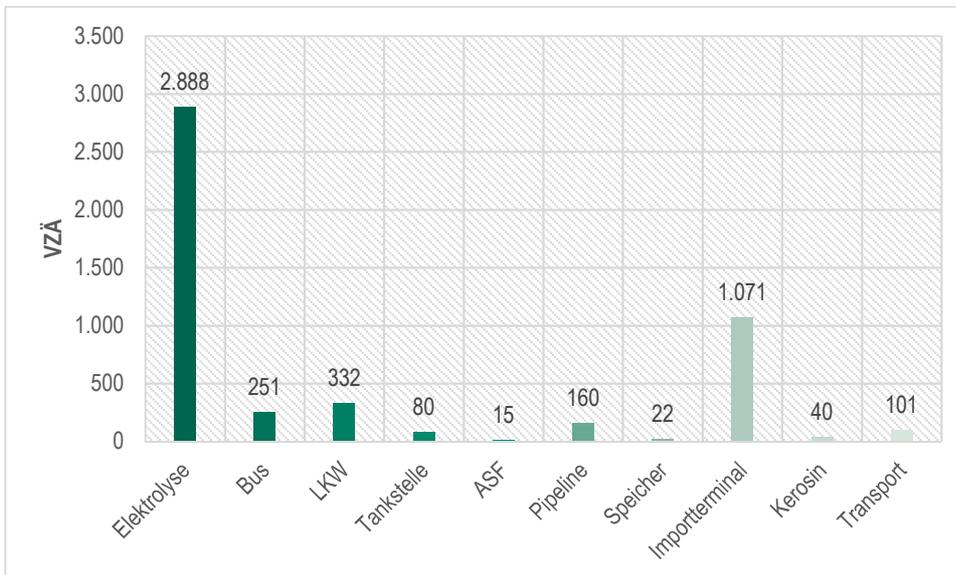


Abbildung 15: Regionale Beschäftigung, Technologien, Basisszenario, kumuliert

Prinzipiell führen kostenintensivere Aktivitäten zu höheren Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten. Um einen genaueren Einblick zu erhalten, welche Aktivitäten unter Berücksichtigung des eingesetzten Kapitals am stärksten zur

¹⁵ Wie bereits erwähnt, sei hier noch einmal darauf hinzuweisen, dass sich die Anzahl von 800 VZÄ nicht auf die Gesamtzahl an umzurüstenden Bussen und LKW bezieht, sondern auf den Teil, der mit den in der Region Unterelbe verfügbaren Umrüstungskapazitäten überhaupt umgerüstet werden kann.

regionalen Wertschöpfung beitragen, wird die generierte Wertschöpfung jeweils ins Verhältnis zu den Kosten von Investition und Betrieb gesetzt. Der Fokus liegt dabei nicht auf dem Betrachtungszeitraum zwischen 2022 und 2032, sondern auf der entsprechenden Betriebszeit der jeweiligen Anlage / Komponente. Es soll die Frage beantwortet werden, welche regionale Wertschöpfung jeder eingesetzte Euro bei Investition in die entsprechenden Aktivitäten bewirkt.¹⁶ Dabei werden die unterschiedlichen Betriebsjahre der entsprechenden Anlagen berücksichtigt.

Bei der Betrachtung des Quotienten der einzelnen Komponenten über die jeweilige Betriebsjahre (siehe Abbildung 16) fallen deutliche Unterschiede auf. Am besten schneiden Investitionen in die in der Region erfolgende Umrüstungen von LKW und Bussen ab sowie in den Bau des Importterminals mit 0,81, 0,79 und 0,76 Euro generierter Wertschöpfung pro investiertem Euro. Demgegenüber stehen die Beschaffung von Abfallsammelfahrzeugen (Neufahrzeugen) mit Brennstoffzellenantrieb von außerhalb der Region¹⁷ sowie die Errichtung der Versuchsanlage zur Herstellung grünen Kerosins und die Trailertransporte des Wasserstoffs von den Elektrolyseuren zu den Wasserstofftankstellen mit 0,11, 0,27 respektive 0,29 Euro Wertschöpfung pro eingesetztem Euro. Die Trailertransporte sind jedoch, ebenso wie die Errichtung von Tankstellen, Voraussetzung dafür, dass eine Umrüstung von LKW und Bussen überhaupt erst erfolgt. Bei der Errichtung der Versuchsanlage zur Herstellung grünen Kerosins wurden uns bspw. im Vergleich zum Importterminal vergleichsweise hohe jährliche Kosten für Wartung und Instandhaltung mitgeteilt (8 % vs. 2 % der Investitionskosten bspw. beim Importterminal), so dass der Quotient regionale Wertschöpfung / eingesetztem Euro bei der Versuchsanlage deutlich geringer ausfällt.

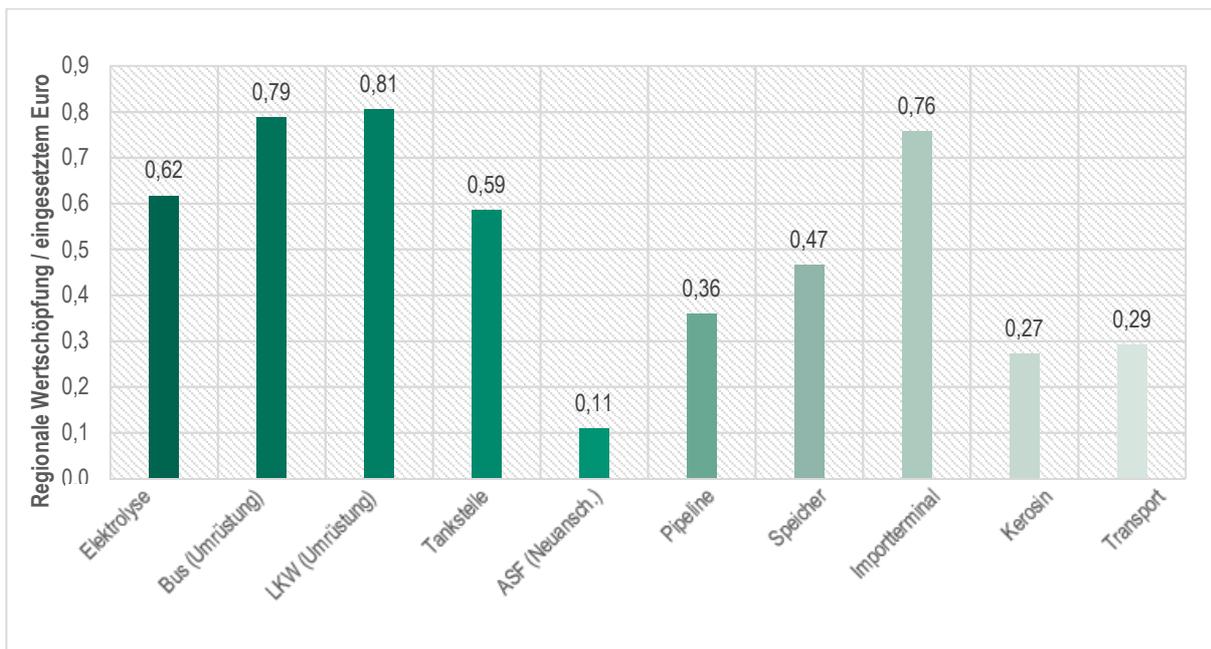


Abbildung 16: Regionale Wertschöpfung pro eingesetztem Euro, Technologien, Basisszenario, über die gesamte Betriebszeit

¹⁶ basierend auf heutigen Kosten

¹⁷ Hier wurde davon ausgegangen, dass bei Abfallsammelfahrzeugen keine Umrüstung erfolgt, sondern Neufahrzeuge von Außerhalb der Untersuchungsregion beschafft werden. Umgekehrt beziehen sich die Zahlen von Bussen und LKW ausschließlich auf Umrüstungen, und nicht auf Beschaffungen von neufahrzeugen von Außerhalb der Region.

4.2.2 SZENARIO NETZDIENLICHKEIT DER ELEKTROLYSEURE

Im Basisszenario wird für die Elektrolyseure eine Auslastung von jährlich 5.000 Vollbenutzungsstunden unterstellt. Um netzdienlich zu produzieren, müssen die Anlagen zu Zeiten von Engpässen ihren Strombezug reduzieren. Im Szenario „Netzdienlichkeit“ werden deshalb die 5.000 Vollbenutzungsstunden der Elektrolyseure um 30 % verringert („Netzdienlichkeit +“). Der Vollständigkeit halber wird auch die gespiegelte Option mit 30 % höheren Vollbenutzungsstunden, also einer entsprechend schlechteren Netzdienlichkeit als im Basisszenario („Netzdienlichkeit -“) mitbetrachtet. Die Variation der Vollbenutzungsstunden hat entweder 1. Auswirkungen auf die in der Region erfolgende Produktion von Wasserstoff oder 2. auf die Elektrolysekapazität, die erforderlich ist, um eine bestimmte Menge Wasserstoff in der Region zu produzieren. In der Berechnung werden die Auswirkungen auf die Wasserstoffproduktion betrachtet. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Mengen an produziertem Wasserstoff in den verschiedenen Szenarien.

Tabelle 5: Wasserstoffproduktion in Tonnen Wasserstoff (t H₂) in den Szenarien

| | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Basisszenario | 3.500 | 11.900 | 20.300 | 28.700 | 37.100 | 45.500 | 78.400 | 111.300 | 144.200 | 177.100 | 210.000 |
| Netzdienlichkeit niedriger (-) | 4.550 | 31.395 | 58.240 | 85.085 | 111.930 | 138.775 | 165.620 | 192.465 | 219.310 | 246.155 | 273.000 |
| Netzdienlichkeit höher (+) | 2.450 | 16.905 | 31.360 | 45.815 | 60.270 | 74.725 | 89.180 | 103.635 | 118.090 | 132.545 | 147.000 |

Die Verringerung bzw. die Erhöhung der jährlichen Menge an produziertem Wasserstoff wirkt sich über Veränderungen der Höhe der Betriebsmittelkosten und der Erträge aus dem Wasserstoffverkauf auf die regionale Wertschöpfung aus.

Welche Auswirkung eine Verringerung oder Erhöhung der Vollbenutzungsstunden der Elektrolyseure und demnach die jährliche Menge an verkauftem Wasserstoff auf die Wertschöpfung hat zeigt Abbildung 17.

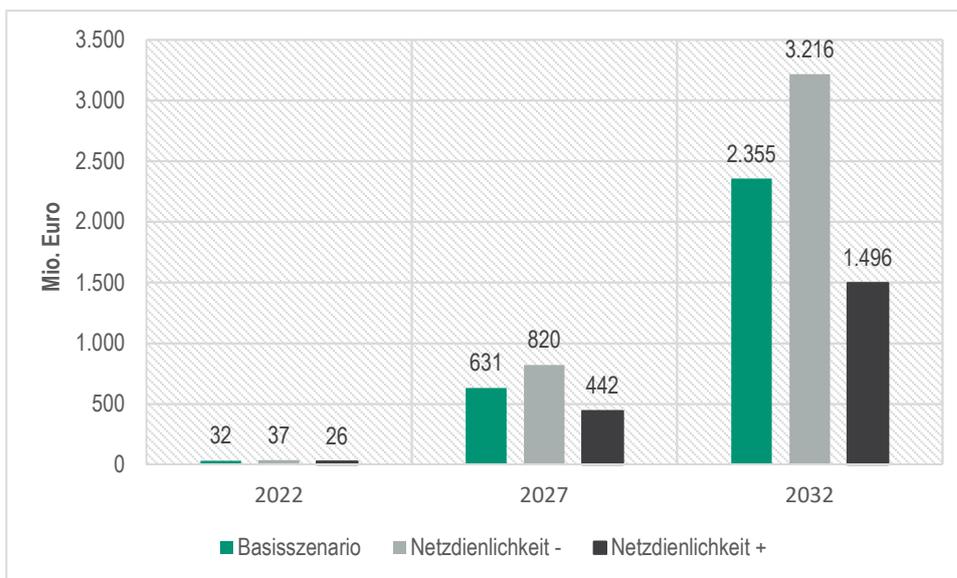


Abbildung 17: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Netzdienlichkeit, kumuliert

Eine Veränderung der Netzdienlichkeit um 30 % führt dazu, dass die regionale Wertschöpfung zu Beginn um rund 17 % höher bzw. niedriger ausfällt als im Basisszenario. Die Differenz der regionalen Wertschöpfung zwischen dem Basisszenario und den beiden Szenarien „Netzdienlichkeit (+ / -)“ steigt im Zeitverlauf an. Im Jahr 2032 generiert das

Szenario, in dem die Netzdienlichkeit verringert wird, rund 37 % mehr Wertschöpfung als im Basisszenario; im Szenario, in dem die Netzdienlichkeit erhöht wird, dementsprechend 37 % weniger. Ein Anstieg (Rückgang) der Wasserstoffproduktion führt dazu, dass die Betriebsmittelkosten ansteigen (sinken). Gleichzeitig wirkt die Änderung auf die Menge des verkauften Wasserstoffs und damit auf die regional verbleibenden Gewinne und Steuerzahlungen. Zu Beginn überwiegt der Effekt der steigenden Betriebsmittelkosten (Netzdienlichkeit -) den Effekt eines höheren Wasserstoffverkaufserlöses, so dass von den 30 % Anstieg in der Wasserstoffproduktion und dem Verkauf nur knapp die Hälfte auf die regionale Wertschöpfung wirkt. In den darauffolgenden Jahren überwiegen die Erträge aus dem Wasserstoffverkauf die Betriebskosten und aus einem 30 % „Mehr“ an Wasserstoff, resultiert eine mehr als 30 % höhere regionale Wertschöpfung als im Basisszenario.

Effekte auf die regionale Beschäftigung sind nicht zu beobachten, da sich die Beschäftigtenzahlen auf die Kostengrößen beziehen. Zwar ändern sich die Betriebsmittelkosten, doch diese sind nur zu einem geringen Prozentsatz regional verortet.

4.2.3 SZENARIO DEZENTRALERE ELEKTROLYSEURE

Für das Basisszenario wird angenommen, dass sich die Elektrolyseure zentral an wenigen Orten in der Region befinden (vgl. Abbildung 4 bis Abbildung 6). Dies entspricht den sich aktuell abzeichnenden Entwicklungen hin zu großen Anlagen: Davon ausgehend, dass maßgebliche Teile des Wasserstoffbedarfs - für Hamburg und Schleswig-Holstein gemäß (MELUND, 2021, S. 30) im Jahr 2030 etwa zwei Drittel - auf die Industrie entfallen und es sich dabei um wenige Großverbraucher handelt, spricht vieles dafür, dass auch die Herstellung des von diesen zu nutzenden Wasserstoffs, sofern dieser nicht von außerhalb Deutschlands importiert wird, in großen und i. d. R. verbrauchsnahe Elektrolyseuren erfolgen wird. Deren Größe kann dann zur Versorgung von weiteren Sektoren geringfügig angepasst werden, anstatt beispielsweise für den Verkehrssektor eigene kleinere Elektrolyseure zu errichten.

Im Szenario „Dezentrale Elektrolyseure“ soll dennoch betrachtet werden, wie es sich auswirkt, wenn bei insgesamt unveränderter Gesamtleistung der Elektrolyse sich die Anzahl der Elektrolyseure aus dem Basisszenario erhöht, die Leistung der einzelnen Elektrolyseure dafür aber entsprechend geringer ausfällt. Dazu ist die Veränderung der Kostenstruktur zu betrachten. Diese wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, die letztlich in jedem konkreten Einzelfall betrachtet werden müssen:

- Mengenrabatte für die Stacks, die den Kern der Elektrolyse bilden,
- Anlagenperipherie (Wasseraufbereitung, Wasserstoffreinigung, Kompressoren, Kühlung etc.),
- erforderliche lokale Speicherkapazitäten,
- Netzanschlusskosten für die Strombereitstellung,
- Grundstückskosten,
- Infrastrukturkosten für Zuwegungen, Einzäunungen etc.,
- Übergabe-Infrastruktur für den Wasserstoff (Netzinspeisung oder Trailerabfüllstation),
- ggf. Einbindung in bestehende Industrieanlagen (z. B. in der Chemischen Industrie) mit Basisinfrastruktur für Personal, Wartung etc.

und anderes mehr. Neben den Investitionskosten können auch die laufenden Kosten, insbesondere für den Strombezug, von der Größe des Elektrolyseurs abhängen. Insgesamt ist also mit höheren Kosten einer dezentraleren Erzeugungsinfrastruktur zu rechnen. Positiv auf die Kosten einer dezentraleren Elektrolyse dürften sich dagegen die geringeren Transportwege von Trailertransporten, etwa zu Tankstellen, auswirken.

(dena, 2015, S. 12) geht davon aus, dass die Kosten kleinerer Elektrolyseuren um bis zu 40 % über denen größerer liegen können. Dies beinhaltet allerdings auch eine mögliche Methanisierung. Um eine exemplarische Betrachtung möglicher regionalwirtschaftlicher Effekte vornehmen zu können, wählen wir im Folgenden die Annahme, dass die

Kosten einer dezentraleren Elektrolyse um 20 % über denen des Basisszenarios liegen. Da vieles der o. g., in dezentraleren Szenarien mehrfach herzurichtenden Infrastruktur regional bereitgestellt werden kann, gehen wir ferner davon aus, dass von diesen Mehrkosten drei Viertel in der Region verbleiben.

Insgesamt fällt die regionale Wertschöpfung im Szenario Dezentrale Elektrolyseure geringer aus als im Basisszenario. In der Abbildung 18 ist die jährliche regionale Wertschöpfung durch die Wasserstoffaktivitäten in den beiden Szenarien dargestellt. Während die Wertschöpfung in den beiden Szenarien zu Beginn des Betrachtungszeitraums noch ähnlich ausfällt, wird im Basisszenario im Jahr 2027 rund 13 Mio. Euro und im Jahr 2032 rund 40 Mio. Euro mehr regionale Wertschöpfung generiert. Die höheren Investitionskosten führen bei den Kostenpositionen, die sich aus den Investitionskosten ableiten (z.B. Kosten für Rechts- und Steuerberatung sowie Versicherung) ebenfalls zu höheren Kosten, wodurch sich die in der Region verbleibende Gewinne und Steuerzahlungen verringern, was negativ auf die regionale Wertschöpfung wirkt.

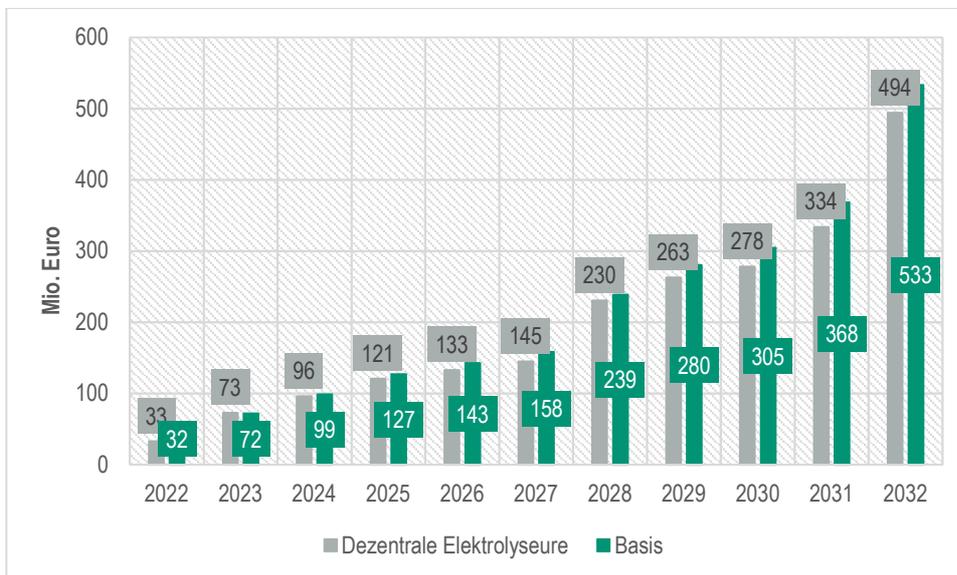


Abbildung 18: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Szenario der Dezentralen Elektrolyseure

Die regionalen Beschäftigungseffekte fallen im Szenario dezentralerer Elektrolyseure dagegen deutlich höher aus als im Basisszenario (siehe Abbildung 19). Auf der einen Seite führt die Reduzierung der jährlichen Fahrleistung dazu, dass weniger Personal benötigt wird. Dies wird aber durch den deutlich höheren Personalbedarf für Errichtung und Betrieb der Elektrolyseure überkompensiert. Die 20 % höheren Kosten verbleiben entsprechend der getroffenen Annahme zu 75 % in der Region und führen somit zu einem höheren regionalen Personalbedarf als im Basisszenario. Dieser bewegt sich bis zur Mitte des Betrachtungszeitraums zwischen 50 und 120 VZÄ und bis zum Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2032 bis zu 300 VZÄ.

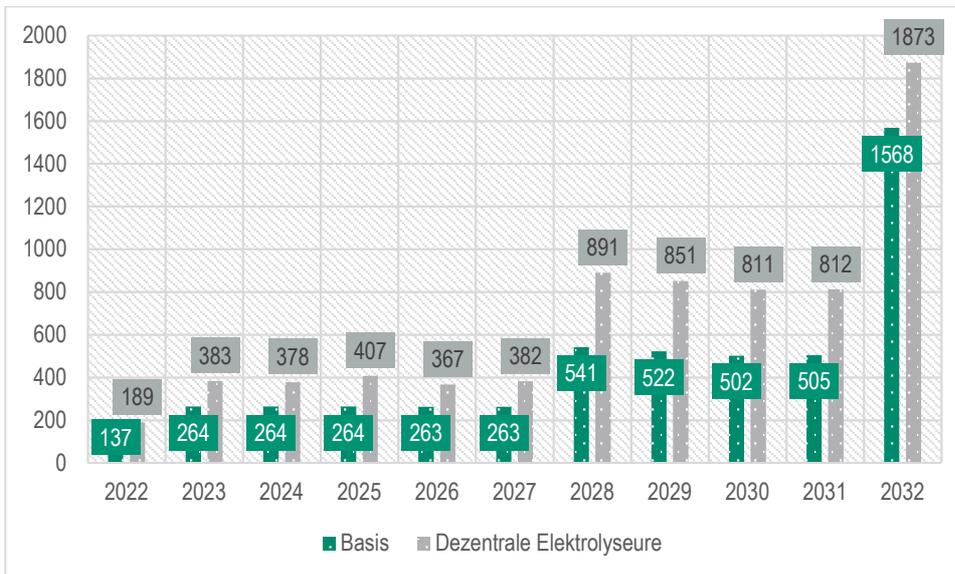


Abbildung 19: Regionale Beschäftigung, gesamt, Basisszenario und Szenario der Dezentralen Elektrolyseure

4.2.4 SZENARIO FÖRDERUNG

Um zu berechnen, wie eine finanzielle Förderung in Höhe von 50 % auf die regionale Wertschöpfung und die Region Unterelbe wirkt, wurden die Investitionskosten für jede Technologie um 50 % reduziert. Für die Berechnung der Betriebskosten wurden weiterhin die Investitionskosten des Basisszenarios als Grundlage angesehen, da diese als Anteil an den Investitionskosten angesehen werden, unabhängig davon, von wem die Kosten getragen werden. Was allerdings durch die Förderung direkt beeinflusst wird, sind die Tilgungszahlungen, da lediglich 50 % der ursprünglichen Investitionskosten getilgt werden müssen. Hieraus resultiert wiederum, dass sich die Höhe der regionalen Gewinne verändert, da die Gesamtbetriebskosten niedriger ausfallen als im Basisszenario. Betrachtet werden dabei Bruttoeffekte. Eine Förderung der Wasserstoffwirtschaft könnte - insbesondere wenn sie aus regionalen Mitteln (z. B. des jeweiligen Bundeslandes) erfolgt - bedeuten, dass eine Förderung in anderen Bereichen in der Region möglicherweise wegfällt, mit den dazugehörigen regionalen Wertschöpfungseffekten. Dies wird nicht betrachtet.

In Abbildung 20 wird deutlich, dass die Effekte auf die regionale Wertschöpfung über den gesamten Zeitraum betrachtet im Vergleich zum Basisszenario gering ausfallen. Die Wertschöpfung liegt im Szenario „Förderung“ kumuliert rund 140 Mio. Euro niedriger als im Basisszenario.

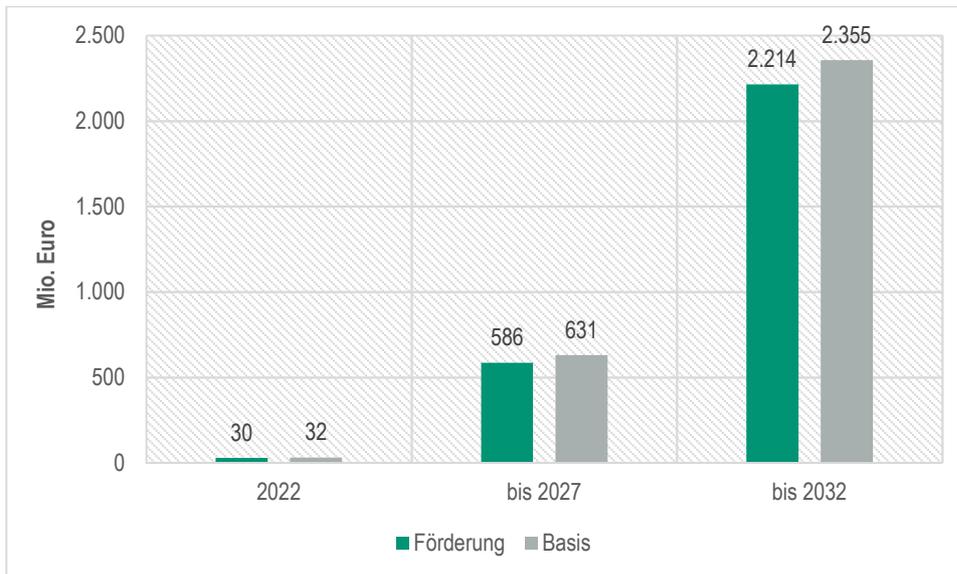


Abbildung 20: Regionale Wertschöpfung, gesamt, Basisszenario und Förderung, kumuliert

Die regionale Beschäftigung wird durch die Förderung nicht beeinflusst, da immer noch die gleiche Anzahl an Arbeitskräften benötigt wird, um die Kapazitäten aufzubauen und den Betrieb zu gewährleisten.

Nicht berücksichtigt ist bei dieser Betrachtung allerdings die Frage, inwiefern die Projekte ohne externe Förderung überhaupt realisiert würden. Insofern ist der entscheidende Effekt der Förderung weniger die im hier vorgegebenen Betrachtungsrahmen quantifizierbare Auswirkung auf Wertschöpfung und Beschäftigung.

4.3 SENSITIVITÄTSANALYSEN

Wie bereits beschrieben, unterliegen dem Basisszenario Annahmen bzgl. verschiedener Parameter. Diese Annahmen werden variiert, um einen Einblick zu bekommen, wie stark bzw. wie sensibel die Berechnungsergebnisse auf die Variation der Parameter (Annahmen) reagieren.

Zwei Variationen beziehen sich direkt auf die Elektrolyseaktivitäten. In der Variante „regionale Elektrolyse-Installateure“ wird der regionale Anteil der Unternehmen, die mit der Errichtung der Elektrolyseure betraut sind, von 20 % im Basisszenario auf 80 % erhöht. Darüber hinaus wird in der Variante „Unternehmenssitze“ davon ausgegangen, dass der oder die Betreiber der Elektrolyseure nicht mehr zu 100 % in der Region sitzen, sondern lediglich noch zu 50 %.

Abbildung 21 bietet einen Überblick über die regionale Wertschöpfung (kumulierte Werte) des Basisszenarios sowie der zwei Variationen. Wie erwartet führt eine Erhöhung des regionalen Anteils der Unternehmen, die die Elektrolyseure errichten, zu einem positiven Effekt auf die regionale Wertschöpfung im Vergleich zum Basisszenario. Rund 600 Mio. Euro kann über den gesamten Zeitraum an regionaler Wertschöpfung mehr generiert werden, wenn regionale Unternehmen Expertise in den Aktivitäten rund um die Errichtung von Elektrolyseuren mitbringen und sich darin engagieren. Eine regionale Wertschöpfung von rund 2,4 Mrd. Euro allein im Bereich der Elektrolyse steht einer Wertschöpfung von rund 1,8 Mrd. Euro im Basisszenario gegenüber.

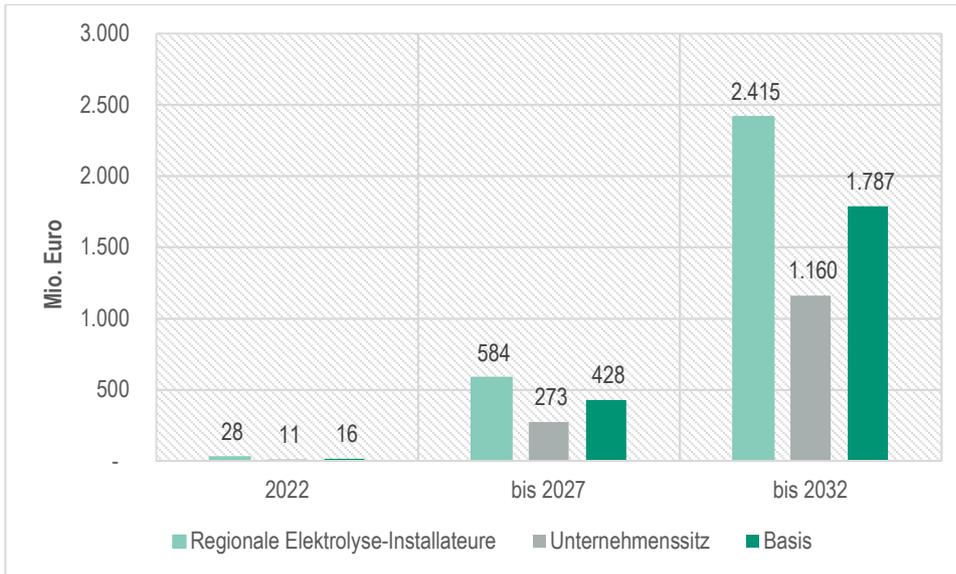


Abbildung 21: Regionale Wertschöpfung Elektrolyse, gesamt, Basisszenario und Varianten, kumuliert

Die Erhöhung des regionalen Anteils hat positive Effekte auf die direkte Wertschöpfung, da ein höherer Anteil der Gewinne in der Region verbleibt und daraus abgeleitet ebenfalls mehr Steuern. Darüber hinaus erwirtschaften die Arbeitskräfte in der Region mehr Einkommen, wenn man davon ausgeht, dass nicht nur die Installationsunternehmen ihren Sitz in der Region haben, sondern ebenfalls das Arbeitskräftepotenzial der Region beanspruchen. Als indirekter Effekt verbleibt ein höherer Anteil der wertschöpfungsrelevanten Einkommen in der Region ebenso wie die von den regionalen Arbeitskräften gezahlten Einkommenssteuern.

Deutliche Effekte sind beim Vergleich der regionalen Beschäftigung im Basisszenario und in der Variante „Regionale Elektrolyse-Installateure“ zu beobachten (siehe Abbildung 22). Die Vervierfachung des regionalen Anteils der Installationsunternehmen von 20 % auf 80 % schlägt sich in fast genau dem gleichen Umfang auf die regionale Beschäftigung nieder. Im gesamten Zeitraum werden in der Variante „Regionale Elektrolyse-Installateure“ ca. 11.200 Vollzeitäquivalente für die Aktivitäten rund um die Elektrolyse benötigt. Bis zur Mitte des Betrachtungszeitraums 2027 sind es ca. 3.000 Vollzeitäquivalente.

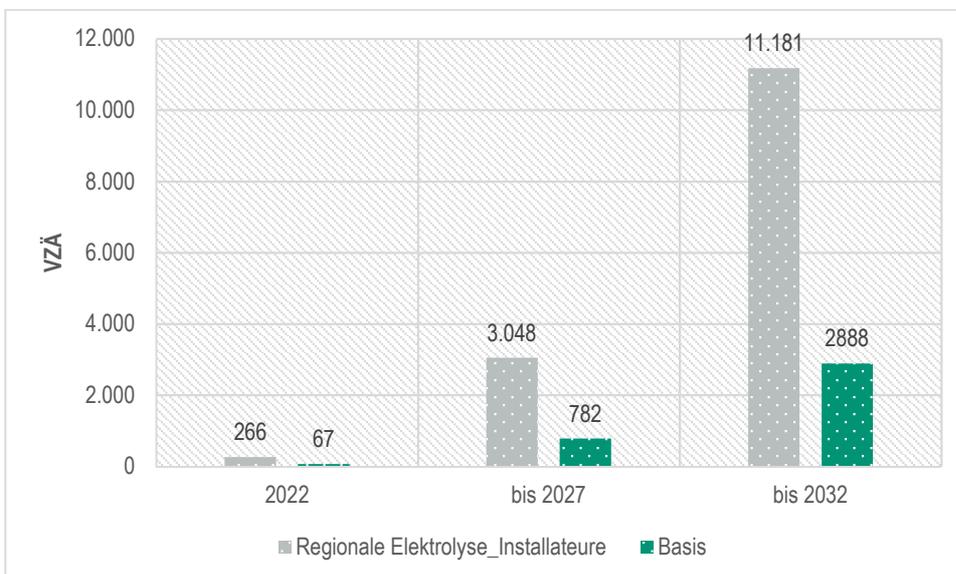


Abbildung 22: Regionale Beschäftigung, gesamt, Basisszenario und Variante Regionale Elektrolyse-Installateure, kumuliert

Die Auswirkungen auf die regionale Beschäftigung bei der Variation „Unternehmenssitze“ im Vergleich zum Basisszenario sind verschwindend gering, da sich der Faktor in welchem Umfang der bzw. die Betreiber in der Region Unterelbe sitzt / sitzen lediglich auf die Gewinne und Steuerzahlungen auswirkt und nicht auf die Kostenpositionen, auf deren Basis wiederum die Beschäftigung berechnet wird. Dies folgt der Annahme, dass auch Unternehmen, die ihren Sitz nicht in der Region Unterelbe haben, für den Betrieb trotzdem Personal aus der Region beschäftigen.

Wie in Abbildung 21 dargestellt ist, sind aber auch in der Variante „Unternehmenssitze“ Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung zu beobachten. Da nur die Hälfte der durch den Verkauf des Wasserstoffs eingenommenen Erlöse in der Region verbleiben - im Gegensatz zu den 100 % des Basisszenarios - fallen die Gewinne und den aus den Gewinnen abgeleiteten regionalen Steuereinnahmen geringer aus. Insgesamt fällt die regionale Wertschöpfung in der Variante „Unternehmenssitze“ bis zur Mitte des Beobachtungszeitraums um ca. 60 Mio. Euro geringer aus. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraums sind es mit knapp 1,2 Mrd. Euro im Vergleich zu den rund 1,8 Mrd. Euro im Basisszenario rund 0,6 Mrd. Euro weniger.

Zwei weitere Varianten werden darüber hinaus gerechnet. In der Variante „Marge“ wird die Annahme getroffen, dass eine höhere Marge von 8 % im Vergleich zu 3 % im Basisszenario für die Unternehmen, die mit der Errichtung / Installation und Umrüstung von Anlagen, Betriebsstätten und Fahrzeugen betraut sind, in den Kosten enthalten ist. Dies betrifft somit alle Aktivitäten, die im Basisszenario abgebildet werden mit Ausnahme des Transports des Wasserstoffs vom Elektrolyseur zu den Tankstellen. Abschließend werden die Kosten für Verwaltung, Versicherung, Recht- und Steuerberatung sowie Sonstiges als Teil der Betriebskosten („nicht spezifische Betriebskosten“) verändert. Im Basisszenario liegen diese je nach Komponente zwischen 0,5 % und 1 %. In der Variante „nicht spezifische Betriebskosten“ wird diese für jede Komponente auf 3 % erhöht.

Die Ergebnisse des Basisszenarios reagieren weniger sensitiv auf die Erhöhung der Gewinnmarge und der nicht spezifischen Betriebskosten. Die Erhöhung der Gewinnmarge führt dazu, dass bis 2027 rund 30 Mio. Euro mehr an regionaler Wertschöpfung generiert werden als im Basisszenario. Für den gesamten Zeitraum bis 2032 liegt die Differenz der Wertschöpfung zwischen dem Basisszenario und der Variante „Marge“ bei rund 100 Mio. Euro. Die Erhöhung der spezifischen Betriebskosten führt zu rund 20 Mio. weniger regionaler Wertschöpfung bis 2027 und insgesamt rund 390 Mio. Euro bis 2032.

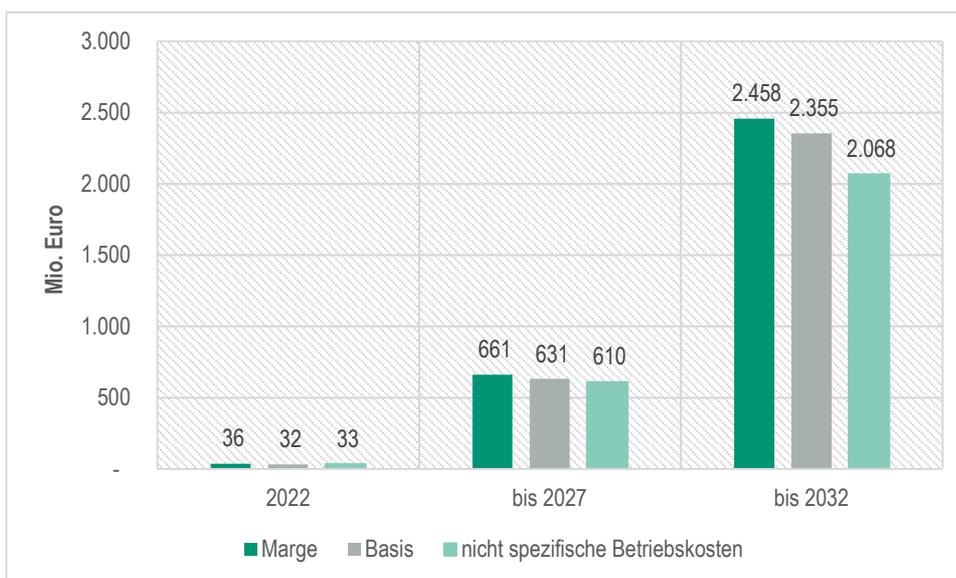


Abbildung 23: Regionale Wertschöpfung, kumuliert, Basisszenario und Varianten Marge / nicht spezifische Betriebskosten

Die Differenz in der Wertschöpfung steigt insbesondere zwischen dem Basisszenario und der Variante der nicht spezifischen Betriebskosten an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Betriebskosten sich im Zeitablauf aufsummieren.

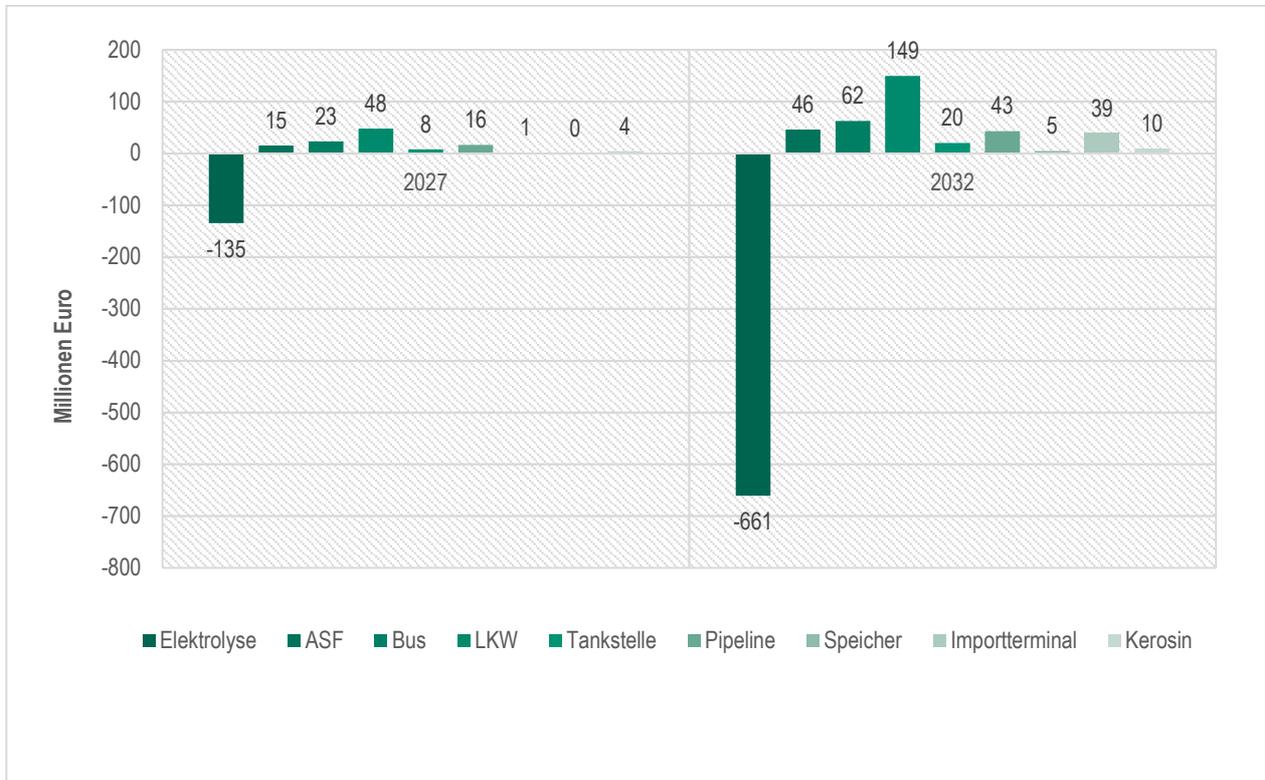


Abbildung 24: Differenz regionale Wertschöpfung, Basisszenario und Variante „nicht spezifische Betriebskosten“, kumuliert bis zum Jahr 2032

In Abbildung 24 ist die Differenz der regionalen Wertschöpfung zwischen der Variante „nicht spezifische Betriebskosten“ und dem Basisszenario abgebildet. Besonders deutlich ist die Differenz bei der Elektrolyse, die zwischen -3 Mio. Euro im Jahr 2022 liegt¹⁸ und kumuliert bis zum Jahr 2032 über -660 Mio. Euro beträgt. Alle anderen Komponenten profitieren von der Erhöhung der Betriebskosten. Am stärksten profitiert die Umrüstung der LKW und Busse von der Erhöhung der Kosten. Die positiven Auswirkungen steigender Kosten auf die regionale Wertschöpfung ist damit zu begründen, dass, mit Ausnahme der Elektrolyse, Aktivitäten im Betrieb (z.B. Verkauf des Wasserstoffs an den Tankstellen) nicht berücksichtigt werden. Zwar werden bei allen Aktivitäten Gewinnmargen berücksichtigt, per Definition werden von diesen die Gesamtbetriebskosten nicht abgezogen. Dies bedeutet, dass die Erhöhung der Betriebskosten nur im Falle der Elektrolyse Gewinne (durch den Verkauf des Wasserstoffs) schmälert und dazu führt, dass die Wertschöpfung in der Variante „nicht spezifische Betriebskosten“ niedriger ausfällt als im Basisszenario.

Die Auswirkungen auf die direkte Beschäftigung unterscheiden sich weder bei der Variante „Marge“ noch bei der Variante „nicht spezifische Betriebskosten“ von den Effekten des Basisszenarios, da die Investitionskosten nicht durch die Varianten berührt werden. Anders ist es bei den indirekten Beschäftigungseffekten. Diese entwickeln sich anders als im Basisszenario (Abbildung 25).

¹⁸ Zur besseren Übersichtlichkeit ist die sehr geringe Differenz in den Jahren 2022 nicht abgebildet.

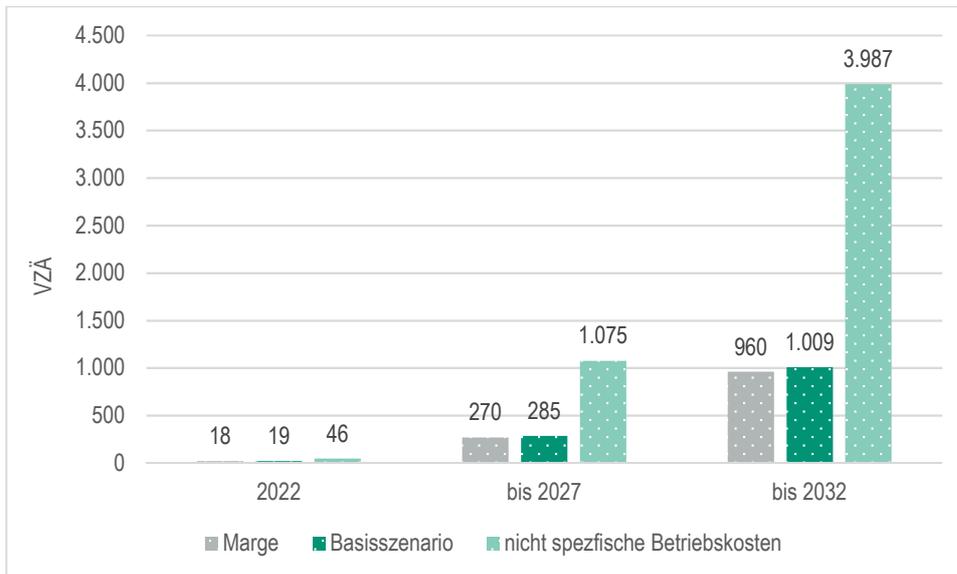


Abbildung 25: Regionale indirekte Beschäftigung, Basisszenario und Varianten Marge / nicht spezifische Betriebskosten, kumuliert bis zum jeweils angegebenen Jahr

Besonders auffällig ist dabei die regionale indirekte Beschäftigung in der Variante „nicht spezifische Betriebskosten“, in der die Wasserstoffaktivitäten kumuliert zu fast 4.000 Beschäftigten führen und somit deutlich mehr Beschäftigung generieren als im Basisszenario mit gut 1.000 VZÄ. Die Beschäftigung in der Variante „Marge“ liegt nahe an den Beschäftigungseffekten des Basisszenarios und fällt leicht geringer aus. Der gleiche Output wird demzufolge mit weniger Beschäftigten erbracht, was entweder Druck auf die Produktionsabläufe bedeuten kann oder dass nicht mehr Beschäftigte für den Output erforderlich sind und die marktüblichen Preise diese Marge beinhalten.

Von allen Aktivitäten weisen diejenigen rund um die Elektrolyse die stärkste Differenz zu den regionalen Beschäftigungseffekten des Basisszenarios auf (siehe Abbildung 26). Kumuliert sind am Ende des Betrachtungszeitraums in der Variante der „nicht spezifischen Betriebskosten“ rund 1.560 Vollzeitäquivalente mehr mit den Tätigkeiten rund um Errichtung und Betrieb der Elektrolyseure beschäftigt als im Basisszenario. Zurückzuführen ist dies auf die hohen Kosten der mit der Elektrolyse in Verbindung stehenden Aktivitäten. Danach folgt die Umrüstung der LKW und Busse.

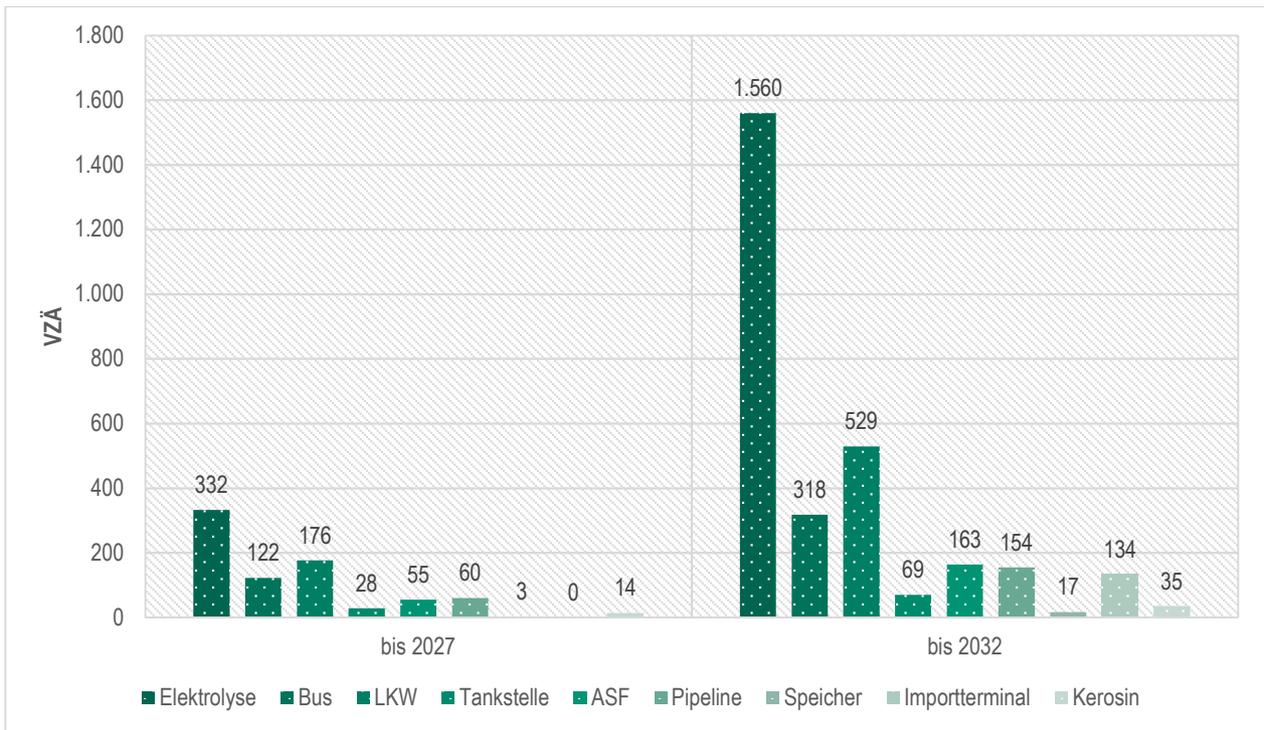


Abbildung 26: Differenz regionale indirekte Beschäftigung, Technologien, Basisszenario und Variante „nicht spezifische Betriebskosten“, kumuliert bis zum jeweils angegebenen Jahr

5 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in der Region Unterelbe birgt erhebliches Potenzial für die regionale Wertschöpfung und die regionale Beschäftigung. Es werden in der Region unter den getroffenen Annahmen zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft durch Investitionen von rund 130 Mio. Euro im Jahr 2022 bis rund 1,1 Mrd. Euro im Jahr 2032 jährlich rund 30 Mio. (2022) bis 530 Mio. Euro (2032) an Wertschöpfung generiert. Kumuliert verzeichnet die Region Unterelbe im Betrachtungszeitraum zwischen 2022 und 2032 eine wasserstoffbezogene Wertschöpfung von rund 2,35 Mrd. Euro. Wesentlicher Treiber sind dabei Installation und Betrieb der Elektrolyseure (Wasserstoffverkauf), deren gemeinsamer Anteil an der gesamten regionalen Wertschöpfung zwischen 50 und 76 % liegt. Zurückzuführen ist dies auch darauf, dass es sich dabei insgesamt um die kostenintensivste Komponente handelt. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass Berechnungen der Wertschöpfungskette nie vollständig sein können, sondern aus methodischen Gründen immer ab einer bestimmten Tiefe abgeschnitten werden, so dass die reale Wertschöpfung höher ausfällt.

Sensitivitätsanalysen haben dabei gezeigt, dass es nicht nur relevant ist, ob Unternehmen aus der Region die Aufträge für anstehende Arbeiten an Installation sowie Wartung und Betrieb erhalten, sondern dass auch der Unternehmenssitz der Firmen, die beispielsweise die Elektrolyse betreiben, in der Region liegt. Wird bei den Elektrolyseuren davon ausgegangen, dass der Firmensitz der Betreiber nicht zu 100, sondern lediglich zu 50 % in der Region liegt, sinkt die bis 2021 kumulierte regionale Wertschöpfung um mehr als ein Drittel bzw. mehr als 600 Mio. Euro.

Bezogen auf die regionale Wertschöpfung pro eingesetztem Euro sind die Potenziale bei der Umrüstung von LKW und Bussen mit konventionellem Antrieb hin zu einem Brennstoffzellenantrieb am größten (0,81 bzw. 0,79 Euro pro eingesetztem Euro), sofern diese Umrüstung in der Region erfolgt. Ebenfalls sehr hoch ist sie bei der Errichtung eines Wasserstoff-Importterminals (0,76 Euro) und der Errichtung der Elektrolyseure sowie dem Wasserstoffverkauf (0,62 Euro). Sehr gering sind die Effekte der Beschaffung von Fahrzeugen von außerhalb der Region, hier betrachtet am Beispiel der Beschaffung neuer Abfallsammelfahrzeuge, die außerhalb der Region produziert werden (0,11 Euro pro eingesetztem Euro). Ähnliche Verhältnisse dürften gegeben sein, wenn Busse oder LKW als Neufahrzeuge oder nach Umrüstungen von außerhalb der Region beschafft werden, bzw. umgekehrt bei einer ebenfalls möglichen Umrüstung von Abfallsammelfahrzeugen in der Region.

Die mit den Aktivitäten verbundenen Beschäftigtenzahlen belaufen sich auf über 100 Vollzeitäquivalente in 2022 und steigen sukzessive auf über 500 in 2031. Durch den für das Jahr 2032 angenommenen Bau eines Wasserstoff-Importterminals würde die Zahl der Beschäftigten sprunghaft auf über 1.500 steigen, wobei es sich zu einem großen Teil um baubedingte temporäre Auswirkungen handelt.

Auch die Trailertransporte von den Elektrolyseuren zu den Wasserstofftankstellen leisten mit 0,29 Euro pro investiertem Euro nur einen geringen regionalen Beitrag. Sie sind jedoch Voraussetzung dafür, dass der Verkauf von Wasserstoff insbesondere im Verkehrssektor oder die Umrüstung von Fahrzeugen überhaupt erst stattfinden.

Der primäre Treiber des Aufbaus von Wasserstoff-Anwendungen, -Erzeugungen und -Infrastrukturen ist dabei nicht die regionale Wertschöpfung, sondern die Erreichung der deutschen Klimaschutzziele. Diese setzt eine Weiterentwicklung der Sektorenkopplung voraus, bei der Wasserstoff neben dem deutlichen Ausbau der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ein Schlüsselement ist. Ziel der Region Unterelbe sollte es dann jedoch sein, aus diesen ohnehin erforderlichen Maßnahmen die höchstmögliche regionale Wertschöpfung zu ziehen.

Fazit ist, dass zur Generierung möglichst umfangreicher regionaler Effekte verschiedene strategische Ausrichtungen zu beachten sind:

- Der in der Region Unterelbe produzierte Strom sollte nach Möglichkeit nicht als solcher in andere Regionen Deutschlands oder Europas exportiert werden, sondern im Rahmen der gegebenen Absatzpotenziale, die u. a. davon abhängen, wo der Einsatz von Wasserstoff energiewirtschaftlich sinnvoller ist als direkte Stromnutzungen, hier zu Wasserstoff veredelt werden. Der Betrieb der Elektrolyseure und des Verkaufs von Wasserstoff ist einer der maßgeblichen Wertschöpfungstreiber der Wasserstoffwirtschaft.
- Das Beispiel der Umrüstung von Fahrzeugen zeigt, dass es von entscheidender Bedeutung ist, nicht nur den Betrieb einer Wasserstoffwirtschaft in der Region zu haben, sondern möglichst auch die Fertigung von Komponenten einer Wasserstoffwirtschaft - seien es die Montage von Fahrzeugen oder der Bau von Elektrolyseuren, Brennstoffzellen oder anderen Bausteinen - sowie entsprechende Dienstleistungen. Hier beschränkt sich das Potenzial der betrachteten Region bisher nach Einschätzung der Auftraggeber im Wesentlichen auf ein Unternehmen, das die Umrüstung von Diesel- zu Wasserstofffahrzeugen anbietet.
- Ebenfalls von hoher Relevanz ist die Verortung von Unternehmenssitzen in der Region, hier untersucht am Beispiel der Elektrolyseure. Eine Verlagerung führt dazu, dass auch maßgebliche Teile der Wertschöpfung an anderen Orten erfolgen.
- Um die beschriebenen Potenziale zu heben, müssen die infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden. Die beinhaltet z. B. die Errichtung der regionalen Komponenten des European Hydrogen Backbone, insbesondere der Pipelines von Stade nach Brunsbüttel und von Stade nach Hamburg mit Anbindung an einen bundes- und europaweites Netz. Bestandteil der Infrastruktur und hinsichtlich der Wertschöpfung besonders relevant wäre dabei die Errichtung eines Wasserstoff-Importterminals, von dem die gesamte Region profitieren würde. Damit stellt sich die Frage, ob trotz divergierender kleinräumlicher Interessen ein koordiniertes Vorgehen in Abgrenzung zu den Bemühungen der überregionalen Wettbewerber etwa in den Niederlanden möglich ist.
- Um in den einzelnen Hubs eine Realisierung der Potenziale voranzubringen, ist es wichtig, die jeweils verfügbaren regionalen Akteure (ÖPNV, Abfallwirtschaft, Speditionen, Unternehmen mit Verteilverkehren etwa aus dem Einzelhandel, industrielle Anwender von Wasserstoff etc.) zu einem koordinierten Aufbau der regionalen Wasserstoffwirtschaften zusammenzubringen. Entscheidend ist dabei die Generierung und Koordination der (anfänglichen) regionalen Wasserstoffnachfrage. Sofern in den einzelnen Regionen ein für den Aufbau der regionalen Infrastruktur (Tankstellen, gewerbliche Annahmestationen etc.) ausreichender Wasserstoff-Bedarf absehbar ist, dürfte die Bedienung dieser Nachfrage mittelfristig keine Hürde mehr darstellen.

Welcher Effekt der Import von Wasserstoff langfristig auf die Wasserstoffproduktion und deren Wertschöpfung in der Region haben könnte, war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Angesichts der im Vergleich zum Energiebedarf begrenzten Potenziale zur Erzeugung von grünem Strom und Wasserstoff in Deutschland dürfte ein Import für eine vollständige Dekarbonisierung Deutschlands langfristig unvermeidbar sein; die hier dargestellten Zahlen verdeutlichen jedoch, dass es erstrebenswert ist, auch eine einheimische Produktion von Wasserstoff aufzubauen, basierend auf einer möglichst umfangreichen Erzeugung von Strom aus regenerativen Energieträgern.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- BMWi. (Juni 2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin. Abgerufen am 19. Mai 2021 von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20
- Branchenportal Offshore-Windindustrie. (11. Januar 2021). Ausbaulücke: Kein Offshore-Windpark in Deutschland mehr im Bau. Abgerufen am 4. Mai 2021 von <https://www.offshore-windindustrie.de/windparks/deutschland>
- ChemCoast. (13. August 2012). Fahrplan zur Realisierung einer Windwasserstoff-Wirtschaft in der Region Unterelbe. Abgerufen am 28. Mai 2021 von https://www.chemcoast.de/uploads/130812_ChemCoast_Windwasserstoff_Unterelbe.pdf
- Coon, R. C., Hodur, N. M., & Bangsund, D. A. (2012). *Renewable energy industries' contribution to the North Dakota economy (No. 1187-2016-93699)*.
- dena. (November 2015). *Systemlösung Power to Gas - Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife*. Abgerufen am 19. Juli 2021 von https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9096_Fachbroschuere_Systemloesung_Power_to_Gas.pdf
- EEK.SH. (2021). Kompetenzbereich Windenergie. Abgerufen am 4. Juni 2021 von <https://www.eek-sh.de/de/wind.html>
- Enagás, Energinet et al. (Juni 2020). European Hydrogen Backbone. Abgerufen am 09. März 2021 von https://www.ontras.com/fileadmin/Dokumente_Newsroom/Presseinformationen/20200715_European_Hydrogen_Backbone_Report.pdf
- Fraunhofer ISI. (21. Februar 2020). Integrierte Klimaschutz- und Energiewendeszenarien für Schleswig-Holstein 2030-2050. Abgerufen am 28. Mai 2021 von https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/Studie_Integrierte_Klimaschutz-_und_Energiewendeszenarien_2030-2050.pdf
- Heide, R. (kein Datum).
- Hirschl, B., Heinbach, K., Prahl, A., Salecki, S., Schröder, A., Aretz, A., & Weiß, J. (2015). *Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien-Ermittlung der Effekte auf Länder-und Bundesebene*.
- IHK Nord. (Januar 2021). Wasserstoffprojekte im Norden Deutschlands. Abgerufen am 03. März 2021 von <https://www.ihk-nord.de/blueprint/servlet/resource/blob/4946414/ce8effd17cdce8fc912793eefeb4ba8/wasserstoff-projekte-im-norden-stand-02-2021-data.pdf>
- IPP ESN. (6. September 2019). Potentialstudie Wasserstoffwirtschaft. Abgerufen am 4. Juni 2021 von https://ee-sh.de/de/dokumente/content/berichte_studien/2019-09-06_Potentialstudie-H2-NF-Endfassung-L-Web.pdf
- IPP ESN, Hypion, BBG. (Dezember 2020). Entwicklungspfade einer Wasserstoffwirtschaft an der Westküste. Abgerufen am 6. April 2021 von https://energiekueste.de/fileadmin/user_upload/downloads/Energiekueste_Studie_Entwicklungspfade_einer_Wasserstoffwirtschaft_an_der_Westkueste.pdf
- IWR Online. (19. März 2020). Stromverbrauch 2030. Abgerufen am 28. Mai 2021 von <https://www.iwr.de/news/gruene-fragen-regierung-nach-stromverbrauch-2030-und-elektrofuhrpark-news36650>

- Jenniches, S. (2018). *Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources—A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93.
- Kosfeld, R., Gückelhorn, F., Raatz, A., Wangelin, M., Duwe, T., Steinbrink, H., & Miosga, M. (2013). *Regionalwirtschaftliche Effekte der erneuerbaren Energien II: Einfluss der Regionalplanung und Raumordnung auf regionale Wertschöpfung*.
- Logistics, C. (kein Datum). Informationsaustausch am 13.04.2021.
- MELUND. (Februar 2021). H2-Erzeugung und Märkte Schleswig-Holstein. Abgerufen am 28. Mai 2021 von https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/E/energiewende/Downloads/Wasserstoff-Gutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, E. B. (April 2020). Energiewendebericht 2019. Abgerufen am 3. Mai 2021 von https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Presseinformationen/SI20_154.pdf
- Rutovitz, J., & Atherton, A. (2009). *Energy Sector Jobs to 2030: A Global Analysis*.
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. (23. November 2020). Statistik informiert ... Nr. 154/2020. Abgerufen am 28. Mai 2021 von https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Presseinformationen/SI20_154.pdf
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. (23. November 2020). Statistik informiert ... Nr. 155/2020. Abgerufen am 3. Mai 2021 von https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Presseinformationen/SI20_155.pdf
- STK Niedersachsen. (14. Juli 2020). Windenergieausbau in Niedersachsen voranbringen. Abgerufen am 6. April 2021 von <https://www.stk.niedersachsen.de/startseite/presseinformationen/olaf-lies-windenergieausbau-in-niedersachsen-voranbringen-land-will-den-ausbau-wieder-auf-kurs-bringen-190758.html>
- Stromnetz Hamburg. (o. J.). Energieportal Hamburg. Abgerufen am 28. Mai 2021 von <https://www.energieportal-hamburg.de/>
- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D. M. (2010). *Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?. Energy policy*, 38(2), 919-931.
- Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. (7. November 2019). *Norddeutsche Wasserstoffstrategie*. Abgerufen am 19. Mai 2021 von <https://www.hamburg.de/contentblob/13179812/f553df70f8655641>

7 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|----------------|---|
| ASF | Abfallsammelfahrzeug(e) |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| CUX | Landkreis Cuxhaven |
| EE | Erneuerbare Energien |
| Erz. | Erzeugung |
| H ₂ | Wasserstoff |
| HEI | Kreis Dithmarschen |
| HH | Freie und Hansestadt Hamburg |
| IFAM | Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung |
| IPP ESN | IPP ESN Power Engineering GmbH |
| IZ | Kreis Steinburg |
| MELUND | Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein |
| min. | mindestens |
| PI | Kreis Pinneberg |
| SH | Schleswig-Holstein |
| STD | Landkreis Stade |
| Vbh. | Vollbenutzungsstunde(n) |
| VZÄ | Vollzeitäquivalente |
| W + I | Wartung und Instandhaltung |
| WL | Landkreis Harburg |

8 ANHANG: ANNAHMEN

Tabelle 6: Annahmen bzgl. ausgewählter Kosten und weiterer Größen im Basisszenario

| Kategorie | Variablen | Einheit | 2.022 | 2.027 | 2.032 |
|----------------------------|------------------------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|
| Allgemeines | Fremdkapitalzins | [%] | 4,5% | 4,5% | 4,5% |
| | Wasserstoffpreis | [€/kg] | 7,6 | 6,4 | 5,5 |
| Pipeline | Länge | [km] | 0 | 110 | 110 |
| | Rohrleitungskosten pro m | [€/m] | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| | W + I gesamt | [€/a] | - | 5.500.000 | 5.500.000 |
| Elektrolyse | Investitionskosten | [€/kW] | 1.370 | 1.045 | 825 |
| | W + I gesamt | [€/a] | 2.397.500 | 27.072.500 | 99.575.875 |
| | Installierte Leistung | [kW] | 35.000 | 455.000 | 2.100.000 |
| | Betriebsmittel | [€/kW] | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | erzeugter Wasserstoff | [t H ₂] | 3.500 | 45.500 | 210.000 |
| | Stromverbrauch PEM | [kWh/kg] | 53 | 53 | 53 |
| | Strompreis EE | [ct/kWh] | 6,9 | 6,3 | 5,9 |
| | Stromkosten gesamt | [€] | 12.809.969 | 153.570.093 | 668.785.047 |
| | Wasserverbrauch | [l/kg] | 11 | 11 | 11 |
| | Wasserpreis Unterelbe | [€/m ³] | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| | Wasserkosten | [€/m ³] | 47.947 | 654.602 | 3.165.686 |
| | Betriebsmittelkosten gesamt | [€/a] | 12.857.915 | 154.224.696 | 671.950.732 |
| | Tankstelle | Investitionskosten | [€/Tankstelle] | 4.712.727 | 4.276.364 |
| Wartung und Instandhaltung | | [€/Tankstelle/a] | 164.945 | 149.673 | 134.400 |
| W + I gesamt | | [€/a] | 325.993 | 1.454.895 | 1.825.159 |
| LKW | Investitionskosten | [€] | 500.000 | 425.000 | 350.000 |
| | Wasserstoffverbrauch gesamt | [t H ₂] | 332 | 2.327 | 4.530 |
| | Betriebsmittelkosten gesamt | [€/a] | 2.526.720 | 14.912.970 | 25.004.696 |
| | W + I gesamt | [€/a] | 541.285 | 3.897.541 | 7.812.426 |
| Bus | Investitionskosten | [€] | 500.000 | 425.000 | 350.000 |
| | Wasserstoffverbrauch gesamt | [t H ₂] | 244 | 1.708 | 2.404 |
| | Wartung und Instandhaltung | [€/km] | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| | Betriebsmittelkosten gesamt | [€/a] | 1.854.239 | 10.943.912 | 13.272.130 |
| | W + I gesamt | [€/a] | 570.816 | 4.108.809 | 5.951.681 |
| ASF | Investitionskosten | [€] | 500.000 | 500.000 | 500.000 |
| | Wasserstoffverbrauch gesamt | [t H ₂] | 145 | 1.015 | 1.722 |
| | Betriebskosten | [€/a] | 775 | 775 | 775 |
| | Wasserstoffkosten gesamt | [€] | 1.101.489 | 6.501.102 | 9.507.034 |
| | W + I gesamt | [€/a] | 167.473 | 1.172.308 | 2.009.670 |
| Transport | Dieserverbrauch | [l/km] | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| | Kraftstoffkosten | [€/l] | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | Personalkosten Fahrer gesamt | [€/a] | 50.667 | 399.412 | 755.972 |

| | | | | | |
|----------------|--------------------------------|---------------------|-------------|---------|-------------|
| | Fahrleistung | [km/a] | 131.400 | 919.800 | 1.576.800 |
| | Betriebsmittelkosten gesamt | [€/a] | 91.980 | 643.860 | 1.103.760 |
| Industrie | Wasserstoffverbrauch Industrie | [t H ₂] | 2.222 | 13.333 | 35.556 |
| Verkehr | Wasserstoffverbrauch Verkehr | [t H ₂] | 721 | 5.050 | 8.656 |
| Export | Wasserstoffexport | [t H ₂] | 556 | 27.117 | 165.788 |
| Importterminal | Investitionskosten gesamt | [€] | | | 800.000.000 |
| | W + I gesamt | [€/a] | | | 16.000.000 |
| Speicher | Investitionskosten gesamt | [€] | Vertraulich | | |
| Kerosin | Investitionskosten gesamt | [€] | Vertraulich | | |

Tabelle 7: Annahmen zu Einkommens- und Materialkomponenten sowie Regionalisierungsgrad – Technologie spezifisch, im Basisszenario

| Kostenart | Annahmen | Elektrolyse | Tankstelle | LKW | Bus | ASF | Pipeline | Transport | Import-terminal | Speicher | Kerosin | |
|----------------------------|--|-------------|------------|------|------|------|----------|---|-----------------|----------|---------|------|
| Allgemein | Regionaler Anteil der Vergütung | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | nicht notwendig, da nur Betrieb berechnet | 0% | 0% | 0% | |
| | Fremdfinanzierungsanteil | 50% | 50% | 50% | 50% | 50% | 50% | | 50% | 50% | 50% | 50% |
| | Regionaler Anteil Fremdfinanzierer | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | | 100% | 100% | 100% | 100% |
| | Abschreibungsdauer / Betriebszeit | 20 | 20 | 15 | 15 | 4 | 40 | | 20 | 30 | 40 | 20 |
| | Marge | 3% | 3% | 3% | 3% | 3% | 3% | | 3% | 3% | 3% | 3% |
| Installation | Regionaler Anteil der Marge | 20% | 20% | 67% | 67% | 0% | 20% | | 20% | 20% | 20% | 20% |
| | Regionaler Anteil Installationsunternehmen | 20% | 20% | 67% | 67% | 0% | 20% | | 20% | 20% | 20% | 20% |
| | Anteil Einkommen an Gesamtausgaben | 20% | 20% | 20% | 20% | 20% | 20% | | 20% | 20% | 20% | 20% |
| | Regionaler Anteil der Einkommen | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | | 80% | 80% | 80% | 80% |
| | Anteil Material an Gesamtausgaben | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| Wartung und Instandhaltung | Anteil Einkommen an Gesamtausgaben | 39% | 43% | 48% | 48% | 48% | 37% | | 39% | 39% | 39% | 39% |
| | Regionaler Anteil der Einkommen | 20% | 20% | 67% | 67% | 0% | 20% | | 20% | 20% | 20% | 20% |
| | Anteil Material an Gesamtausgaben | 27% | 26% | 26% | 26% | 26% | 17% | 27% | 27% | 27% | 27% | |
| | Regionaler Anteil der Materialkosten | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | |

Tabelle 8: Annahmen zu Einkommens- und Materialkomponenten sowie Regionalisierungsgrad – allgemein, im Basisszenario

| Kostenart | Anteil an Gesamtausgaben | Einkommensanteil | Regionaler Anteil Einkommen | Materialanteil | Regionaler Anteil Material |
|----------------------------|--------------------------|------------------|---|----------------|----------------------------|
| Fremdkapitalzinsen | 4,5% | 100% | 90% | 0% | 0% |
| Versicherung | 0,5% | 90% | 100% | 10% | 50% |
| Rechts- und Steuerberatung | 0,2% | 90% | 100% | 10% | 100% |
| Verwaltung | 1% | 90% | s. regionaler Anteil Installations-/Umrüstungsunternehmen | 10% | 80% |
| Sonstiges | 1% | 50% | s. regionaler Anteil Installations-/Umrüstungsunternehmen | 50% | 80% |
| Betriebsmittel | 0% | 5% | 50% | 95% | 50% |