

Mai 2023

**Standortentscheidung für den Betrieb
von Elektrolyseuren als wichtiger Teil
einer gesamtwirtschaftlichen Strategie
beim Aufbau einer Wasserstoffwirt-
schaft mit Offshore-Windenergie**

**Politische Synthese
der**

Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE

Politische Synthese der Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE

aus dem Projekt „Grüner Wasserstoff aus Offshore-Windenergie“ (Laufzeit: 12/2020 – 02/2023), basierend auf der Kurzstudie „Standortfaktoren für den Betrieb von Elektrolyseuren“ der Deutschen WindGuard, die sie [hier](#) abrufen können

Über die Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE

Die Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE wurde 2005 zur Förderung des Umwelt- und Klimaschutzes durch eine verbesserte Erforschung und Entwicklung der Windenergie auf See gegründet.

Sie hat sich als eine überparteiliche, überregionale und unabhängige Einrichtung zur Unterstützung der Offshore-Windenergie in Deutschland und Europa etabliert. Die Stiftung ist Kommunikationsplattform für Akteure aus Politik, Wirtschaft und Forschung, dient dem Wissensaustausch und versteht sich als Ideengeber. Gleichzeitig bündelt sie die verschiedenen Interessen und vertritt sie gegenüber Politik, Öffentlichkeit, Wirtschaft und Wissenschaft.

Im Stiftungskuratorium sind sowohl wichtige Bundes- und Landministerien für den Offshore-Wind-Bereich wie auch Betreiber, Hersteller, Übertragungsnetzbetreiber, Zulieferer, Banken und Versicherungen vertreten.

Ansprechpartner zum Projekt

Andreas Mummert (a.mummert@offshore-stiftung.de)

Gesamtökonomische Betrachtung beim Aufbau einer Grünen Wasserstoff-Wirtschaft mit Offshore-Windenergie

Die Elektrifizierung von Prozessen, Antrieben und Technologien ist ein zentraler Baustein der erfolgreichen Transformation des Wirtschaftssystems. Ein weiterer unverzichtbarer Baustein ist ‚grüner‘, also mit Erneuerbaren Energien produzierter Wasserstoff (und seine Derivate). Wasserstoff wird bereits seit über 100 Jahren in Industrieprozessen eingesetzt. In seiner „sauberen“ Form ist er nunmehr *der* Hoffnungsträger insbesondere in jenen Anwendungsbereichen, die nicht oder nur schwer elektrifiziert werden können. Dazu zählen diverse Industrieprozesse etwa in der chemischen Industrie, aber auch der Flug- oder Schiffsverkehr.

Als Industrieland hat Deutschland ein besonderes Interesse an günstigen Energieträgern. Nicht zuletzt durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und den Anschlag auf die Nordstream-Pipelines hat die Eigenschaft der Resilienz erneuerbarer Energieformen massiv an Bedeutung gewonnen. Heimisch produzierter Strom und Wasserstoff machen die deutsche Industrie unabhängiger von zukünftigen geopolitisch-brisanten Weltlagen. Die Wasserstoff-Gestehungskosten werden eine wesentliche Grundlage dafür sein, industrielle Wertschöpfung in Deutschland zu sichern und den Industrialisierungstendenzen entgegenzuwirken. Eine entsprechende Dynamik hat sich in den vergangenen Jahren um das Thema „Wasserstoff“ entwickelt: Roadmaps, Wasserstoff-Strategien, Pilotprojekte, während bereits Produktionskapazitäten im hunderte Megawatt-Bereich in den kommenden 5 bis 10 Jahren anvisiert werden.

Auch der Klimawandel erfordert erhebliche Anpassungsanstrengungen unseres Energiesystems. Alle Sektoren, auch die Wärmeversorgung und der Verkehr, stehen vor einer fundamentalen Energiewende. Aus dem 1,5-Grad-Ziel gebietet sich eine integrierte, gesamtheitliche Herangehensweise an den Umbau des Energiesystems, beim Aufbau einer ‚grünen‘ Wasserstoffwirtschaft sowie bei der Nutzung und Umwandlung der produzierten Energie: wir können es uns schlicht nicht länger leisten, mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen ineffizient umzugehen.

Damit ein gesamtökonomisch-effizienter und ressourcenschonender Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft gelingen kann, ist eine kluge Standortwahl, die auch die zu erwartenden klimatischen Veränderungen über die Lebensdauer der Elektrolyseanlage berücksichtigt, von hoher Bedeutung. Industrielle Anlagen werden typischerweise auf 20 bis 40 Jahre ausgelegt. Für ein Kilogramm Wasserstoff braucht man je nach Verfahren zwischen 40 und 80 kWh Strom und 9 Liter Wasser. Belastbare Prognosen über die Verfügbarkeit der beiden Hauptkomponenten des Wasserstoffs, Strom und Wasser, sind für die Investitionsentscheidung im großskaligen Maßstab eine schlichte Notwendigkeit. Weiterhin braucht es einen ehrlichen Einbezug des ökonomischen Wertes der Nebenprodukte Abwärme und Sauerstoff in die Gesamtbetrachtung, ebenso wie die Einbeziehung der Kosten verschiedener Transportsysteme und der dafür notwendigen Kompressor-Technik.

Wasserstoffgestehungskosten als Grundlage zur Sicherung industrieller Wertschöpfung in Deutschland

Ressourceneffizienz muss oberstes Gebot sein!

Standortwahl für Elektrolyseure muss bereits in früher Hochlaufphase Zielsystem vor Augen haben

Offshore-Windenergie & Grüner Wasserstoff sind die perfekte Kombination

Gespräche über mehr als zwei Jahre stärkten den Eindruck: sektoren-koppelnde Eigenschaften des Wasserstoffs innerhalb der einzelnen Sektoren zu wenig berücksichtigt

Systementwicklung muss gesamtökonomischen Wert des Wasserstoffs von vornherein mit einbeziehen

Gesamtökonomischer Incentivierungsrahmen bei hoher Umsetzungsschwindigkeit möglich

Der Offshore-Windenergie kommt aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen erneuerbaren Quellen geringeren Volatilität eine wichtige Rolle zu: Die hohe Volllaststundenzahl macht sie zu einer besonders attraktiven Kombinationspartnerin für Elektrolyseure. Der produzierte Wasserstoff ist dabei nicht nur als Energiespeicherform interessant, sondern bietet als „Sektorenkopplungsgelenk“ diverse Einsatzfelder, deren Potenziale gerade erst im Ansatz offenbar werden.

Die Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE hat deshalb im Rahmen des vom Land Niedersachsen geförderten Projektes „Grüner Wasserstoff aus Offshore-Windenergie“ über die vergangenen zwei Jahre eine Vielzahl an Gesprächen in diversen Sektoren und Bereichen geführt, wie Offshore-Wind, Wasserstoffherstellung, Wasserstoffverbrauch (insbesondere Großindustrie), Nah- und Fernwärme, Anwendern von technischem Sauerstoff, Herstellern von Elektrolyseuren, technischen Entwicklern, Übertragungsnetz- und Pipelinebetrieb.

Zudem wurden im Rahmen des Projektes zwei zentrale Studien in Auftrag gegeben: zum Offshore-Wasserstoffpotenzial in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (September 2021) sowie eine Betrachtung der Standortfaktoren für Elektrolyseure aus gesamtökonomischer Perspektive (März 2023). Stellte die erste Studie einen Startpunkt der Überlegungen dar, ist die zweite Studie eine Art Zwischenfazit und Konsequenz aus den in der Zwischenzeit geführten Gesprächen. Sie soll eine zusammenhängende Darstellung und einen analytischen Beitrag zu einer **ganzheitlichen und integrierten Betrachtung der Standortwahl von Elektrolyseuren** als Ankerpunkte einer entstehenden Wasserstoffwirtschaft liefern.

Denn in der Gesamtheit war der **Eindruck entstanden, dass die sektorenkoppelnde Eigenschaft von Wasserstoff innerhalb der einzelnen Sektoren nicht ausreichend Berücksichtigung findet.** Das kann und konnte unterschiedliche Gründe haben, hängt aber vielfach zweifelsohne auch damit zusammen, dass es nicht die Aufgabe vieler Akteure ist, gesamtökonomisch zu agieren. Ein weiterer Faktor ist „sektoralisiertes“ Wissen.

Dabei ist es wichtig zu betonen, dass die Aufforderung zu einer gesamtökonomischen Bewertung bereits beim Markthochlauf keinesfalls als Aufforderung zu einer ‚langsameren‘ oder ‚bedächtigeren‘ Herangehensweise bei der Entwicklung des regulatorischen Rahmens für die entstehende Wasserstoffwirtschaft zu verstehen ist. Deutschland droht bereits jetzt im internationalen, wie europäischen Vergleich den Anschluss zu verlieren, wenn nicht eine zügige und möglichst unbürokratische Incentivierung von einer Vielzahl an Projekten bei rechts- und planungssicheren sowie attraktiven Investitionsbedingungen gelingt. Viel Wissen ist bereits sektoral vorhanden. Eine stimmige Flankierung durch den Policy-Rahmen, der das Innovationspotenzial der Wirtschaft entfesselt, ist möglich und notwendig.

Ziel der vorliegenden politischen Synthese (in Kombination mit der Auftragsstudie) ist entsprechend die Schärfung einer **gesamtökonomischen Perspektive** und **Initialisierung einer sektorübergreifenden Diskussion**

um die **Planung einer grünen Wasserstoffwirtschaft mit Offshore-Strom.**

In Kombination mit der Offshore-Windenergie ergibt sich bei der Analyse der komplexen Faktoren auch der Standort der Elektrolyseure, der offshore, an Land oder küstennah („coastal“) liegen kann, mit jeweils spezifischen Stärken und Schwächen, die es miteinander und untereinander abzuwägen gilt.

Grüner Wasserstoff aus Coastal-Elektrolyse als möglicher Profiteur verschiedener geografischer Standortfaktoren bisher zu wenig im Fokus

Bei Berücksichtigung all dieser Faktoren erscheint **insbesondere die küstennahe Elektrolyse** als eine hochinteressante, **bisher nicht ausreichend diskutierte Variante** – mit entsprechenden Standortvorteilen für die Küstenländer. Hier kann Niedersachsen zusätzlich zu seinem **Meerwasserzugang und als Haupt-Anlanderegion für Offshore-Strom auch durch seine Vielzahl an Kavernenspeichern** noch eine besondere Stellung als Speicherstandort für Wasserstoff und dessen industrielle Weiterverarbeitung einnehmen.

Die Bedeutung der Nordländer für die entstehende Grüne Wasserstoffwirtschaft unter den Aspekten der Strom- und Wasserverfügbarkeit

Niedersachsen als Herzkammer der deutschen Energie-Infrastruktur

Die deutliche Mehrzahl der Offshore-Netzanbindungssystemen wurden und werden auch zukünftig durch niedersächsische Küstengewässer geführt. Als Transitland von großen Mengen Offshore-Strom in die großen Verbrauchszentren im Süden und Westen Deutschlands kommt dem Bundesland damit eine erhebliche Bedeutung für die gesamtdeutsche Wirtschaftskraft zu. Auch die Nachbarschaft zu den Niederlanden macht Niedersachsen zu einer Herzkammer der deutschen und westeuropäischen Energie-Infrastruktur, insbesondere auch im Hinblick auf die Entwicklung einer transnationalen Wasserstoffwirtschaft. **Das Land verfügt im deutschlandweiten Vergleich über die bei weitem größte Lagerkapazität für Wasserstoff, insbesondere in Form von Salzkavernen, welche sich nach heutigem Stand der Forschung deutlich besser für die Speicherung des flüchtigen Wasserstoffs eignen als Porenspeicher.**

Hohe Standortstärken der Küstenländer für eine Wasserstoffwirtschaft mit Offshore-Strom als zentralem Element

Die norddeutschen Bundesländer verfügen zusammen über eine Küstenlänge von knapp 2.400 km. Dieser könnte im deutschen Energiesystem zukünftig eine ganz besondere Bedeutung zukommen, denn der Einbezug des Faktors „Wasser(verfügbarkeit)“ in der Elektrolyse ist vielschichtig. In Frage kommt – wie in der Studie gezeigt wird – der Bezug von Grund- bzw. Trinkwasser, Oberflächenwasser und Meerwasser. Letzteres muss entsalzt und aufbereitet, vorherige je nach Reinheitsgrad aufbereitet werden.

Wasserverfügbarkeit ein bisher unterbeleuchteter, wichtiger Faktor

Die zukünftige Entwicklung von Niederschlag und Grundwasserständen bzw. die Themen Trinkwasserschutz und Grundwassernutzungskonflikte dürften perspektivisch von enormer Wichtigkeit für eine kluge Standortwahl sein. Sie müssen auf volkswirtschaftlicher Ebene von vornherein mitgedacht werden bei der Entstehung einer grünen Wasserstoffwirtschaft. Zwar kommt die vorliegende Studie zu dem Ergebnis, dass noch kein flächendeckender Notstand für Deutschland bei der Niederschlags- und Grundwasserverfügbarkeit besteht, doch gestaltet sich dies regional und lokal unterschiedlich und teils bereits in absehbarer Zukunft durchaus dringlich. Grund dafür sind insbesondere ausbleibende oder geringere Niederschlagsmengen, eine hohe Nutzung oder die Versiegelung von Böden durch den Wechsel zwischen Trocken- und Starkregenperioden. **Ein deutliches Anzeichen für zukünftige Wasserverteilungskonflikte sind entsprechende Gerichtsverfahren, welche seit Jahren in Deutschland kontinuierlich zunehmen.**¹

Der Einsatz von Meerwasser bei der Elektrolyse könnte diese Konflikte umgehen und sowohl offshore wie küstennah genutzt werden. Durch die Nutzung eines Anteils der beim Elektrolyseprozess entstehenden Abwärme kann reines Wasser mit der benötigten Leitfähigkeit gewonnen werden. Für die hierbei entstehende substantielle Menge an Sole müssen allerdings die technischen Entsorgungsmöglichkeiten sorgfältig eruiert und rechtlich beurteilt werden, wobei die unterschiedlichen

Technologien der Meerwasserentsalzung (Aufkonzentration vs. Umkehrosmose – letztere unter Einsatz von Chemikalien) sicherlich eine Rolle spielen werden. **Eine rechtliche Ersteinschätzung steht noch aus, die die unterschiedlichen Implikationen von Soleeinleitung im offenen Meer einerseits und hinsichtlich der Einleitung in tideabhängige, küstennahe Gewässer andererseits analysiert.** Teil einer solchen rechtlichen Einschätzung wären auch die Auswirkungen auf die (Meeres-)Umwelt.

Verfügbarkeit von Wasserprognosedaten nicht flächendeckend gegeben

Zum jetzigen Zeitpunkt erscheinen die Herausforderungen der Meerwassernutzung als weniger signifikant als die Entwicklung bei der Grundwasserverfügbarkeit. Hier ist es überraschend, dass (Grund-)Wasserprognosedaten für längere Zeiträume für Deutschland nicht flächendeckend vorliegen, was für eine gesamtheitliche, nationale Standortbewertung (onshore) jedoch hochgradig relevant wäre.

¹ [Knappes Wasser in Deutschland: Immer mehr Konflikte vor Gericht \(correctiv.org\)](https://www.correctiv.org/).

Ressourceneffizienz als Zukunftsgebot: Gesamtökonomischen Wert der Nebenprodukte der Elektrolyse bei der Standortwahl erkennen

Insbesondere Abwärme & Sauerstoff mit hohem Wertschöpfungs- und Wirtschaftspotenzial

Mit Blick auf die gesamtökonomische und effiziente Nutzung unserer verfügbaren Ressourcen muss die **Nutzung der Nebenprodukte der Elektrolyse, nämlich Abwärme und reiner Sauerstoff**, bei der Standortwahl verstärkt in den Blick rücken. Beiden bieten interessante Optionen zur Vermarktung und können einen zusätzlichen Beitrag zur Wertschöpfungsgenerierung leisten.

Abwärmenutzung als Beitrag zu Energiesicherheit und Wärmewende

Die Nutzung von Abwärme leistet einen relevanten Beitrag zur Wärmewende, zur Energiesicherheit und zur Energieeffizienz. Sie steigert den Wirkungsgrad der jeweiligen Anlage. Die Nutzbarkeit und Einspeicherfähigkeit ist dabei in hohem Maße vom Standort abhängig. **So braucht Abwärme eine Wärmesenke, beispielsweise in niederkalorischen Nah- und Fernwärmenetzen, oder infrastrukturell anbindbare Industrieabnehmer.**² Bei der Offshore-Elektrolyse sind Wärmeabnehmer nicht ohne weiteres ersichtlich, jedoch schätzen Experten beim jetzigen Entwicklungsstand, dass bis zu 10 % der entstehenden Abwärme für die Meerwasserentsalzung verwendet werden können. Eine Elektrolyse an Land – sei es binnenlands, sei es küstennah – bietet insoweit breitere Einsatzmöglichkeiten.

Sauerstoff als Nebenprodukt mit einem bisher unterbewertetem ökonomischen Potenzial

Dem gesamtökonomischen Wert des Sauerstoffs, insbesondere bei der zukünftigen Verfügbarkeit großer Mengen Offshore-Stroms für den Betrieb von Elektrolyseuren, wird bisher eine eher geringe Beachtung geschenkt.^{3,4} Dies sollte aber bei der Gewichtung von Standortkriterien mit einbezogen werden, denn das Handling des Sauerstoffs ist nicht trivial. In Betracht kommen der (Aus-)Bau einer vorhandenen oder zusätzlichen Infrastruktur wie eine O₂-Pipeline), eine direkte Abnahme etwa durch Klärwerke oder für Industrieprozesse. Diese Faktoren müssten dann bei der Gesamtsystementwicklung mitgedacht werden.

Oxy-Fuel-Prozesse als mögliches Nachfragefeld für bezahlbaren technischen Sauerstoff

Einen zukunftsrelevanten Anwendungs- bzw. Nachfragefall könnten insbesondere die sogenannten Oxy-Fuel-Prozesse darstellen, bei denen besonders hohe Flammentemperaturen erreicht werden können. Sie verfügen über eine hohe Bandbreite von Anwendungen im Rahmen industrieller Verbrennungsprozesse unter Steigerung der Effizienz. **So können Oxy-Fuel-Prozesse die Grundlage für CO₂-Abscheidungsprozesse in konventionellen Kraftwerken und damit für Carbon Capture Storage (CCS) bilden. Das entstehende CO₂ würde sich potenziell für die dauerhafte Einlagerung in ausgeförderten Erdgaslagerstätten eignen, wie sie in Niedersachsen vorhanden sind.** Die Nutzung von Klärschlämmen mit

² Eine standortspezifische Wirtschaftlichkeitsanalyse müsste auch onshore bei geografisch günstig gelegenen Projekten noch erfolgen.

³ Auch wenn verbrauchernahe Pilotprojekte wie beispielsweise Westküste 100 die Verwendung mit einbeziehen: [Westküste100 \(westkueste100.de\)](https://www.westkueste100.de).

⁴ In den Überlegungen (Stand Februar 2023) zur Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie spielt Sauerstoff – im Gegensatz zur Erwähnung der Abwärme – bisher keine Rolle.

Oxy-Fuel-Verfahren, an denen gegenwärtig geforscht wird,⁵ wäre ein weiteres Anwendungsbeispiel: Im Rahmen eines thermokatalytischen Prozesses wird der Klärschlamm unter Verwendung von Sauerstoff pyrolysiert. Das entstehende Carbonisat dient dann als Bodenhilfs- und -verbesserungsstoff in der Landwirtschaft, um die Speicherfähigkeit des Bodens für Wasser und Nährstoffe zu erhöhen.

Oxy-Fuel-Prozesse stellen mit Blick auf eine gesamtwirtschaftliche Analyse der Wasserstoffproduktion ein in zweifacher Hinsicht spannendes Anwendungsbeispiel dar. Wie die von der Stiftung beauftragte Studie zu Standortfaktoren der Elektrolyse gezeigt hat, fallen bei der Elektrolyse mit 1 GW Offshore-Strom rund 627.000 m³ Sauerstoff an, was etwa 10 % der nationalen Produktion im Jahre 2021 entspräche. Bei den gegenwärtig energiebedingt hohen Preisen für technischen Sauerstoff ergäbe sich unter Berücksichtigung etwaiger technischer Aufbereitungserfordernisse ein relevanter Anwendungsfall für die Angebotsseite, die einen ökonomischen Nutzungsanreiz böte. Für einen industrieskalierten Einsatz von Oxy-Fuel-Prozessen stellt laut Experten gerade der hohe Preis für technischen Sauerstoff das größte Anwendungshindernis dar. Bei einem Elektrolyseausbau mit Offshore-Strom im GW-Bereich und der Nutzbarmachung mehrerer Millionen Kubikmeter Sauerstoff würde der Marktpreis jedoch voraussichtlich sinken, jedenfalls sofern die dann voraussichtlich ebenfalls steigende Nachfrage durch das Angebot deutlich überschritten wird. Insgesamt dürfte hier ein bedeutender Anreiz für die vermehrte Anwendung der effizienzsteigernden Oxy-Fuel-Prozesse entstehen.

Salz & Biomasse als spezifische Nebenprodukte der Meerwasser-Elektrolyse zurzeit mit geringerer Nutzungswahrscheinlichkeit

Neben den beiden genannten – bei allen Elektrolyseprozessen anfallenden – Nebenprodukten Abwärme und Sauerstoff fallen bei der Offshore- bzw. Coastal-Elektrolyse unter Einsatz von Meerwasser zudem zwei weitere Nebenprodukte an, nämlich **Salz(sole) und Biomasse**:

Der ökonomische Wert des im Meerwasserentsalzungsprozess entstehenden Salzes scheint nach gegenwärtigem Stand zwar vernachlässigbar, sollte jedoch angesichts zukünftiger technischer Entwicklungen nicht gänzlich ignoriert werden. Für die Gewinnung von Speisesalz scheint die Bezugsquelle hingegen nicht ökonomisch.

Bei der Meerwassernutzung wird zudem maritime Biomasse mit eingelesen, die über mehrere Filter ausgefiltert werden muss. Welche Qualität diese hat und inwieweit sie einer Anwendung zugeführt werden könnte, gilt es noch zu analysieren.

⁵ Siehe Pressemitteilung vom 30.11.2022, <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2022/Oxyfuel-Verbrennung-fuer-Biogas-Abtrennung-Co2.html>.

Standortwahl als wichtiges Element einer Netzdienstleistungsstrategie bei einer Elektrolyse an Land

Bisher gibt es keine einheitliche Definition für Netz- oder Systemdienstlichkeit

Auch die Nähe zu Netzknotenpunkten, die die Anschlussfähigkeit – im besten Fall – ans Gleichstromübertragungsnetz⁶ für die mittel- und langfristig geplanten großen Elektrolyseure im hunderte Megawatt-Bereich ermöglichen, wird ein relevanter Faktor für die Standortwahl sein. Durch die Transformation hin zu einem ausschließlich auf Erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem entstehen große Lasten, die bisher noch nicht lokalisiert sind. In den kommenden Jahren werden so durch die Standortwahl für die großen Elektrolyseure wichtige Pfadabhängigkeiten für die Entwicklung des Gesamtsystems geschaffen, die eine gesamtökonomische Betrachtung umso wichtiger machen.

Hierbei gilt es zu bemerken, dass es bisher noch keine einheitliche Definition von (Netz-)Systemdienstlichkeit gibt, wie auch der VDE in einem im Dezember 2022 veröffentlichten Impulspapier zur „Netzdienstlichen Integration von Elektrolyseuren“ konstatiert.⁷ Auch werden die Begrifflichkeiten Netzdienstlichkeit, Systemdienstlichkeit, Netzsystemdienstlichkeit nicht trennscharf verwendet. Klar ist, dass das zukünftige System aufgrund der Erzeugungsfuktuation bei den grünen Energieerzeugungsformen auf eine Vielzahl an Flexibilitäten – einem der häufigsten und weitläufigsten Begrifflichkeiten in der Diskussion – angewiesen sein wird.

Mit Blick auf die systemdienliche Funktion von Elektrolyseuren ergeben sich hier eine Vielzahl an direkten und indirekten Möglichkeiten, deren Bedeutung auch über die regulatorische Incentivierung bestimmt sein wird.⁸ Voraussichtlich 2023 soll zudem im BMWK eine Verordnung zur (Definition der) Netzsystemdienstlichkeit von Elektrolyseuren erstellt werden, die sich als Verordnungsermächtigung u.a. aus dem WindSeeG 2023 ergibt.

Mögliche **Systemdienstlichkeitsfunktionen** sind:

- Sektorkopplungsknotenpunkt zwischen dem Strom- und Gassystem, wobei eine Nutzung von Strom zur Herstellung von Wasserstoff deutlich weniger kontrovers diskutiert wird als eine Rückverstromung
- Ermöglichung von Energiespeicherung
- Die Nutzung von Strom, der anderweitig aufgrund eines nicht ausreichend belastbaren landseitigen Netzes nicht eingespeist werden könnte (bspw. bei Offshore-Elektrolyse)
- Bezug von Strom bei Angebotsspitzen / von Überschussstrom

Die Diskussion um den „(netz)systemdienstlichen“ Einsatz von Elektrolyseuren im Sinne der Punkte 3 und 4 ist bis voraussichtlich in die 2030er-Jahre auch von spezifischer Relevanz bei der Betrachtung von Offshore-

⁶ Elektrolyseure werden mit Gleichstrom betrieben. Der Bedarf einer Umwandlung würde entfallen.

⁷ [netzdienstliche-integration-von-elektrolyseuren-data.pdf \(vde.com\)](https://www.vde.com/netzdienstliche-integration-von-elektrolyseuren-data.pdf)

⁸ Diese Fragen werden auch von zentraler Bedeutung bei der Konzeptionalisierung eines neuen Strommarktdesigns sein, wie sie über die am 20.02.2023 vom BMWK gestarteten **Plattform Klimaneutrales Stromsystem** erarbeitet werden soll.

Abregelung von Offshore-Strom führt zu hohem ökonomischen Verlust, der durch den Betrieb von Elektrolyseuren ggf. mitigiert werden könnte

Definition von Netzsystemdienlichkeit muss Wirtschaftlichkeit des Betriebs ermöglichen

Planungen eines Klimaneutralitätsnetzes müssen zügig Realität werden

Strom. Schon heute – und mit steigender Tendenz⁹ – muss dieser immer wieder abgeregelt werden, da das landseitige Netz in den Spitzenzeiten die Strommengen nicht aufnehmen und in den Süden weiterleiten kann. Dieser Zustand wird bis Ende des Jahrzehnts durch den geplanten massiven Offshore-Ausbau zunächst auch noch zunehmen, bevor der landseitige Netzausbau und der Aufbau einer Speicherinfrastruktur diesen ökonomischen Verlust abbauen können.¹⁰ Bau und Anschluss von Elektrolyseuren vor der Übertragungsnetzeinspeisung könnten somit das Abregeln des Stroms und den damit verbundenen ökonomischen und ökologischen Verlust bereits zeitnäher reduzieren und das Ausmaß des notwendigen weiteren Netzausbau vom Norden Deutschlands in die Verbrauchszentren im Süden vermindern.

Allerdings gibt es noch deutliche Fragezeichen im Hinblick auf die Rentabilität des Elektrolyseurbetriebs ausschließlich für Zwecke der Netzdienlichkeit im engeren Sinne, wenn diese ausschließlich über die Abnahme von Überschussstrom erreicht werden soll.¹¹ **Es bedarf eines stimmigen regulatorischen Rahmens, der ggf. auch nachrangige Netzanschlüsse ermöglicht oder die Fähigkeit des Wasserstoffs als Energiespeicher (diese könnte zusätzlich genutzt werden, um Marktpreisschwankungen zu nutzen) mit einer entsprechenden Netzentgeltbefreiung für die Einspeicherung belohnt, statt diese doppelt zu „bestrafen“.** Gleichzeitig muss der Wirkungsgrad des Gesamtsystems gewahrt werden.

Eine entsprechende Ausgestaltung wird jedoch nur gelingen, wenn zügig eine einheitliche Definition zur Netzsystemdienlichkeit geschaffen und eine Strategie für eine integrierte Gas- und Strominfrastruktur mit dem Ziel eines Klimaneutralitätsnetzes gedacht und umgesetzt wird, wie beispielsweise im Projekt „Integrierte Netzplanung NRW“, welches Anfang Februar 2023 abgeschlossen wurde.¹²

Bei der Elektrolyse offshore gehört es zur Basis der bisher bekannten technischen Konzepte, die Betriebsstunden des Elektrolyseurs zu maximieren. Daher würde die Möglichkeit, den Wasserstoff nur als „Phantomstromspeicher“ einzusetzen, entfallen. Gleichzeitig muss in der Gesamtschau auch bedacht werden, dass die Moleküle nicht netzgebunden von Nord nach Süd transportiert würden, **sondern per Pipeline, das Stromnetz also entlasten würden.**

⁹ [Quartalsbericht zum Netzengpassmanagement zweites Quartal 2022 \(bundesnetzagentur.de\)](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/07/Quartalsbericht_zum_Netzengpassmanagement_zweites_Quartal_2022.pdf?__blob=publicationFile)
[Zahlen Ganzes Jahr2021.pdf \(bundesnetzagentur.de\)](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/07/Zahlen_Ganzes_Jahr2021.pdf?__blob=publicationFile)

¹⁰ Die wirtschaftlichen Verluste, die Investoren in neue Offshore Windparks wegen zunehmender netzbedingter Abregelungen einkalkulieren müssen, werden potenziell negative Effekte auf die Investitionsbereitschaft in Offshore Windparks haben. Dies gilt es noch genauer zu untersuchen.

¹¹ Voraussichtlich 2023 wird im BMWK noch eine Verordnung zur (Definition der) Netzsystemdienlichkeit von Elektrolyseuren erstellt werden, die sich als Verordnungsermächtigung u.a. aus dem WindSeeG 2023 ergibt.

¹² [NRW legt gemeinsame Netzplanung für Strom, Gas und Wasserstoff vor: Zeitung für kommunale Wirtschaft \(zfk.de\).](https://www.zfk.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/02/NRW legt gemeinsame Netzplanung für Strom, Gas und Wasserstoff vor: Zeitung für kommunale Wirtschaft (zfk.de).)

Standortfaktoren: (Offshore-)Transportinfrastruktur, Flächenverfügbarkeit & die Nähe zu Verbrauchszentren

Die Frage der infrastrukturellen Anbindung gestaltet sich insbesondere im Fall der Offshore-Elektrolyse noch einmal vielschichtiger als für die Onshore- und Coastal-Elektrolyse und wird damit zu einem zusätzlichen Element der Standortbewertung. Dabei kommen grundsätzlich die ausschließliche Anbindung an eine (neue) Wasserstoffpipeline, die Einspeisung bzw. Nutzung einer bestehenden Erdgaspipeline oder der Schiffs-transport in Frage. Neben einer „Insellösung“, bei der allein der angeschlossene Offshore-Windpark den Elektrolyseur mit der benötigten Elektrizität versorgt, ist darüber hinaus ein nachrangiger Netzanschluss denkbar, um die Auslastung zu maximieren und Marktpreisschwankungen für Strom und Wasserstoff nutzen zu können.¹³

Transportfragen

Die Entscheidung, welche Anbindungsinfrastruktur zu präferieren ist, hängt von diversen Faktoren und nicht zuletzt vom politischen Willen bzw. den politischen Zielsetzungen ab.

Gesetzgeber sollte Technologie- und Konzeptoffenheit für Transport erhalten

Aus Sicht der Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE sollte der Normgeber **möglichst lange eine Technologie- und Konzeptoffenheit erhalten, um gerade in der Frühphase eine vielfältige Entwicklung zu ermöglichen.**¹⁴ Dabei sollte nicht nur die systemische Entwicklung in Deutschland im Auge behalten werden, sondern auch das Technologie-Exportpotenzial verschiedener Transportkonzepte.

Gerade mit Blick auf die Anbindung eines Offshore-Elektrolyseurs durch eine Pipeline drehten sich Diskussionen der vergangenen Jahre allerdings wiederholt im Kreis, da eine sinnvoll dimensionierte Pipeline – so politisch gewollt – eine Ausbau-Zielvorgabe voraussetzt, die bisher für Offshore-Elektrolyse nicht besteht.

Es braucht eine Ziel-Vorgabe und ein gemeinsames Verständnis, wie der Offshore-Strom primär verwendet werden soll

Eine Ausbau-Zielvorgabe wiederum setzt ein gemeinsames politisches Verständnis und eine Verständigung darüber voraus, (1) wie der Offshore-Strom primär verwendet werden soll,¹⁵ (2) wieviel die Erzeugung von grünem Wasserstoff kosten darf bzw. wie hoch sie subventioniert werden müsste, und (3) wie sich das Verhältnis von Import zu heimischer Produktion sowohl bei Wasserstoff wie Strom entwickeln wird. Auch deshalb bedarf es des holistischen Blicks im Sinne der Studie für die (politische) Priorisierung.

Dem Thema der (Offshore-)Transportkonzepte haben sich verschiedene Veröffentlichungen in der jüngeren Vergangenheit bereits eingehend

¹³ [Wasserstoff Wind auf See \(offshore-stiftung.de\)](https://www.offshore-stiftung.de).

¹⁴ Dies gilt insbesondere auch für die Offshore-Elektrolyse-Förderrichtlinie, die zurzeit im BMWK erarbeitet wird.

¹⁵ Hier wird voraussichtlich auch der nächste Netzentwicklungsplan Aussagen treffen, der Ende Q1 / Anfang Q2 2023 erwartet wird.

Sicherheit von kritischer (maritimer) Infrastruktur als neue Bewertungs-facette

gewidmet.^{16,17} Dabei ist zu bemerken, dass die Schlüsse und Empfehlungen teilweise deutlich variieren, abhängig von der Betonung verschiedener Faktoren. Dass zudem empirische Belege bisher logischerweise fehlen, impliziert eine Entscheidungsnotwendigkeit unter hoher Unsicherheit, was abermals die Bedeutung eines konzeptoffenen regulatorischen Rahmens unterstreicht.

Allein beim Kostenvergleich der reinen Übertragungstechnik (ohne die Kompressortechnik) erscheint eine höher-dimensionierte Pipeline (+/- 10 GW) auf Basis aktueller Untersuchungen kostengünstiger als andere Transportkonzepte, insbesondere ab einer Entfernung über 100km von der Küste. **Hier hat sich jedoch seit dem Anschlag auf die Nordstream-Pipelines im September 2022 mit dem Thema der Pipeline-Sicherheit und der potenziellen Schäden bzw. Reparaturdauern eine ganz neue Bewertungs-facette ergeben. Haben terroristische Attacken und „Acts of Warfare“ in der Vergangenheit bei der Finanzierung großer Infrastrukturprojekte eine eher vernachlässigbare Rolle gespielt (so sehr, dass ein Versicherungsausschluss dieser Risiken von Investoren standardmäßig akzeptiert wurde), ist davon auszugehen, dass sich diese „entspannte“ Haltung zukünftig ändern könnte, auch wenn dies zum heutigen Zeitpunkt nicht vollumfänglich beurteilt werden kann.** Hier wird es spannend sein zu beobachten, wie der Versicherungs- und Finanzierungsmarkt mit seinen Risikoeinschätzungen auf diese neue Realität reagieren wird. Sollte ein Versicherungsausschluss von Schäden aus terroristischen Anschlägen zukünftig zu einem gewichtigeren Kriterium bei der Kreditvergabe für schwer zu überwachende Energieerzeugungseinheiten führen, wäre mit erheblichen Auswirkungen auf rein privatwirtschaftliche Projektfinanzierungen zu rechnen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass aufgrund der kürzeren Reparaturdauer von Unterseekabeln (im Vergleich zu Pipeline-Schäden) bei elektrisch anzubindenden Offshore Windparkprojekten mit deutlich geringeren Auswirkungen zu rechnen wäre.

Die Entscheidung zur politischen Förderung einzelner Konzepte ist letztlich eine Güterabwägung

Mit Blick auf den Flächenbedarf kann zum jetzigen Zeitpunkt festgehalten werden, dass eine Sammelpipeline von Offshore-Elektrolyseparks an Land einen Verbrauchsvorteil gegenüber einem Übertragungsäquivalent von Offshore-Kabeln hätte, so bei einer 10-GW-Auslegung der Pipeline im Vergleich zu fünf Gleichstromübertragungsleitungen à 2GW.¹⁸ Der begrenzte Raum für Trassen, insbesondere im Übergang zwischen AWZ und Küstenmeer sowie im Küstenmeer, ist ein relevantes planerisches Nadelöhr Schiffstransport hingegen wäre hier gänzlich frei und zudem deutlich flexibler.¹⁹ **Auch hier wird es letztlich keine eindeutige wissenschaftliche oder technische Antwort geben, sondern eine Güterabwägung von Faktoren erfordern, die sich nur eingeschränkt vergleichen lassen.**

¹⁶ [AquaDuctusShortStudy_OffshoreHydrogenProduction_v130_DE.pdf \(aquaventus.org\)](#)

¹⁷ [Projekt Offsh2ore - energiesystem-forschung.de](#)

¹⁸ Eine Stromleitung im Meer erfordert zurzeit 100 Meter Abstand zu jeder Seite, eine Pipeline jeweils 500 Meter.

¹⁹ Der Umfang des zusätzlichen Schiffsverkehrs hängt von der technologischen Entwicklung bei der Speicherung von (flüssig-)Wasserstoff und damit der möglichen Größe der einzusetzenden Schiffe ab, wie u.a. im Projekt Offsh2ore untersucht ([Projekt Offsh2ore - energiesystem-forschung.de](#))

Konflikte um Flächen

Elektrolyseure in einem industriell-skalierten Maßstab haben zusätzlich sowohl an Land wie auf dem Meer einen hohen Flächenbedarf. Offshore lässt sich über die Raumordnungs- und Flächenplanung eine Steuerung gewährleisten. Auf zu einem Zeitpunkt festgelegten Flächen wären damit auch Nutzungskonflikte zentral-planerisch zumindest in der Theorie ausgeschlossen, wobei auch heute bereits klar ist, dass Deutschland im Verhältnis zu seiner Landesfläche und seinem Elektrizitätsbedarf deutlich zu wenig Meeresfläche für Offshore-Windparks hat. Onshore wird der zusätzlich entstehende Bedarf an Industrieflächen bestehende Flächennutzungskonflikte in begehrten Regionen ggf. verschärfen. Hier haben weniger dicht besiedelte Regionen einen natürlichen Standortvorteil.

Nähe zu Verbrauchszentren schafft Synergie- und Kosteneffekte

Allerdings stellt sich in diesen Regionen dann wiederum die Frage der infrastrukturellen Anbindung, bspw. ans Fernwärmenetz zur Nutzung der Abwärme, und damit die Nähe zu den industriellen und urbanen Verbrauchszentren. Dass eine geografische Nähe zwischen Produktion und Abnahme grundsätzlich Synergie- und Kosteneffekte schafft, ist keine überraschende Erkenntnis.

Schlussfolgerungen & Handlungsfelder

Die zügige Transformation unseres Energiesystems sollte auf jeder denkbaren Ebenen – klima-, wirtschafts-, industriepolitisch – das Ziel aller gemeinsamen Anstrengungen sein. Die Aufgabe ist enorm. So stehen wir nicht nur vor technischen, technologischen oder regulatorischen Herausforderungen, sondern tun dies auch noch vor einem erbarmungslos kurzen Realisierungshorizont. Damit die gemeinsame Aufgabe dennoch gelingt, braucht es Geschwindigkeit und Pragmatismus, ohne das Gesamtbild aus den Augen zu verlieren, bzw. währenddessen ein belastbares Zielsystem zu entwickeln.

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft spielt hier eine Schlüsselrolle. Und im auf Erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem der Zukunft wiederum ist Offshore-Windenergie die wichtigste Bezugsquelle für die zu bauenden Elektrolyseure – sei es an Land, auf See oder an der Küste. Dabei werden durch die Standortwahl für die großen Elektrolyseure wichtige Pfadabhängigkeiten für die Entwicklung des Gesamtenergiesystems geschaffen, die eine gesamtökonomische Betrachtung umso wichtiger machen. Für diese sollte Ressourceneffizienz ein Leitmotiv sein und entsprechend auch eine ehrliche Bewertung der Nutzbarkeit der Nebenprodukte Abwärme und Sauerstoff sowie der Wasserverfügbarkeit beinhalten.

Zügig Maßnahmenpakete zur Sicherung der notwendigen Produktionsfaktoren für die Offshore-Energie- und Wasserstoffwende beschließen

Insbesondere die **Coastal-Elektrolyse** bietet bei der Betrachtung von Standortvorteilen ein hohes Potenzial für eine Berücksichtigung möglichst vieler relevanter Faktoren. Bis wohin ins Inland dabei noch von ‚küstennah‘ gesprochen werden kann, gilt es weiter zu definieren. Dabei wird es nicht zuletzt von Bedeutung sein, bis wie weit landeinwärts der Bau von Meerwasser-Pipelines und Pumpeinrichtungen noch wirtschaftlich erfolgen kann.

Die hier entwickelte politische Synthese zu den Standortfaktoren von Elektrolyseuren kann dabei – nach der vielfachen Betonung des notwendigen gesamtökonomischen Blickes – nicht isoliert betrachtet werden.

Aus Sicht der Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

➤ **Förderung der Offshore-Windindustrie und insbesondere der Wertschöpfungskette essenziell:**

Zwar ist dies nicht im Fokus der vorliegenden Studie, aber ohne den zeitnahen Zubau der Offshore-Windenergie werden die Energiewende und damit auch die Erreichung der politischen Ziele im Bereich der grünen Wasserstoffherzeugung scheitern. Hier ist es nach der erfolgten Straffung von Genehmigungsverfahren, der Formulierung neuer Zubauziele, der Flächenausweisung und der Sicherstellung rechtzeitiger Netzanschlüsse unabdingbar, nun einen konsequenten und integrierten Fokus auf die Sicherstellung der notwendigen Produktionsfaktoren zu legen. Hier sieht die Stiftung Offshore-Windenergie dringenden Handlungsbedarf im Bereich der (Seehafen-) Infrastruktur, des

Energie- und Industriepolitik müssen integriert gedacht werden, um Bremsfaktoren auszuhebeln

Zügige Schaffung eines konzept- und technologieoffenen Förderrahmens

Strategieentwicklung auf Basis einer gesamtökonomischen Betrachtung in der Nationalen Wasserstoffstrategie und der Norddeutschen Wasserstoffstrategie verankern

Wasserbedarf ein bisher unterschätztes Kriterium

Konverter(plattform)baus, der Fabrikation von Fundamenten und Schiffen sowie der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Fachpersonal. Es gilt es sehr zeitnah eine strategisch orientierte Industriepolitik mit entsprechenden Maßnahmenpaketen zu entwickeln und in die Umsetzung zu bringen. Deutschland sollte sowohl national aktiv werden wie auch auf europäischer Ebene für eine zügige Umsetzung des Net-Zero Industry Acts eintreten.

Hierzu ist es von elementarer Bedeutung, dass auch in den zuständigen Ministerien und Behörden Energie- und (maritime) Industriepolitik abteilungsübergreifend und gemeinsam gedacht werden, nicht nur auf Bundesebene, sondern auch zwischen Bund und Ländern. Der zeitliche Effizienzgewinn, der hier gehoben werden kann, erscheint auf Basis sektorübergreifender empirischer Beobachtungen beträchtlich zu sein.

➤ **Schaffung eines Förderrahmens:**

Das deutsche EEG hat die Entwicklung und den Einsatz Erneuerbarer Energien auf breiter Front erst ermöglicht. Für einen zügigen Aufbau der grünen Wasserstoffwirtschaft könnte ein vergleichbares Fördersystem eine ähnliche Wirkung entfalten. Dieses, oder auch andere zurzeit betrachtete Instrumente wie zum Beispiel gesicherte Abnahmeverträge oder Leitmärkte, gilt es mit Hochdruck konzept- und technologieoffen zu entwickeln.

➤ **Politische Strategieentwicklung auf Basis einer gesamtökonomischen Betrachtung:**

Eine gesamtökonomische Betrachtung der Standortwahl von Elektrolyseuren zum Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft sollte unmittelbar in der Strategieentwicklung auf Regierungsebene verankert werden. Dazu bieten zum jetzigen Zeitpunkt insbesondere die Fortschreibungen der Nationalen Wasserstoffstrategie sowie der Norddeutschen Wasserstoffstrategie Möglichkeiten. Die ersten Überlegungen zur Nationalen Wasserstoffstrategie zeigen hier eine Weiterentwicklung zur ersten Strategie (bspw. beim Thema Abwärme), sollten jedoch weitergehen (bspw. bei den Themen Wasserbedarf und Sauerstoff) in der Schaffung einer umfassenden Klammer.

➤ **Früher Fokus auf den Wasserbedarf einer industrieskalierten Wasserstoffwirtschaft:**

Dem Faktor ‚Wasserbedarf‘ sollte frühzeitig ein besonderes Augenmerk der Politik gelten. Insbesondere für die Onshore-Standortwahl sollten (Grundwasser-) Prognosedaten flächendeckend verfügbar gemacht werden. Die Nutzung von Meerwasser erscheint hier ein bisher unterbewertetes Kriterium.

Saubere Definition von Netz- bzw. Systemdienlichkeit von Elektrolyseuren aus Sicht eines integrierten Zielnetzes schaffen:

In der historischen Rückschau der Energiewende-Debatten der letzten Jahre wurde Wasserstoff als Patentlösung für die

Definition der netz- bzw. systemdienlichen Eigenschaften von Elektrolyseuren nicht zu eng fassen

Einspeicherung von sog. Phantomstrom genannt, also dem Strom, der insbesondere bei Starkwindzeiten gar nicht erst erzeugt werden kann, weil Windparks (on- wie offshore) zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität abgeregelt werden müssen. Die Erlösausfälle der Betreiber sind zum Teil ein erhebliches Problem, welches sich durch die nun deutlich erhöhten Zubauziele bis Ende der 20er Jahre nochmal deutlich verstärken wird.

Die integrierten Planungen eines Klimaneutralitätsnetzes mit Betrachtung von sowohl Strom- als auch Gasnetzen müssen zügig rechtlich ermöglicht und Realität werden.

Die Definition des netz- vs. systemdienlichen Einsatzes von Elektrolyseuren ist aus Sicht von Offshore-Windparkbetreibern ein wichtiger Baustein. Einerseits ist hier die Mitigation der Verluste zu betrachten, wenn Elektrolyseure ausschließlich für die Umwandlung von andernfalls abzuregelndem Überschussstrom eingesetzt würden, was unter dem Gesichtspunkt eines notwendigen wirtschaftlichen Betriebs des Elektrolyseurs nicht nachhaltig sein dürfte.

Nichtsdestoweniger wird im aktuell gültigen Netzentwicklungsplan vom Neubau neuer Gaskraftwerke zur Abwehr von Dunkelflauten ausgegangen, welche „Wasserstoff-ready“ sein sollen und somit perspektivisch zur Rückverstromung von Wasserstoff eingesetzt werden sollen; um die hierfür benötigten Mengen Wasserstoff zu erzeugen, wird der Dauerbetrieb der noch zu bauenden Elektrolyseure unabdingbar sein.

Wenn Elektrolyseure hingegen auf einen Betrieb mit möglichst hoher Auslastung ausgelegt werden, muss dieser einerseits über eine gesicherte, im Zweifel über eine weitere (nachrangige) Netzanbindung verfügen, sollte also nicht allein über eine fluktuierende Einspeisequelle angebunden sein. Andererseits kommt er dann nicht mehr für die ad-hoc-Umwandlung von sonst abzuregelndem Strom in Starkwindzeiten in Betracht, weil er sowieso im Wesentlichen in Dauerbetrieb läuft und damit eine relativ stabile Last darstellt. **Für das Problem der Offshore (und auch Onshore!) Windparkbetreiber, wie mit dem zu erwartenden Anstieg des Ertragsausfalls durch abgeregelt Strommengen bis Anfang der 30er Jahre umzugehen ist, muss also weiterhin nach innovativen Lösungen gesucht werden.**