

# Masterplan Wasserstoff Stadt Cuxhaven

Abschlussbericht | Januar 2023



## Auftraggeberin

Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven  
Kapitän-Alexander-Straße 1  
27472 Cuxhaven

## Verfasserin

**cruh21** GmbH  
Erste Brunnenstraße 1  
22459 Hamburg

Dr. Stefan Wahlefeld, Senior Consultant  
Tel.: +49 40 3346553-63  
wahlefeld@cruh21.com  
Dr. Christine Partmann, Meryem Maghrebi, Hanna Naoumis, Sven Stephan

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Wasserstoff und dessen Derivate – Bedeutung für die Energiewende .....</b>	<b>3</b>
1.1	Eigenschaften von Wasserstoff .....	3
1.2	Wasserstoffproduktion und Farbenlehre von Wasserstoff.....	4
1.3	Speichermethoden für Wasserstoff .....	7
1.4	Transportmittel für Wasserstoff .....	9
1.5	Einsatzbereiche von Wasserstoff .....	13
1.6	Kosten von Wasserstoff .....	17
1.7	Wasserstoffmarkt – Ausblick.....	18
<b>2</b>	<b>Marktanalyse der Stadt Cuxhaven und Umgebung .....</b>	<b>20</b>
2.1	Standortanalyse .....	20
2.1.1	Strominfrastruktur und Nutzung von erneuerbaren Energien .....	20
2.1.2	Gasinfrastruktur.....	22
2.1.3	Wärmeversorgung.....	24
2.1.4	Verkehrsinfrastruktur .....	25
2.1.5	Hafeninfrastruktur .....	27
2.2	Wasserstoffmarktanalyse der Stadt Cuxhaven und der Region .....	31
2.2.1	Wasserstoffprojekte .....	31
2.2.2	Akteure .....	33
2.2.3	Analyse der bisherigen Entwicklungen .....	34
2.2.4	Hemmnisse und Bedarfe für den Aufbau eines Wasserstoffmarktes.....	38
2.3	Förderprogramme für Wasserstoffprojekte.....	39
<b>3</b>	<b>Handlungsempfehlungen für die Stadt Cuxhaven .....</b>	<b>41</b>
3.1	SWOT-Analyse der Stadt Cuxhaven und der Region .....	41
3.2	Handlungsempfehlungen für die Stadt Cuxhaven und die Region.....	43
1.	Empfehlung: Politische Rückendeckung in der Region sicherstellen .....	43
2.	Empfehlung: DOIZ und Hafen als Grundbaustein weiter festigen und ausbauen.....	44
3.	Empfehlung: Mit der Mobilität die regionale Wasserstoffwirtschaft in Cuxhaven vorantreiben .....	45
4.	Empfehlung: Ansiedlung von wasserstoff-weiterverarbeitender Industrie und Bereitstellung von wasserstoffbasierten Syntheseprodukten – insbesondere als maritimer Kraftstoff.....	46
5.	Empfehlung: Aufbau großer Speicher für Wasserstoff bzw. Bau einer Bunkerstation für Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte.....	47
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>49</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>51</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>57</b>

## 1 Wasserstoff und dessen Derivate – Bedeutung für die Energiewende

In einem künftigen Energiesystem, das auf erneuerbaren Energien basiert und gemäß den Verpflichtungen des Pariser Klimaschutzabkommens, des Europäischen Green Deals sowie in Deutschland gemäß dem Klimaschutzgesetz europaweit bis 2050 bzw. deutschlandweit bis 2045 vollständig treibhausgasneutral sein muss, wird Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien eine Schlüsselrolle spielen.

Als wichtiges Bindeglied ermöglicht Wasserstoff die bedarfsgerechte Nutzung volatiler (fluktuierender) erneuerbarer Wind- und Solarenergie. Durch Umwandlung und Speicherung des ungleichmäßig erzeugten Stroms in Form von Wasserstoff kann ein bedarfsgerechter Einsatz in stofflicher oder energetischer Form (Strom/Wärme) im Nachgang erfolgen. Damit können über den Einsatz von grünem Wasserstoff und seiner Derivate künftig auch solche Bereiche dekarbonisiert werden, die heute noch auf fossile Brennstoffe angewiesen sind und sich nicht direkt elektrifizieren lassen. Dazu zählen v. a. die Stahl- und Chemieindustrie sowie Teile des Verkehrs- und Wärmesektors. Hier hat Wasserstoff eine Berechtigung und ist das notwendige Mittel zum Zweck. Wichtig ist, dass es nicht darum geht, Wasserstoff per se als allgemeingültiges Substitut für fossile Energieträger einzusetzen, sondern eben genau dort, wo fossile Energieträger nicht durch direkten Stromeinsatz ersetzt werden können oder wo das Molekül Wasserstoff als Grundstoff dient.

Vor diesem Hintergrund hat das Thema Wasserstoff in den letzten Jahren massiv an Bedeutung gewonnen. Große Wirtschaftsnationen der Welt diskutieren derzeit mögliche Handlungsoptionen, bereiten entsprechende Maßnahmen vor und beschließen zielgerichtete Wasserstoffstrategien. Japan legte dabei Ende 2017 als erstes Land der Welt eine nationale Wasserstoffstrategie vor. Über 33 weitere Länder folgten daraufhin und veröffentlichten bis September 2022 eine Wasserstoffstrategie. Im Juli 2020 legte die Europäische Union eine eigene Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa vor. Mehr als die Hälfte dieser Strategien weisen konkrete Ziele zum Ausbau der Elektrolyseurkapazitäten auf. Diese sollen sich bis zum Jahr 2030 auf 88 Gigawatt summieren. (Bloomberg NEF 2022)

Im Fokus der Länder steht dabei eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen, eine Diversifizierung ihrer Energiequellen und die Verbesserung der Versorgungssicherheit. Viele Regierungen, etwa von Südkorea, Deutschland, den Niederlanden und Australien, versprechen sich von der Nutzung des alternativen Energieträgers darüber hinaus auch ökonomische Vorteile durch den Aufbau einer nationalen Wasserstoffwirtschaft, die Schaffung von Arbeitsplätzen oder Wasserstoff- und Technologieexporte. Um den Hochlauf zu fördern, setzt die Mehrheit der Staaten kurz- bis mittelfristig auf verschiedene Herstellungsarten von Wasserstoff, darunter den Einsatz von fossil hergestelltem grauem Wasserstoff (etwa mithilfe von konventionellem Erdgas), sowie blauen Wasserstoff, der fossil unter CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) gewonnen wird. Langfristig liegt der Fokus der meisten Wasserstoffstrategien, insbesondere in der EU, aber auf der Nutzung von grünem Wasserstoff auf Basis von erneuerbaren Energien. (Albrecht et al. 2020)

### 1.1 Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff – das häufigste Element in unserem Universum – ist in gebundener Form in einer Vielzahl an Verbindungen vorhanden. Es ist das erste Element im Periodensystem und besteht aus einem Proton und einem Elektron. Somit ist es das kleinste und vom Atomgewicht leichteste Element: 14-mal leichter als Luft. In Molekülform (H<sub>2</sub>) verbinden sich zwei Wasserstoffatome. Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein farb-, geruchs- und geschmackloses Gas und weist eine Dichte von 0,0841 kg/m<sup>3</sup> auf. Eine Verflüssigung erfolgt nur bei sehr niedrigen Temperaturen (-252,8°C) bei Normaldruck von 1,013 bar.

#### **Wasserstoff weist folgende positive Eigenschaften auf:**

- + Wasserstoff ist weder giftig noch ätzend oder radioaktiv noch entzündet er sich selbst.
- + Wasserstoff verbrennt mit farbloser Flamme rückstandsfrei, d. h. bei seiner Verbrennung entsteht nur Wasserdampf und eine geringe Menge Stickoxid durch die Reaktion mit Luftstickstoff.

- + Wasserstoff verfügt gegenüber allen anderen Energieträgern über die höchste Energiedichte pro Kilogramm (gravimetrische Dichte): Wasserstoff: 33,3 kWh/kg, Erdgas: 13,9 kWh/kg, Heizöl: 11,4 kWh/kg

Die gravimetrische Energiedichte ist von großem praktischem Interesse, denn je höher die Energiedichte ist, desto leichter ist dieser Energieträger bei gleicher gespeicherter Energiemenge im Vergleich mit einem anderen Energieträger mit kleinerer Energiedichte. Dem gegenüber steht allerdings die besonders geringe Energiedichte pro Volumen (volumetrische Energiedichte) von Wasserstoff bei Umgebungsdruck. Diese kann durch Komprimierung (Druckerhöhung) oder Verflüssigung (Kühlung) erhöht werden. Bei den heute üblichen Betriebsbereichen ist die volumetrische Energiedichte von flüssigem Wasserstoff zwischen 2 und 4 bar doppelt so hoch mit bis zu 2,3 kWh/l im Vergleich zu komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (cGH<sub>2</sub>) bei 700 bar mit 1,3 kWh/l. Deutlich höhere volumetrische Energiedichten werden mit Diesel erreicht. Abbildung 1 veranschaulicht den volumetrischen und energetischen Energieinhalt von komprimiertem Wasserstoff (cGH<sub>2</sub>) bei 350 bar und 700 bar, Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als Wasserstoffträger und Diesel.

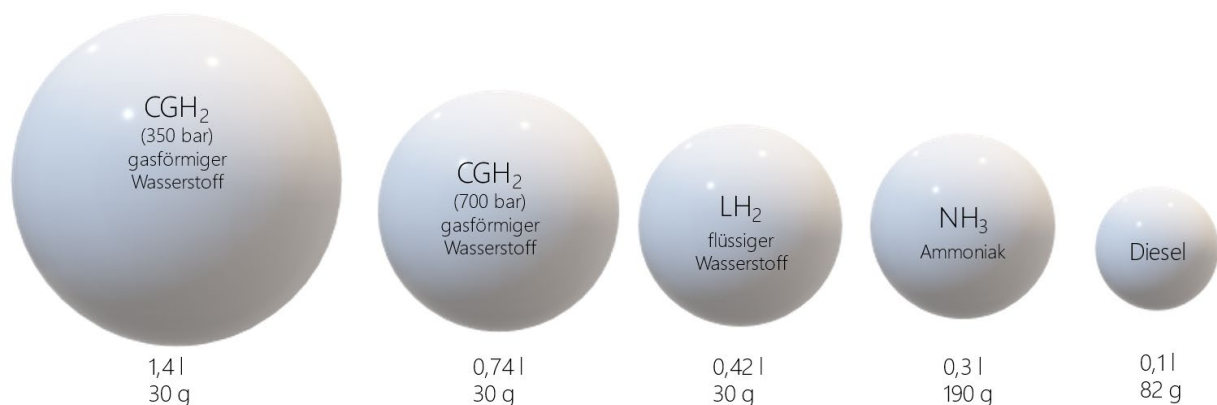


Abbildung 1: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten von Brennstoffen (Tropfengrößen mit fixem Energiegehalt von 1 kWh)

Beim Umgang mit Wasserstoff ist die hohe Entzündungsrate in Kontakt mit Luft zu beachten. Daher sind geeignete Maßnahmen wie die Entlüftung geschlossener Räume und die Permeabilität der Behälter zu berücksichtigen. (Manfred Klell et al. 2018)

## 1.2 Wasserstoffproduktion und Farbenlehre von Wasserstoff

### Farben des Wasserstoffs

Natürlicher Wasserstoff, sogenannter weißer Wasserstoff, kommt weltweit nur in sehr geringen Konzentrationen vor und wird daher in diesem Bericht nicht näher betrachtet. Der Großteil des Wasserstoffes auf der Erde liegt in chemisch gebundener Form vor, sodass dieser unter Energieeinsatz aus chemischen Verbindungen gewonnen werden muss. Die Verfahren, mit denen diese Gewinnung erfolgt, werden durch Farben gekennzeichnet und unterscheiden sich dahingehend, ob der entsprechende Erzeugungspfad auf fossilen oder erneuerbaren Energien basiert, ob Treibhausgase entstehen und wie mit diesen umgegangen wird.



**Pinker Wasserstoff:** Produktion durch Wasserelektrolyse unter Verwendung von Atomstrom



**Gelber Wasserstoff:** Produktion durch Wasserelektrolyse unter Verwendung eines Strommixes



**Grüner Wasserstoff:** Produktion durch Wasserelektrolyse, Thermolyse oder Photolyse unter Verwendung von EE-Strom, wobei während des Produktionsprozesses keine CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen. Alternativ kann grüner Wasserstoff durch Vergasung oder Reformierung von Biomasse produziert werden.



**Türkiser Wasserstoff:** Kann durch Pyrolyse gewonnen werden. Bei diesem Verfahren entsteht fester Kohlenstoff.



**Blauer Wasserstoff:** Herstellung aus fossilen Brennstoffen, wobei üblicherweise die Dampf-Reformierung von Erdgas zum Einsatz kommt. Bei diesem Verfahren entsteht CO<sub>2</sub>, das abgeschieden und gespeichert wird, sog. Carbon Capture and Storage (CCS)



**Grauer Wasserstoff:** Herstellung aus fossilen Brennstoffen, wobei üblicherweise die Dampf-Reformierung von Erdgas zum Einsatz kommt. Bei diesem Verfahren entsteht CO<sub>2</sub>, das gegenüber türkisen Wasserstoff nicht abgeschieden und gespeichert wird.



**Schwarzer Wasserstoff:** Herstellung durch Gasifizierung von Kohle, sodass es sich um ein sehr umweltschädliches Verfahren handelt, bei dem CO<sub>2</sub> und Kohlenmonoxid als Nebenprodukte entstehen.

Die Abbildung 2 gibt eine detaillierte Übersicht über die zuvor genannten Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff mit Informationen zu den Ausgangsstoffen und Energiequellen, den Nebenprodukte des Verfahrens und der daraus resultierenden Farbkennzeichnung des Wasserstoffs.

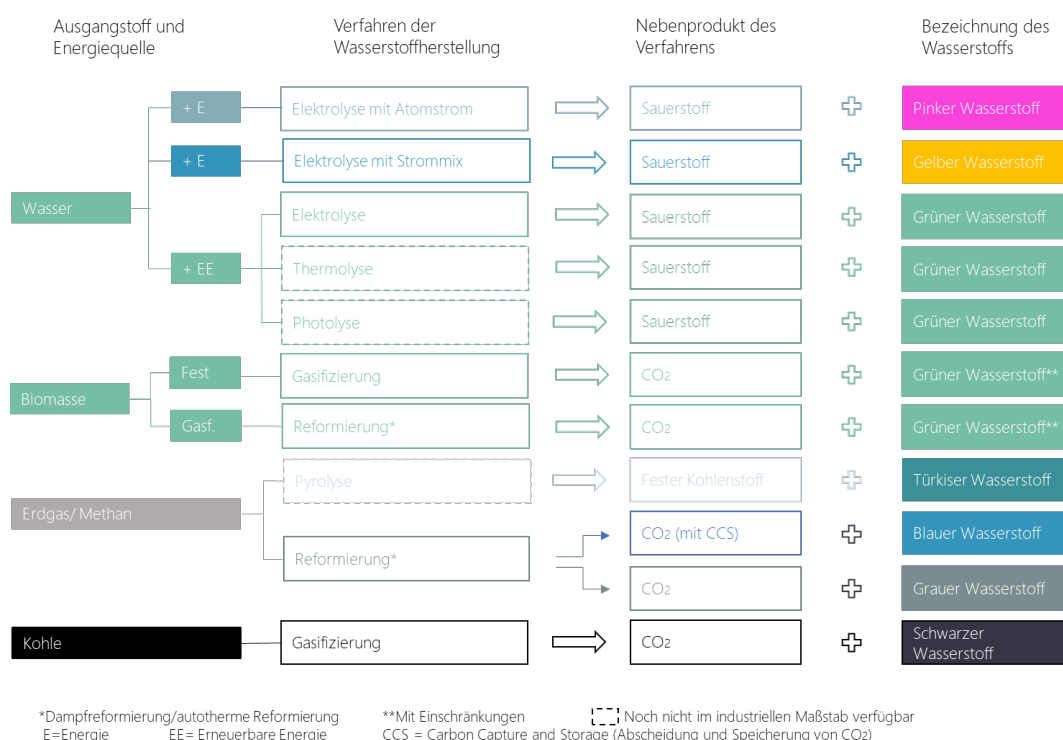


Abbildung 2: Herstellung von Wasserstoff und Farbkennzeichnung (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2021)

## Herstellung von grünem Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse

Die Herstellung von Wasserstoff aus Wasser und Strom nennt man Wasserelektrolyse bzw. Elektrolyse. Wird dabei Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt, handelt es sich um grünen Wasserstoff. In einer elektrochemischen Reaktion wird dabei Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der elektrische Strom kann somit in Form eines chemischen Moleküls (hier: Wasserstoff) gespeichert werden. Die Vorrichtung, in der diese Stoffumwandlung herbeigeführt wird, bezeichnet man als Elektrolyseur. Es gibt unterschiedliche Elektrolyseure, die sich hauptsächlich durch den verwendeten Elektrolyten, die Betriebstemperatur und durch den Aufbau der Elektrolysezelle unterscheiden. Nachfolgend wird auf die vier bekanntesten Arten der Elektrolyse – die AEL, die PEM, die AEM und die SOEC-Elektrolyse eingegangen und die Funktionsweise kurz erklärt. Die Tabelle 1 fasst abschließend die wichtigen Kennzahlen für Elektrolyseurtechnologien 2020 und im Jahr 2050 zusammen:

- **AEL - Alkalische Elektrolyse:** Bei der alkalischen Elektrolyse (kurz: AEL) wird eine Kalilauge als Elektrolyt verwendet. Die beiden Elektroden sind durch eine durchlässige Membran, das sogenannte Diaphragma, getrennt. Sie werden in eine wässrige Alkalilösung getaucht. Beim Anlegen einer Spannung wird an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff erzeugt. (Manfred Klell et al. 2018)

AEL wird seit dem Ende des 19. Jahrhunderts industriell genutzt und zeigte bereits im 20. Jahrhundert gute Wirkungsgrade sowie lange Laufzeiten bei stationärem Dauerbetrieb. (Fraunhofer 2019)

- **PEM - Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse:** Bei der Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (engl. Proton-Exchange-Membrane, kurz: PEM), oder auch Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse genannt, wird eine dünne Membran aus einem thermoplastischen Kunststoff (Ionomer) als Elektrolyt verwendet. Eine gasdichte Membran trennt die Elektroden, sodass nur positive Wasserstoffionen hindurchgelangen können. Es werden Edelmetalle verwendet, um Korrosion zu verhindern. Für das Verfahren ist ein hoher Reinheitsgrad des Wassers erforderlich. (Manfred Klell et al. 2018)

Die PEM-Elektrolyse wird seit etwa zwei Jahrzehnten erfolgreich in Nischenanwendungen eingesetzt. Mit Blick auf die kompakte Bauweise, die Eignung für den Betrieb unter Druck und die hohe Dynamik bei schnellen Lastwechseln wird diese Technologie als gut geeignet für die Kopplung mit erneuerbaren Energien angesehen. (Fraunhofer 2019)

- **AEM - Anion Exchange Membran:** Die AEM-Zelle ist gleich aufgebaut wie die PEM-Zelle; sie kann ebenfalls unter Druck und mit hoher elektrischer Leistung betrieben werden. Auch hier kommt eine ionenleitende Polymerelektrolytmembran zum Einsatz. Die Elektroden sind mit Katalysatorpartikeln beschichtet. Im Gegensatz zur PEM-Elektrolyse können Materialien verwendet werden, die frei von Edelmetallen wie Nickel sind, da das Verfahren in einer alkalischen Umgebung arbeitet. Wie beim AEL-Verfahren findet die Wasserspaltung auf der Kathodenseite statt. (Hickner et al. 2013)

- **SOEC - Festoxid-Elektrolysezelle:** Bei der Festoxid-Elektrolyse (engl. Solid Oxide Electrolysis, kurz: SOE) trennt ein festes poröses Keramikmaterial die beiden Halbzellen. Dampf wird in die poröse Kathode eingeleitet. Wenn Strom fließt, bewegt sich der Dampf zur Kathoden-Elektrolyt-Grenzfläche und bildet reines H<sub>2</sub> und Sauerstoffionen. Der Wasserstoff sammelt sich an der Kathodenoberfläche, während die Sauerstoffionen durch den dichten Elektrolyten wandern. Dieser muss so dicht sein, dass Dampf und Wasserstoffgas nicht hindurch diffundieren und die Rekombination oder Knallgasreaktion von H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> verhindern können. Die Sauerstoffionen werden an der Grenzfläche zwischen Elektrolyten und Anode zu reinem Sauerstoffgas oxidiert, das sich an der Oberfläche der Anode sammelt. (Manfred Klell et al. 2018)

Diese Art der Elektrolyse befindet sich aktuell im Übergang von Forschung zur industriellen Anwendung und passt besonders gut für die Kopplung mit industriellen Prozessen, da sie einen sehr guten elektrischen Wirkungsgrad aufweist, wenn Abwärme vor Ort auf einem Temperaturniveau von 200 °C oder höher verfügbar ist. (Fraunhofer 2019)

Es gibt etwa 40 Hersteller von Wasserelektrolyseuren (siehe Tabelle 11 im Anhang), wobei mehr als die Hälfte europäische Firmen sind, diese unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Technologie, Wasserstoffmenge und Leistungsklasse. Die aktuellen Marktanteile für Elektrolyseure liegen gemäß einer NOW-Studie bei 80 % AEL,

18 % PEM und 2 % SOEC. (Now GmbH 2018a) In Anbetracht des Zeitpunkts der Studie wurde die AEM-Technologie nicht berücksichtigt.

Die Unterschiede bei Kosten und Leistung dürften sich im Laufe der Zeit verringern, da Innovation und Masseneinsatz der verschiedenen Elektrolysetechnologien zu einer Kostenkonvergenz beitragen. (IRENA 2021) In Abschnitt 1.6 wird der Einfluss sinkender Investitionskosten auf die Kosten von grünem Wasserstoff näher beleuchtet.

Tabelle 1: Wichtige Kennzahlen für Elektrolyseurtechnologien im Jahr 2020/2050 (IRENA 2021)

	2020				2050			
	AEL	PEM	AEM	SOEC	AEL	PEM	AEM	SOEC
<b>Temperatur in °C</b>	70 – 90	50 – 80	40 – 60	700 – 850	> 90	80	80	< 600
<b>Druck in bar</b>	< 30	< 70	< 35	< 10	> 70	> 70	> 70	> 70
<b>Wirkungsgrad in kWh/kg<sub>H2</sub></b>	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
<b>Lebensdauer in h</b>	60.000	50.000-80.000	>5.000	<20.000	100.000	100.000	100.000	80.000
<b>Systemkosten in EUR/kW</b>	440 – 875	610 – 1.200	-	-	< 175	< 175	< 175	< 260

### 1.3 Speichermethoden für Wasserstoff

Da Wasserstoff nicht immer direkt am Ort der Produktion bzw. zeitlich direkt nach der Produktion genutzt wird, bedarf es Technologien zur Speicherung und zum Transport. Aus technischer Sicht gibt es verschiedene Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung (siehe Abbildung 3). Im Folgenden werden die derzeit relevantesten Technologien (rot markiert) näher betrachtet.

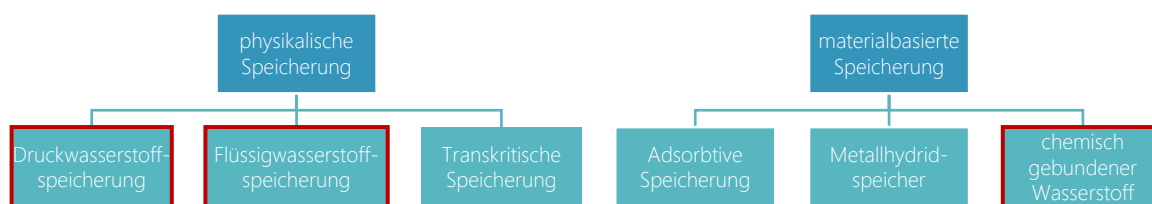


Abbildung 3: Speichermethoden für Wasserstoff

#### a) Druckwasserstoffspeicherung

Die wichtigste kommerzielle Speichermethode – vor allem für Endanwender – ist die Speicherung von Wasserstoff als Druckgas. Bei der Druckspeicherung wird der Wasserstoff verdichtet und in Drucktanks gespeichert. Der Transport von Wasserstoff erfolgt heute fast ausschließlich über die Straße in Druckbehältern meist in den Druckstufen 200 bar oder 300 bar. Seitens der Druckbehälter unterscheidet man zwischen Stahl- und Faserverbundbehältern, Typ I bis Typ IV, die für Drücke zwischen 10 bar und 1000 bar ausgelegt werden können.

Solche Hochdruckspeicher eignen sich vor allem auch für kleine Speichermengen und werden daher häufig beim Endanwender in Fahrzeugen wie LKW oder PKW verwendet. Je höher der Druck, desto größer ist die erreichte Speicherdichte. Für Nutzfahrzeuge hat sich beispielsweise ein Druckniveau von 350 bar und 700 bar für PKW durchgesetzt. Bei 350 bar beträgt die Dichte ca. 24 kg/m<sup>3</sup> bei 700 bar ca. 40 kg/m<sup>3</sup>. Der Energieaufwand für die Komprimierung auf 700 bar beträgt ca. 12 % des Energieinhaltes des Wasserstoffs.

Darüber hinaus können große Mengen Wasserstoff zukünftig in unterirdischen Kavernenspeichern eingelagert werden. Dort kann der Wasserstoff unter Druck gespeichert werden. In den USA betreibt Linde die weltweit erste Speicherkaverne für hochreinen Wasserstoff. In Deutschland erforscht der Energieversorger EWE gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Vernetzte Energiesysteme einen unterirdischen Kavernenspeicher im Salzgestein. (DVGW 2022; Warnecke und Röhling 2021; Meinen 2022)

### **b) Flüssigwasserstoffspeicherung**

Wasserstoff zu verflüssigen (LH<sub>2</sub>) stellt eine weitere Möglichkeit zur Speicherung und zum Transport dar, um bei gleichem Speichervolumen deutlich mehr Wasserstoff transportieren und lagern zu können. Zur Verflüssigung wird der Wasserstoff auf -253 °C gekühlt (Siedepunkt von Wasserstoff bei Umgebungsdruck (1,013 bar) -252,8°C), verdichtet (<10 bar) und in sogenannten Kryotanks gespeichert. Die Speicherdichte beträgt dann 71 kg/m<sup>3</sup>. Flüssiggasspeicher sind günstiger für größere Wasserstoff-Speichermengen und werden daher häufig beim Transport über weite Strecken eingesetzt. Der Nachteil ist das Abdampfen des Wasserstoffs, welches durch Erwärmung hervorgerufen wird. Der Energieaufwand für die Flüssiggasspeicherung lässt sich in folgende Anteile gliedern, jeweils bezogen auf den gespeicherten Energieinhalt: (Peter Kurzweil und Otto K. Dietlmeier 2018)

- 28-46 % für die Verflüssigung je nach Menge und angewandter Methode
- 6 % für den Transport zwischen Verflüssigungsstation und Tankstelle (Diesel- und Ottokraftstoffe 0,2 %)
- bis zu 3 % je Tag durch Boil-off-Verluste
- Verdampfungsverluste beim Umfüllen.

Gegenüber der Druckgasspeicherung stellt der Druck für die Gestaltung des Tanks kein Problem dar. Bei der Flüssiggasspeicherung muss jedoch großer Aufwand bei der Wärmedämmung der Tanks und der Leitungen betrieben werden. Trotz guter Wärmedämmung von Tanks ist ein Wärmestrom aus der Umgebung nicht zu vermeiden. Dieser führt zu einer teilweisen Verdampfung des Wasserstoffs. Weiterhin entsteht ein größerer Aufwand beim temperaturgeführten Transport, wodurch zusätzliche technische Anforderungen an die Logistik gestellt werden.

### **c) Chemisch gebundener Wasserstoff**

Bei der Speicherung von Wasserstoff durch chemische Bindung wird dieser durch eine chemische Reaktion in einen anderen Stoff überführt, der z. B. drucklos bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden kann.

Die LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier) nutzt eine organische Trägerflüssigkeit zum Speichern und Transportieren von Wasserstoff bei Umgebungstemperaturen. LOHC hat eine besonders hohe Energiedichte und nutzt ein schwer entflammbares Trägermaterial. Dadurch wird Wasserstoff einfach speicher- und transportierbar, ähnlich wie Erdöl oder Kraftstoffe. Zur Erzeugung von LOHC wird Wasserstoff chemisch an die Trägerflüssigkeit angebunden (Hydrierung). Diese Reaktion ist exotherm und es werden ca. 10 kWh thermische Energie freigesetzt, damit erhöht sich die Effizienz des Prozesses, wenn die entstehende Abwärme genutzt werden kann. Um Wasserstoff aus dem LOHC lösen zu können (Dehydrierung), benötigt man die Zufuhr von Energie in Form von Wärme (endotherme Reaktion). Hierbei werden pro Kilogramm erzeugtem Wasserstoff ca. 11 kWh thermische Energie benötigt. Diese kann durch den herausgelösten Wasserstoff, z. B. durch Verbrennung, selbst erzeugt werden.

Weitere Möglichkeiten sind beispielsweise die Speicherung von Wasserstoff in Form von Ammoniak oder Methanol. Beides sind sehr gebräuchliche Chemikalien, die als Grundstoff zu unterschiedlichen Produkten weiterverarbeitet werden. So ist Methanol eine der meisthergestellten organischen Chemikalien und Ausgangsstoff für eine Vielzahl von chemischen Prozessen, und Ammoniak wird beispielsweise in der Herstellung von Düngemitteln benötigt. Entsprechend gibt es bereits bestehende Infrastrukturen und Erfahrungen mit dem Transport und der Lagerung beider Chemikalien. Weiterhin können beide auch als Energieträger dienen und werden als synthetische Kraftstoffe oder E-Fuels bezeichnet. Bei ihrer Verbrennung emittieren diese nur Wasser und Stickstoff. So setzt die Schifffahrt auf Methanol als Treibstoff ihrer großen Frachtschiffe. Flüssiges Ammoniak



hat den Vorteil, dass es eine höhere Energiedichte als reiner Wasserstoff hat: ein Kubikmeter Ammoniak enthält 50 % mehr Energie (siehe Abbildung 1). Ammoniak wird zudem schon bei  $-33\text{ °C}$  flüssig, reiner Wasserstoff erst bei  $-253\text{ °C}$ . Dadurch ist der Aufwand für den Transport von Wasserstoff in Form von Ammoniak deutlicher geringer als für reinen Wasserstoff. Falls der im Ammoniak gebundene Wasserstoff benötigt wird (und nicht die Chemikalie als solche), kann in einem endothermen Ammoniak-Cracking-Prozess die Chemikalie in Stickstoff und Wasserstoff gespalten werden. Dieser Prozess ist sehr energieintensiv und wird derzeit beispielsweise im BMBF-geförderten Wasserstoffleitprojekt TransHyDE-Campfire erforscht.

## 1.4 Transportmittel für Wasserstoff

Kostenvergleichsstudien zeigen, dass es keine universelle Lösung für den Wasserstofftransport gibt, die für alle untersuchten Situationen gleichermaßen geeignet ist. Als entscheidender Faktor bei der Wahl einer Transportlösung zeichnete sich vor allem die Form der Endnutzung des Wasserstoffs sowie die Entfernung zwischen Erzeuger und Verbraucher ab. (Frithjof Staiß et al. 2022) Diese Transportmöglichkeiten werden im Folgenden beschrieben, wobei hauptsächlich auf den Transport von reinem Wasserstoff eingegangen wird und nicht auf den Transport von Wasserstoff in chemisch gebundener Form.

### a) Straßentransport

Ein Haupttransportweg für Wasserstoff ist aktuell die Straße. Der Wasserstoff wird von Zugmaschinen mit Sattelaufliegern (Trailer, siehe Abbildung 4) befördert, in denen der Wasserstoff gespeichert ist. Die transportierbare Wasserstoffkapazität ist dabei durch das zulässige Gesamtgewicht eines LKW limitiert. In Deutschland beträgt für die größte Nutzfahrzeugklasse das zulässige Gesamtgewicht 44 t, wobei nach Abzug des Eigengewichts der Zugmaschine ca. 28,5 t für den Trailer inklusive Beladung verbleiben. Je nach Trailerausführung können druckförmiger Wasserstoff, Flüssigwasserstoff oder aber auch LOHC transportiert werden.

- Die Transportkapazität von druckförmigem Wasserstoff per Trailer richtet sich nach dem jeweiligen Druck der Behälter, sodass bspw. 300 kg Wasserstoff/Trailer bei 200 bar (Behälter Typ I), 800 kg/Trailer bei 300 bar und 1100 kg/Trailer bei 500 bar (Behälter Typ IV) transportiert werden können.
- Flüssigwasserstoff wird in LH<sub>2</sub>-Trailern transportiert, welche wegen der höheren Dichte von flüssigem Wasserstoff bis zu 4.300 kg transportieren können.
- Für den Transport von LOHC können konventionelle Trailer eingesetzt werden, die für den Transport von Diesel oder Benzin verwendet werden. Hierbei können ca. 1.620 kg Wasserstoff effektiv transportiert werden.<sup>1</sup>

Neben den verkehrsträgerübergreifenden Vorschriften sind die Vorschriften für Gefahrgutbeförderungen auf der Straße relevant. (BMDV 2022b, 2022a)



Abbildung 4: Wasserstofftransport per Straße ©malp/stock.adobe.com

<sup>1</sup> Bei 28,5 t maximaler Zuladung und 6,2 % Masseanteil gespeichertem Wasserstoff beträgt die Wasserstoffmenge 1.800 kg, wobei nur 90 % des gespeicherten Wasserstoffs dehydriert werden können.

## b) Schienentransport

In Deutschland gibt es aktuell keinen Wasserstofftransport im Schienengüterverkehr. Laut einer Machbarkeitsstudie der Deutschen Bahn im Auftrag der Landesenergieagentur Hessen sei dies eine Alternative mit Potenzial zur Konkurrenz gegenüber dem Straßenverkehr. Wasserstofftransportbehälter können im Schienenverkehr in Standard 40-Fuß ISO Containern, welche auch im Straßenverkehr von Sattelzugmaschinen als Trailer transportierbar sind, transportiert werden. Da diese Standardcontainer bereits im alltäglichen Güterverkehr eingesetzt werden, ist die Logistikinfrastruktur bereits vorhanden. Zum aktuellen Zeitpunkt fehlt allerdings die Zulassung bzw. Zertifizierung der Standardcontainer als MEGC (Multiple-Element Gas Container) Ausführung für den Schienenverkehr, um Wasserstoff auf der Schiene transportieren zu können. Von der Firma NPROXX hergestellte Container haben ein nutzbares Füllvolumen in der 300 bar- bzw. 500 bar-Version von je 700 kg bzw. 1000 kg Druckwasserstoff. Für den Transport von LOHC könnte man perspektivisch sogar im täglichen Einsatz erprobte Mineralöl-Kesselwagen nutzen. Beim Zugtransport gilt es zudem eine maximale Zuglänge von 700 m die maximal zulässige Radlast von 22,5 t einzuhalten. Die spezifischen Transportkosten sind im Schienenverkehr ein sehr volatiler Kostenfaktor, der maßgeblich von den individuellen Streckenparametern wie Streckenauslastung, Rangierhalte und örtlichen Rahmenbedingungen auf der Transportstrecke abhängt. Eine valide Aussage, ob eine Belieferung per Schiene zukünftig wettbewerbsfähig ist, muss für jeden Einzelfall kalkuliert werden. (Vito Milella et al. 2020)

## c) Schiffstransport

Mit Blick auf die hohen Bedarfe ab 2030 ist davon auszugehen, dass bedeutsame Anteile von Wasserstoff und dessen Syntheseprodukten zukünftig nach Deutschland importiert werden (siehe Abbildung 5). (Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. 2021) Auf globaler Ebene könnte dem Schiffsverkehr daher eine wichtige Rolle als zusätzliches Transportmedium für den Aufbau einer Wasserstoffdistributionsinfrastruktur zukommen. Hierzu analysieren Staiß et al. in ihrer Studie Optionen für den Import von grünen Wasserstoff nach Deutschland bis zum Jahr 2030 (Staiß et al. 2022). Der Fokus liegt hier insbesondere auf dem Schifftransport von LH<sub>2</sub>, LOHC, Ammoniak, Methanol und synthetischen Fischer-Tropsch-Produkten. Der Transport von gasförmigem Wasserstoff wird wegen zu geringer Energiespeicherdichte nicht als wirtschaftlich erachtet.

Die Gefahrguteigenschaften von gasförmigem Wasserstoff werden nach der international gültigen GHS-Kennzeichnung als „extrem entzündlich“ deklariert, weshalb Transportgefäße wie z. B. Tankcontainer an speziellen Orten auf Schiffen untergebracht werden müssen und mit Warntafeln für Gefahrennummer 23 und UN-Nummer 1049 versehen werden müssen. Den Transport von Wasserstoff auf Schiffen regelt der International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG) zusammen mit den Vorgaben des Internationalen Übereinkommens zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS). (Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. 2021)

Auf nationaler Ebene könnten die Flussverbindungen eine entscheidende Rolle spielen, wobei Literatur bezüglich des Wasserstofftransports per Schiff auf nationaler Ebene noch nicht vorhanden ist.



Abbildung 5: Schiffstransport von flüssigem Wasserstoff mit Komposit-Kryotanks ©AA+W/stock.adobe.com

#### d) Pipelinetransport

Für den Transport gasförmiger Energieträger bietet es sich an, existierende oder ehemalige Gasleitungen zu nutzen. In bestehende Erdgasleitungen kann Wasserstoff beigemischt werden, um dann zur Wärmebereitstellung in den herkömmlichen Erdgaskesseln in Haushalten, Gewerbe und Industrie zur Anwendung zu kommen. Das bestehende Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) ermöglicht bereits heute überall dort, wo es keine Einschränkungen durch spezifische Anwendungen gibt, Beimischungen von knapp 10 Vol.-% in das vorhandene Gasnetz. Technische Erhebungen u. a. des DVGW gehen davon aus, dass bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff in die Erdgasversorgung beigemischt werden können. Die Beimischung mindert den Wert des Wasserstoffs und sorgt für unterschiedliche Qualität des transportierten Erdgases in Europa. Verbraucher entlang der Pipeline, die nicht mit dem beigemischten Wasserstoff umgehen können, müssen geschützt werden; Kunden mit spezifischen Wasserstoff-Anwendungen müssen den beigemischten Wasserstoff erst wieder vom Erdgasstrom trennen, bevor sie diesen in ihre Prozesse einspeisen. Linde hat hierzu in Dormagen die weltweit erste Demonstrationsanlage zur Rückgewinnung von Wasserstoff aus Erdgasströmen in industriellem Maßstab realisiert. Zum Einsatz kommt in Dormagen die HISELECT-Evonik-Membrantechnologie. Das verarbeitete Gasgemisch enthält zwischen 5 und 60 % Wasserstoff. Der mittels Membran abgeschiedene Wasserstoff hat eine Konzentration von bis zu 90 %. Benötigt ein Kunde für seine Anwendungen eine höhere Konzentration, kommt zusätzlich eine Druckwechseladsorptionsanlage (PSA) zum Einsatz. Damit lässt sich ein Reinheitsgrad von bis zu 99,9999 % erreichen. (DVGW 2022)

Für ausgewählte Standorte gibt es darüber hinaus lokale/regionale Wasserstoff-Rohrleitungsnetze, deren Einsatz zukünftig an Bedeutung gewinnen könnte. Bislang existieren nur drei reine Wasserstoff-Pipelines in Deutschland: im Ruhrgebiet, in Leuna (Sachsen-Anhalt) und Höchst bei Frankfurt. Die Betreiber der Erdgasnetze planen, die Wasserstoffnetze bis 2025 auf eine Länge von 500 km auszubauen.

Mit Blick auf REPowerEU und als Reaktion auf die beschleunigte Entwicklung des Wasserstoffmarktes wurde im April 2022 eine beschleunigte Vision für ein europäisches Wasserstoff-Backbone (engl. European Hydrogen Backbone, kurz EHB, Abbildung 6) vorgestellt. Demnach könnten bis 2030 fünf paneuropäische Wasserstoffversorgungs- und -import-Korridore entstehen, die Industriecluster, Häfen und Wasserstofftäler mit Wasserstoffversorgungsregionen verbinden. Die Wasserstoffinfrastruktur kann dann bis zum Jahr 2040 zu einem europaweiten Netz mit einer Länge von fast 53.000 km ausgebaut werden, das weitgehend auf der wiederverwendeten bestehenden Erdgasinfrastruktur basiert. Darüber hinaus zeigen die Karten mögliche zusätzliche Routen, die entstehen könnten, einschließlich potenzieller Offshore-Verbindungsleitungen und Pipelines in Regionen außerhalb des Gebiets, in dem die EHB-Mitglieder aktiv sind. Das Onshore-Backbone würde sich auf über 1.000 km belaufen. (van Rossum et al. 2022) Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile der einzelnen Transportmittel zusammen.



Abbildung 6: Wasserstofftransport per Pipeline ©malp/stock.adobe.com

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Transportmittel

<b>Transport per</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Straße</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flexibler Transport zum Verbraucher, wenn keine Pipeline vorhanden ist</li> <li>▪ Einsatz unterschiedlicher Speicher, Druckbehälter für gasförmigen Wasserstoff und Tanks für flüssigen Wasserstoff</li> <li>▪ Bereits erprobte Technologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relativ hoher Transportaufwand</li> <li>▪ Transport nur in geringen Mengen möglich</li> <li>▪ Nachhaltiger Transport nur mit E-LKW oder wasserstoffgetriebenen LKW möglich</li> </ul>
<b>Schiene</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transport von größeren Mengen als auf der Straße möglich</li> <li>▪ Umweltfreundlicher Transport bei elektrifiziertem Streckennetz oder Nutzung von Brennstoffzellenzügen</li> <li>▪ Entlastung des Straßennetzes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bislang keine zugelassenen Transportbehälter</li> <li>▪ Transport aktuell noch teurer im Vergleich zum Transport über die Straße</li> </ul>
<b>Schiff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geeignete Transportmöglichkeit für größere Entfernungen, zum Beispiel zwischen Kontinenten</li> <li>▪ Transport in flüssiger Form verringert den Aufwand und nutzt höhere Energiedichte</li> <li>▪ Nachhaltiger Transport bei Schiffen mit Wasserstoff als Antriebsenergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ggf. Umwandlungsverluste des Wasserstoffs</li> <li>▪ Energieaufwand für Transport</li> <li>▪ Treibhausgasemissionen bei Frachtschiffen mit Dieselmotor</li> <li>▪ Sehr lange Transportdauer (je nach Strecke)</li> </ul>
<b>Pipeline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transport großer Mengen</li> <li>▪ Pipelines können viele Verbraucher mit Wasserstoff versorgen</li> <li>▪ Nutzung von ehemaligen Erdgasleitungen möglich</li> <li>▪ Gasförmiger Transport möglich</li> <li>▪ Günstigster Transport innerhalb von Deutschland und Europa</li> <li>▪ Geringe Verluste und geringer Transportaufwand</li> <li>▪ Geringe laufende Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erzeuger und Verbraucher müssen an das Leitungsnetz angeschlossen sein</li> <li>▪ Bisher nur geringes Leitungsnetz vorhanden</li> <li>▪ Hoher Investitionsaufwand für den Ausbau der Transportleitungen</li> <li>▪ Lange Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie Bauzeiten für neue Pipelines</li> <li>▪ Hoher Aufwand für Anschluss an Leitungsnetz</li> <li>▪ Größere Aufwendung von elektrischer Energie (Verdichterleistung), um den Transportdruck aufrecht zu erhalten (größerer Druckverlust bei gleichem Energieinhalt)</li> </ul>

## 1.5 Einsatzbereiche von Wasserstoff

Der Einsatzbereich von Wasserstoff erstreckt sich über alle Sektoren (Industriesektor, Verkehrssektor, Gebäudesektor und Stromsektor) (siehe Abbildung 7), wobei die aktuelle Wasserstoffnutzung von industriellen Anwendungen dominiert wird. Wird grüner Wasserstoff eingesetzt, trägt dies zur Defossilisierung und Treibhausgasreduktion energieintensiver Branchen bei.

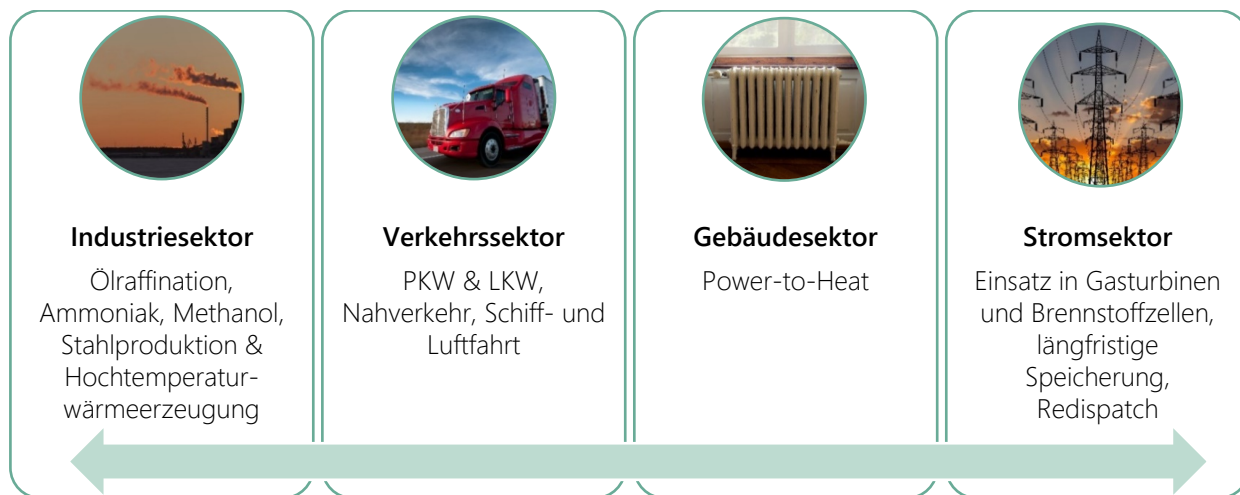


Abbildung 7: Sektorübergreifender Einsatz von Wasserstoff

### Industriesektor

Die vier aktuell wichtigsten Einzelverwendungen von Wasserstoff sind die Ölraffination (33 %), die Ammoniakproduktion (27 %), die Methanolherstellung (11 %) und die Stahlproduktion durch Direktreduktion von Eisenerz (3 %). Das zukünftige Wachstum hängt von der Entwicklung der Nachfrage nach nachgelagerten Produkten ab, insbesondere nach raffinierten Kraftstoffen für den Verkehr, Düngemitteln für die Nahrungsmittelproduktion und nach Baumaterialien für Gebäude. (International Energy Agency 2019)

Heutzutage werden mehr als 60 % des in Raffinerien verwendeten Wasserstoffs aus Erdgas hergestellt (grauer Wasserstoff). Strengere Luftschadstoffnormen könnten die Verwendung von Wasserstoff in Raffinerien bis 2030 um 7 % auf 41 Mio. t/Jahr erhöhen, obwohl weitere politische Änderungen zur Eindämmung der steigenden Ölnachfrage das Wachstumstempo dämpfen könnten. Die derzeitigen weltweiten Raffineriekapazitäten werden im Allgemeinen als ausreichend angesehen, um die steigende Ölnachfrage zu decken, was bedeutet, dass der Großteil der künftigen Wasserstoffnachfrage aus bestehenden Anlagen stammen dürfte, die bereits mit Wasserstoffproduktionseinheiten ausgestattet sind. Dies legt nahe, dass die Nachrüstung von CCS (siehe oben „blauer Wasserstoff“) eine geeignete Option zur Verringerung der damit verbundenen Emissionen darstellt. (International Energy Agency 2019)

Die Nachfrage nach Ammoniak und Methanol wird kurz- bis mittelfristig voraussichtlich steigen, wobei neue Kapazitäten eine wichtige Gelegenheit bieten, emissionsarme Wasserstoffpfade auszubauen. Eine höhere Effizienz kann die Gesamtnachfrage senken, doch wird dies das Nachfragewachstum nur teilweise ausgleichen. Ob über Erdgas mit CCS oder Elektrolyse – die Technologie ist verfügbar, um das für Ammoniak und Methanol prognostizierte zusätzliche Wachstum der Wasserstoffnachfrage (von 44 Mio. t/Jahr heute auf 57 Mio. t/Jahr bis 2030) auf kohlenstoffarme Weise zu decken. Vorrangig würde die Substitution jeder weiteren kohlebasierten Produktion ohne CCS durch emissionsarme Pfade erheblich zur Emissionssenkung beitragen. (International Energy Agency 2019)

Längerfristig bieten die Stahlindustrie und die Hochtemperaturwärmeerzeugung ein enormes Potenzial für den Einsatz von grünem Wasserstoff zur Dekarbonisierung. Vorausgesetzt, dass die technologischen Herausforderungen, die derzeit einer breiten Einführung von Wasserstoff in diesen Bereichen im Wege stehen, überwunden werden können. Langfristig dürfte es technisch möglich sein, den gesamten Primärstahl mit

Wasserstoff zu erzeugen. Doch würde dies enorme Mengen Strom aus erneuerbaren Energien erfordern (etwa 2.500 TWh/Jahr, mithin etwa 10 % der heutigen weltweiten Stromerzeugung) und wäre ohne politische Unterstützung nur bei sehr niedrigen Strompreisen wirtschaftlich. Die Stahlnachfrage wird voraussichtlich von 4 Mio. t H<sub>2</sub>/Jahr um etwa 6 % bis 2030 steigen. (International Energy Agency 2019)

## Verkehrssektor

Über die bestehenden industriellen Anwendungen hinaus sind Wasserstoff und seine Derivate in vielen Bereichen, einschließlich der Mobilität, langfristig einsetzbar. In Abbildung 8 sind die verschiedenen TRL-Stufen der mobilen Wasserstoffanwendungen aufgeführt. Der Verkehrssektor zeichnet sich durch einen hohen Endenergieverbrauch (insgesamt 36.078 GWh im Jahr 2018 in Deutschland) sowie eine eingeschränkte Elektrifizierungsmöglichkeit aus. Dabei waren lediglich 5,7 % dieser Energie regenerativen Ursprungs. (BMW 2018) Durch den Austausch eines konventionellen Verbrennungsmotors gegen einen Wasserstoffverbrennungsmotor ist es möglich, große Teile des Antriebsstrangs weiter zu nutzen. Die wichtigste Anwendung für die Zukunft wird jedoch in der Brennstoffzelle gesehen.

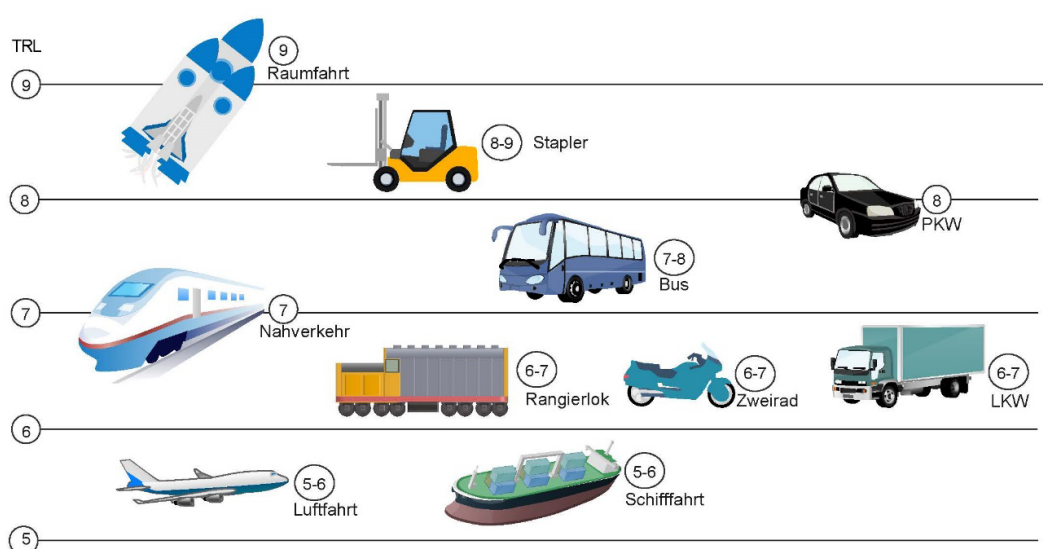


Abbildung 8: Technologiereifegrade mobiler Wasserstoff-Anwendungen

Für den Straßenverkehr sind Brennstoffzellen (engl. Fuel-Cell Vehicles, kurz: FCEV) besonders interessant. Weltweit gibt es etwa 12.000 leichte Nutzfahrzeuge, vor allem in Kalifornien, Japan und Europa. Darüber hinaus werden etwa tausend Busse und Lastwagen mit Wasserstoffantrieb in Demonstrationsprojekten getestet. Da der weltweite Fahrzeugbestand voraussichtlich weiterwachsen wird, könnte Wasserstoff einen Teil dieses Marktes erobern. Die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff-FCEV im Verkehr hängt von den Kosten der Brennstoffzellen sowie vom Bau und der Nutzung von Tankstellen ab. Bei PKWs geht es in erster Linie darum, die Kosten für Brennstoffzellen und die Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug zu senken. Dadurch könnten diese bei Reichweiten von 400-500 km mit batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen konkurrieren und für Verbraucher, die Wert auf Reichweite legen, attraktiv werden. Bei Lastkraftwagen muss vorrangig der Lieferpreis für Wasserstoff gesenkt werden. (International Energy Agency 2019)

Es existieren bereits regulatorische Ansätze, die auf eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit grünstrombasierter Kraftstoffe abzielen. Nennenswert ist die Clean Vehicle Directive (Richtlinie (EU) 2019/1161). Diese fördert umweltschonende Mobilitätslösungen bei öffentlichen Ausschreibungen. Die Richtlinie definiert "saubere Fahrzeuge": Für leichte Nutzfahrzeuge sind die Emissionen bis 2025 auf höchstens 50 g/km CO<sub>2</sub> und bis zu 80 % der geltenden Grenzwerte für NO<sub>x</sub> und PN im realen Fahrbetrieb begrenzt; ab 2026 gilt die Definition nur noch für Nullemissionsfahrzeuge. Schwere Nutzfahrzeuge sollen außerdem nur noch mit alternativen Kraftstoffen einschließlich Wasserstoff betrieben werden. Ferner legt die Richtlinie nationale Ziele für die öffentliche

Beschaffung fest. Für Deutschland wurde ein Mindestanteil von 38,5 % an sauberen Fahrzeugen festgelegt. (European Parliament & Council 2019) Im Vorfeld muss jedoch eine entsprechende H<sub>2</sub>-Tankstelleninfrastruktur errichtet werden. Aktuell sind in Deutschland 95 H<sub>2</sub>-Tankstellen in Betrieb und 7 in Realisierung. Mit diesen Zahlen ist Deutschland nach Japan das Land mit der zweitgrößten Wasserstofftankstellen-Infrastruktur. Bis 2030 sollte der Markthochlauf mit einem Netz von 1000 H<sub>2</sub>-Tankstellen sichergestellt werden. (H2 Mobility 2022)

Im August 2022 wurde in Niedersachsen nach Angaben der Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen die weltweit erste Flotte von wasserstoffbetriebenen Personenzügen zwischen Buxtehude, Bremerhaven und Cuxhaven in Betrieb genommen. Zum offiziellen Start am 24.08.2022 waren zunächst fünf Züge im Einsatz, die anderen neun sollen bis zum Jahresende hinzukommen. (Dirk Altwig et al. 2022) Mit Blick darauf, dass der Schienenverkehr in vielen Ländern ein Haupttransportmittel ist, können Wasserstoffzüge im Schienengüterverkehr am wettbewerbsfähigsten sein, indem regionale Strecken mit geringer Netzauslastung und grenzüberschreitendem Güterverkehr geschaffen werden. (International Energy Agency 2019)

In der Schiff- und Luftfahrt, in denen nur begrenzte Möglichkeiten für den Einsatz alternativer Antriebstechnologien bestehen, stellen wasserstoffbasierte Antriebe, nach derzeitigem Wissensstand die einzige Dekarbonisierungsoption dar. Im Vergleich zu Antrieben mit ölbasierten Kraftstoffen (Diesel, Kerosin) sind ihre Produktionskosten derzeit aber noch sehr hoch. In der Luftfahrt ist auch grüner Wasserstoff in Form von strombasierten Flüssigkraftstoffen (Power-to-Liquid) eine mögliche Alternative zu Biokraftstoffen. Doch sind diese wegen ihres Flächenbedarfs nur begrenzt vorhanden. Darüber hinaus werfen sie schwierige Fragen bezüglich der Nachhaltigkeit der Bioenergie auf und reichen infolgedessen zumindest nicht für eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors aus. (International Energy Agency 2019)

### **Exkurs: Schifffahrt**

Eine langfristige Verwendung sollen erneuerbare Energieträger im Schiffsverkehr finden. Im Jahr 2018 verursachte der weltweite maritime Verkehr mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als Deutschland insgesamt. (Umweltbundesamt 2022) In Zahlen sind das 1,076 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente und 2,76 Prozent der weltweiten Treibhausgas-Emissionen. (DNV 2022)

Die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) hat deshalb auch Maßnahmen gegen die prognostizierten, steigenden Emissionen verabschiedet. In einer Einigung der Mitgliedsstaaten aus dem Jahr 2018 sollen die Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 50% reduziert werden. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, müssten jedoch noch weitreichendere Maßnahmen ergriffen werden. Einige Länder weigerten sich 2021 jedoch, bis 2050 einen emissionsfreien, klimaneutralen Schiffsverkehr zu etablieren. Eine erneute Revision der Ziele ist für 2023 angesetzt. (Clean Shipping Coalition 2021) Im Fit for 55 Gesetespaket der Europäischen Union soll der Schiffsverkehr in das EU-Emissionshandelssystem (ETS) aufgenommen werden. (Europäische Kommission 2022) Im Sommer 2022 stimmte das Europäische Parlament dafür, dass der Schifffahrtssektor zusammen mit dem Verkehrs- und Gebäudesektor ein separates ETS (ETS II) erhalten soll. So sieht es die Einigung im Trilog im Rahmen der Fit for 55-Verhandlungen zwischen Rat, Kommission und Parlament vor. Es fehlt noch die Zustimmung der Mitgliedsstaaten und des gesamten Parlaments. (Tagesspiegel 2022)

Die Umrüstung der Schiffsantriebe stellt die Industrie vor Herausforderungen. Während Antriebe von kleineren Passagierfähren, Motorbooten und Binnenschiffen beispielsweise auch elektrifiziert werden könnten, ist dies bei Schiffen größerer Leistung oder Reichweite nicht ohne weiteres möglich. Dazu zählen vor allem Seeschiffe wie Tanker, Kreuzfahrt- und Containerschiffe oder auch Küstenmotorschiffe und RoPax-Fähren. Die derzeitigen Kraftstoffe Marinediesel und Schweröle müssen durch klimafreundliche Alternativen ersetzt werden. Auch der Einsatz von natürlichem, verflüssigtem Erdgas (Liquid Natural Gas, LNG) und Methanol bietet kaum eine Alternative. Die Reduktion der Emissionen liegt hier lediglich zwischen 15 bis 25% bzw. 10%. (DNV 2021) Power-to-X Produkte sind als Kraftstoff daher zukünftig unverzichtbar. Dazu zählen Wasserstoff (druckförmig, flüssig, in Trägerölen (LOHC) gespeichert), Ammoniak, Methanol, synthetischer Diesel und synthetisches Erdgas (Synthetic

Natural Gas, SNG). Als Antriebsmaschinen sind neben Verbrennungsmotoren auch Brennstoffzellen in Kombination mit Elektromotoren möglich.

Die unterschiedlichen – auf erneuerbaren Energieträgern basierenden – Antriebstechnologien unterscheiden sich noch deutlich in ihrem technischen Reifegrad. Wasserstoff kann bereits heute in Dual-Fuel-Verbrennungsmotoren sowie in Brennstoffzellen eingesetzt werden. Reine Wasserstoffverbrennungsmotoren sind in den nächsten zwei Jahren zu erwarten. Dies stellt vor allem eine mögliche Alternative für Privat- und Arbeitsboote oder kleinere Fähren dar. Mit Methanol betriebene Verbrennungsmotoren befinden sich bereits seit Jahren auf dem Markt. Aktuell werden auch Methanolbrennstoffzellen in Demonstrationsprojekten erprobt. Als weiteres vielversprechendes Antriebsmittel wird Ammoniak gehandelt. Derzeit befassen sich zahlreiche Projekte mit der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Vor allem die Abgasreinigung ist von Bedeutung, da die Menge an ausgestoßenen, klimaschädlichen Stickoxiden geringgehalten werden muss. Synthetisches Methan kann – wie natürliches Methan – bereits in Schiffsmotoren eingesetzt werden. Der Entwicklungsbedarf liegt hier jedoch bei der Reduktion des Methan-Schlupfes. Unverbranntes SNG, welches aus dem Motor entweicht und in die Atmosphäre gelangt, ist dort 28-mal klimaschädlicher als CO<sub>2</sub>. (MAN 2022)

An der Vielzahl der genannten Möglichkeiten zeichnet sich bereits eine der Herausforderungen ab: Wasserstoff und jedes seiner Derivate weisen Vor- und Nachteile auf, sodass sich noch keines als klarer Favorit herausgestellt hat. Nicht alle eignen sich in gleicher Form, um die verschiedenen Schiffstypen mit ihren sich unterscheidenden Einsatzprofilen, Fahrstrecken und Größen anzutreiben.

Das liegt in erster Linie an der volumetrischen Energiedichte der Medien und wie sie in Tanks an Bord gespeichert werden können. Um ein Beispiel zu geben: Ein Kubikmeter auf 700 bar komprimierter Wasserstoff trägt etwa nur ein Drittel der Energie wie die gleiche Menge Ammoniak. Dementsprechend nimmt druckförmiger Wasserstoff viel mehr Raum auf dem Schiff ein. Für Passagierfähren oder Binnenschiffe, die regelmäßigen Zugang zu einer Tankinfrastruktur haben, ist dies kein Ausschlusskriterium, für seegehende Containerschiffe hingegen schon.

Die Motoren- und die Brennstoffzellenentwicklung sowie die Abwägung, welches Medium auf welchem Schiffstyp zum Einsatz kommt, sind dabei nicht die einzigen Herausforderungen. Eine nachhaltige Schifffahrt wird derzeit vor allem durch die geringe Verfügbarkeit der PtX-Produkte als Kraftstoffe und deren hohe Preise gebremst. (DVZ 2022) Im Hinblick auf die Lebensdauer eines Schiffes von mehreren Jahrzehnten und die damit verbundenen hohen Investitionskosten ist die Entscheidung für eine alternative Antriebstechnologie eine langfristige. Der Umbau auf eine andere Antriebsart gestaltet sich mitunter technisch schwierig und ist oft nicht wirtschaftlich. Um das zu umgehen, sollte bereits bei Entwurf und Bau von Schiffen der spätere Einsatz von alternativen Kraftstoffen berücksichtigt werden.

Auch regulatorisch gibt es noch offene Punkte. Da die einzelnen Stoffe sehr unterschiedlich in Aggregatzustand und Gefahrenpotenzial sind, gibt es keine einheitlichen Regeln und Standards. Für einige Derivate müssen sie erst erarbeitet werden. (Esfeh et al. 2022; McKinsey & Company 2022) Für einen sicheren Umgang sind zudem Schulungen und Weiterbildungen der Schiffsbesatzung und des Hafenpersonals nötig.

Eine weitere Herausforderung für den internationalen Seeverkehr stellt die Verfügbarkeit der Kraftstoffe in den Zielhäfen dar. Die niedrigere Energiedichte von Wasserstoff, Ammoniak und Methanol verringert bei gleichbleibender Tankgröße auch die Reichweite der Schiffe. Werden größere Treibstofftanks verbaut, verringert sich wiederum das Frachtvolumen. Für eine klimafreundliche Schifffahrt wird es daher immer wichtiger, Schiffe auf ihre Routen hin anzupassen. (DNV 2021) Als Lösungsmöglichkeit bieten sich „Grüne Korridore“ an. Dies sind wichtige Handelswege, entlang derer sich eine emissionsfreie Schifffahrt entwickeln kann. Zu den wichtigen Akteuren gehören dabei Reedereien, Kraftstoffhersteller, Frachteigner, Regulierungs- und Hafenbehörden und Klassifikationsgesellschaften. Die ersten Grünen Korridore könnten dann positive Übertragungseffekte auf den restlichen Verkehr haben. (Getting to Zero Coalition 2021) Bei der UN-Klimaschutzkonferenz in Glasgow unterzeichneten bereits 22 Nationen, darunter Deutschland, eine Erklärung, bis 2025 mindestens sechs solche Korridore einzurichten. (UN Climate Change Conference UK 2021)



## Gebäudesektor

Als weiterer Nutzungspfad wird der Gebäude- bzw. Wärmesektor diskutiert, sei es durch Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellenheizungen oder durch direkte Verbrennung anstelle von Erdgas. Wasserstoff wird bislang im weltweiten Gebäudesektor nur in sehr geringem Maße als Energiequelle genutzt, obwohl verschiedene Einsatzmöglichkeiten erprobt werden. Aus Effizienzgründen ist allerdings die Gebäudeheizung mittels Einsatz von Wärmepumpen oder Wärmenetzen vorzuziehen (BUND 2016). Wo dies nicht möglich ist (bspw. bei dicht besiedelten Wohngebiete und Gewerbegebäuden) kann der Einsatz wasserstoffbasierter Heizungen aber sinnvoll sein (Sterner 2017).

## Stromsektor

In einem Energiesystem, das auf erneuerbaren Energien beruht, kann Wasserstoff für eine resiliente Stromversorgung sorgen. Das bedeutet, dass „Dunkelflauten“, also längere Phasen einer verringerten Wind- und Solarstromerzeugung, durch die Rückverstromung in Gasturbinen oder Brennstoffzellen von zuvor gespeichertem grünem Wasserstoff abgefangen werden können. (Stecherle et al. 2020) Darüber hinaus könnte Ammoniak kurzfristig in Kohlekraftwerken mitverfeuert werden, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Als Brückentechnologie ist eine teilweise Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz möglich. Der netzdienliche Einsatz von Elektrolyseuren birgt kurzfristige Vorteile angesichts eines zu langsamen Netzausbaus. Kommt es nämlich aktuell zu Spitzen in der Stromerzeugung durch hohe Sonneneinstrahlung und Windaufkommen, müssen EE-Anlagen zeitweise abgeregelt werden (sog. Redispatch), um eine Netzüberlastung zu verhindern. Neben der mangelnden Effizienz ist das kostenintensiv, da Betreiber, deren Anlagen abgeregelt werden, von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) entschädigt werden müssen. (International Energy Agency 2019)

### 1.6 Kosten von Wasserstoff

Die drei wichtigsten Einflussfaktoren auf die Gesteungskosten von grünem Wasserstoff sind

- die Kosten des Stroms aus erneuerbaren Energien (Strombezugskosten),
- die Kapazitätskosten der Elektrolyseure, welche Investitions- und Finanzierungskosten enthalten
- sowie die erreichte Kapazitätsauslastung.

Der größte Kostenfaktor für grünen Wasserstoff sind die Strombezugskosten, auch wenn diese bereits durch den wettbewerblichen Ausbau erneuerbarer Energien gesunken sind. In einigen Fällen kann grüner Wasserstoff schon heute an idealen Standorten mit den niedrigsten Kosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen die Kostenwettbewerbsfähigkeit mit fossilem Wasserstoff erreichen. (Andreas Gelfort et al. 2022) Bei konstanten Strompreisen gilt: Je höher die Anzahl der Volllaststunden, desto geringer sind die Wasserstoffgestehungskosten. Laut einer Kostenschätzung vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie und von DIW Econ könnte eine Megawattstunde grüner Wasserstoff hierzulande mit Onshore-Windkraft für 146 bis 231 Euro hergestellt werden, mit Offshore-Windkraft aufgrund der höheren Stromeinstandspreise für 178 bis 282 Euro und mit Photovoltaik wegen der niedrigeren Volllaststundenzahl für 253 bis 344 Euro. (Wuppertal Institut und DIW Econ)

Aufgrund größer werdender Produktionsanlagen und einer Reduktion der durchschnittlichen Investitionskosten, einer Verbesserung der Effizienz und verbesserter Auslastungsquoten könnten bereits 2030 die Kapazitätskosten so stark gesunken sein, dass die Stromeinstandspreise mit einem Anteil von über 85 % den mit Abstand wichtigsten Kostenfaktor ausmachen. (Gao et al. 2022)

Optionen zur Herstellung von grünem Wasserstoff werden aktuell im Entwurf des Delegated Act Red II diskutiert. Die derzeitige Ausgestaltung der Kriterien für erneuerbaren Strombezug bedürfen einer Überarbeitung, damit die Vielzahl von Erfordernissen nicht zu einem Showstopper für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft wird. (Andreas Gelfort et al. 2022)

Zur Orientierung für mögliche Einkaufspreise für grauen, blauen und grünem Wasserstoff steht der Preisindex „Hydex“ der E-Bridge Consulting GmbH zur Verfügung.

Der Hydex ist ein kostenbasierter Preisindex. Er spiegelt den durchschnittlichen Preis für Wasserstoff ab Dampfreformer (mit und ohne CO<sub>2</sub> Speicherung) oder Elektrolyseur in Deutschland wider. Der Hydex berücksichtigt die kurzfristigen Gestehungskosten von Wasserstoff (siehe Abbildung 9). Kapitalkosten sind nicht enthalten.

- Der "Hydex Green" gibt den durchschnittlichen Preis für Wasserstoff ab Standort eines Elektrolyseurs an. Es werden für die gesamte Strommenge Grünstrom-Zertifikate beschafft. Es wird unterstellt, dass gemäß EnWG und EEG-Novelle keine Netzentgelte, EEG-Umlage und Stromsteuer für den zur Elektrolyse bezogenen Strom anfallen.
- Der "Hydex Blue" gibt den durchschnittlichen Preis für Wasserstoff ab Standort eines Erdgas-Dampfreformators an, wenn das freigesetzte CO<sub>2</sub> abgeschieden und entsprechend gespeichert wird (sogenannte CCS-Carbon Capture Storage-Technologie). Für diesen Prozess sind Emissionszertifikate des ETS nur für die verbleibenden Emissionen zu beschaffen.
- Der "Hydex Grey" gibt den durchschnittlichen Preis für Wasserstoff ab Standort eines Erdgas-Dampfreformers an. Für das freiwerdende CO<sub>2</sub> müssen Emissionszertifikate im Rahmen des ETS beschafft werden.

Der Erdgas-Dampfreformer wird an das Erdgasnetz angeschlossen. Es werden durchschnittliche Netzentgelte für den Gasanschluss von Industriekunden unterstellt. Der Hydex bezieht sich auf den (unteren) Heizwert von Wasserstoff.

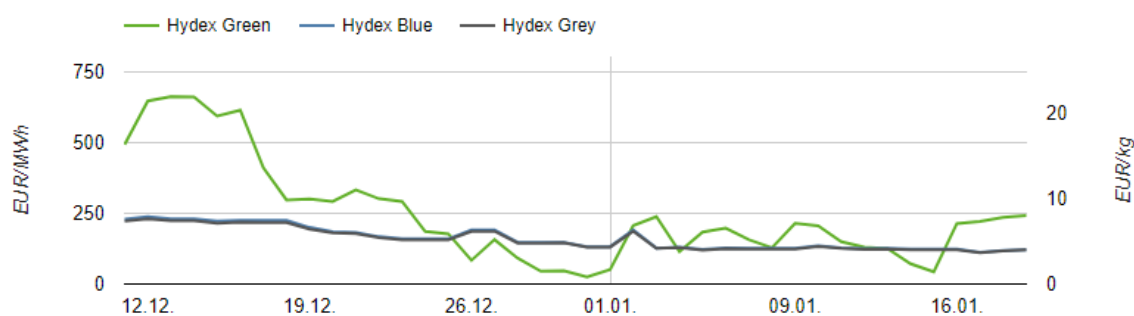


Abbildung 9: Hydex – Wasserstoff-Index letzte 30 Tage (Stand 19.01.2023)

## 1.7 Wasserstoffmarkt – Ausblick

### Wasserstoffbedarf in Deutschland und weltweit

In Deutschland wird der zukünftige Wasserstoffbedarf mit 90-110 TWh im Jahr 2030 im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020) beziffert, wobei der Verbrauch von Wasserstoff im Jahr 2020 zwischen 55-60 TWh lag. Verschiedene Studien gehen von einer Wasserstoffnachfrage im Jahr 2050 von etwa 270 TWh aus. Davon werden 31 % in Deutschland hergestellt. Der restliche Wasserstoff wird importiert. (Philipp Gerbert et al. 2018; Bründlinger et al. 2018; Now GmbH 2018b; Fraunhofer 2019) Um den steigenden Bedarf zu decken, sollen laut Koalitionsvertrag bis 2030 Erzeugungsanlagen mit einer Leistung von 10 GW für die Wasserelektrolyse errichtet werden, wobei der Fokus auf der heimischen Produktion liegen soll (SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, FDP 2021). Der bisherige Verbrauch an grauem Wasserstoff soll langfristig durch CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoff ersetzt werden.

Die europäischen Ausbauziele sehen eine zu installierende Gesamtleistung von 40 GW bis 2030 vor. Weltweit haben einige Länder ebenfalls ambitionierte Ausbauziele für die Wasserelektrolyse ausgerufen. Chile beabsichtigt, bis 2030 eine Gesamtleistung an Erzeugungsanlagen von 25 GW zu errichten (siehe Tabelle 3). In Australien wurden bereits mehrere Projekte mit Wasserelektrolyse und teilweise einer Weiterverarbeitung zu Ammoniak angekündigt, um den weltweiten Bedarf zu decken. Um die globale Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen,

müssten laut der IRENA Studie bereits 2035 weltweit 270 GW Gesamtleistung für die Wasserelektrolyse installiert werden. Bis 2050 wird laut der Studie „The Global Hydrogen Flows Perspective“ von McKinsey weltweit ein Bedarf von 660 Mio. Tonnen Wasserstoff erwartet, um Kohlenstoffneutralität zu erreichen. (McKinsey & Company 2022)

Tabelle 3: Expliziten Ausbauzielen für die Wasserelektrolyse bis 2030; (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2021)

	Land	Ausbauziel in GW
EU	Deutschland	10,00
	Frankreich	6,50
	Italien	5,00
	Spanien	4,00
	Niederlande	3,50
	Portugal	2,25
	Polen	2,00
	übrige EU-Strategie	11,75
Süd-Amerika	Chile	25,00

### Allgemeine Bedeutung des Imports von Wasserstoff

Dieser skizzierte große Bedarf an wasserstoffbasierten Energieträgern in Deutschland, aber auch insgesamt in Europa sowie Japan und Südkorea als weitere wichtige Nachfrageregionen werden nicht allein durch inländische Produktion abgedeckt werden können, bzw. sie werden nach der McKinsey-Studie nicht in der Lage sein, ihren gesamten Bedarf zu wettbewerbsfähigen Kosten zu decken. (McKinsey & Company 2022) Neben dem Aufbau einer starken inländischen Produktionslandschaft werden Importe sowohl aus Europa als auch aus dem nicht-europäischen Ausland eine wichtige Rolle spielen.

Es könnten sich unterschiedliche Handelsströme für Wasserstoff herausbilden. Denn reiner Wasserstoff ist einerseits ein „nachbarschaftliches“ Geschäft, d. h. Wasserstoff kann überwiegend im Inland oder über Pipelines aus nahe gelegenen Regionen bezogen und dann verschifft werden. Wenn diese Optionen nicht zur Verfügung stehen, könnten andererseits Wasserstoffderivate weltweit verschifft werden; die Transportkosten sind gering, und die Produktionskosten hängen in erster Linie von der Verfügbarkeit von Ressourcen wie CO<sub>2</sub> und Eisenerz ab.

Durch den globalen Handel mit Wasserstoff und Derivaten, einschließlich Wasserstoffträgern, Ammoniak, Methanol, synthetischem Kerosin und grünem Stahl (bei dessen Herstellung grüner Wasserstoff verwendet wird) können die erforderlichen Gesamtinvestitionen und Systemkosten erheblich gesenkt werden – Investitionen in den Fernverkehr und den Handel machen weniger als 20 % der Gesamtinvestitionen aus, sind aber der Schlüssel zur Erzielung erheblicher Einsparungen, einschließlich 5 Billionen Dollar an Gesamtsystemkosten in der gesamten Lieferkette. (McKinsey & Company 2022)

### Bedeutung des Imports von Wasserstoff per Schiff

Die Studie besagt weiterhin, dass für den Transport von Wasserstoff, dessen Derivate und von wichtigen Rohstoffen wie CO<sub>2</sub> erhebliche Schiffskapazitäten benötigt werden. Mit Blick auf den Import per Schiff werden bis 2050 über 1.100 zusätzliche Schiffe benötigt, um den Seehandel mit Wasserstoff und seinen Derivaten zu ermöglichen. Dies entspricht etwa 75 % der heutigen weltweiten Flotte von 1.500 Flüssiggastankern (LNG). Bestehende Ammoniak- und Methanolschiffe könnten anfangs wiederverwendet und synthetisches Kerosin und Grünstahlpellets könnten mit bestehenden Tankern und Frachtern transportiert werden. Im Laufe der Zeit müssten diese vorhandenen Schiffe aber durch neu gebaute Schiffe ersetzt werden. Um die Verschiffung von Exporten und Importen von Wasserstoff und dessen Derivaten zu ermöglichen, muss die globale Hafentonnage für Wasserstofftransporter auf mehr als 2.000 Mio. t erhöht werden. Dies entspricht etwa dem Drei- bis Vierfachen der Kapazität der Häfen von Rotterdam oder Singapur. In den großen bestehenden Häfen könnte ein Großteil der Importinfrastruktur für grünen Stahl und die meisten Derivate wiederverwendet werden, obwohl eine Kapazitätserweiterung für Methanol und Ammoniak wahrscheinlich erforderlich wäre. Für neue Versorgungsgebiete in abgelegenen Gegenden werden neue Hafenskapazitäten benötigt.

## 2 Marktanalyse der Stadt Cuxhaven und Umgebung

### 2.1 Standortanalyse

Der Landkreis Cuxhaven ist der nördlichste und flächenmäßig größte Landkreis Niedersachsens mit den natürlichen Grenzen der Nordsee, der Elbe- und der Wesermündung. Der Landkreis unterteilt sich in 29 Gemeinden, mit 7 Einheitsgemeinden und 3 Samtgemeinden (Abbildung 10). Cuxhaven als Kreisstadt des gleichnamigen Landkreises ist die drittgrößte Stadt an der niedersächsischen Nordseeküste und gehört zur Metropolregion Nordwest und Hamburg, zählt zu den großen selbstständigen Städten und liegt an der Mündung der Elbe in die Nordsee.

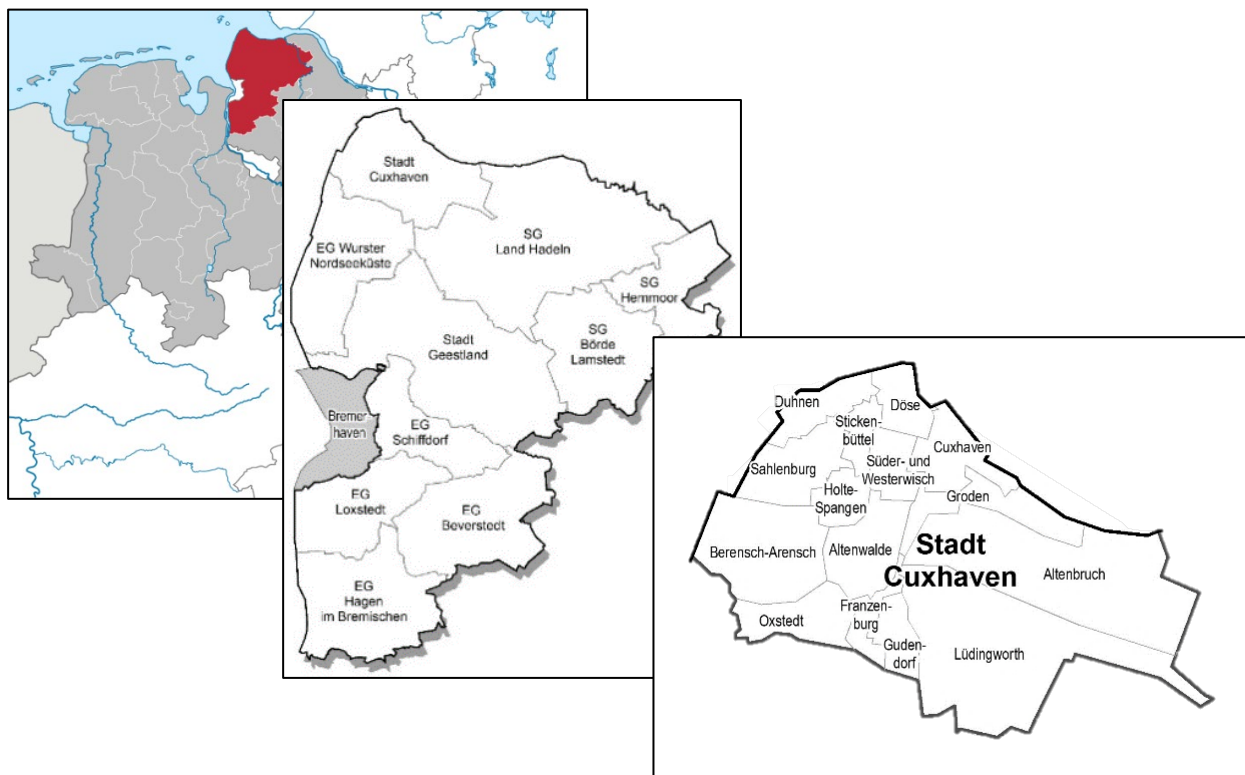


Abbildung 10: v. l. n. r. Lage des Landkreises Cuxhaven in Niedersachsen, Landkreis Cuxhaven © Landkreis Cuxhaven 2016, Gemeinde Cuxhaven © Landkreis Cuxhaven 2016

Zur Abschätzung der Potenziale der Stadt und Region Cuxhaven im Bereich Wasserstoff und zur Herausstellung von Synergien zu anderen Standorten wird nachfolgend eine Standortanalyse durchgeführt. Hierzu werden im Detail die Anbindungen zum Gas- und Stromnetz, die Wärmeversorgung sowie die land- und wasserseitige Verkehrsanbindung untersucht.

#### 2.1.1 Strominfrastruktur und Nutzung von erneuerbaren Energien

Die Region Cuxhaven ist an das 110 kV-Stromnetz (Hochspannung) des Netzbetreibers Avacon Netz GmbH angeschlossen. Als Umspannwerke in und um die Stadt Cuxhaven sind Stickenbüttler Weg, Industriestraße, Ottendorf und Spieka zu nennen (Abbildung 11). Abgebildet sind die 110 kV Hochspannungsleitungen (gelb) sowie die 380 kV Höchstspannungsleitung (lila). Die gelben Punkte repräsentieren die Umspannwerke. Auf der linken Seite ist die Region Nordostniedersachsen zwischen Weser und Elbe gezeigt. Auf der rechten Abbildung ist die Region Cuxhaven vergrößert dargestellt.

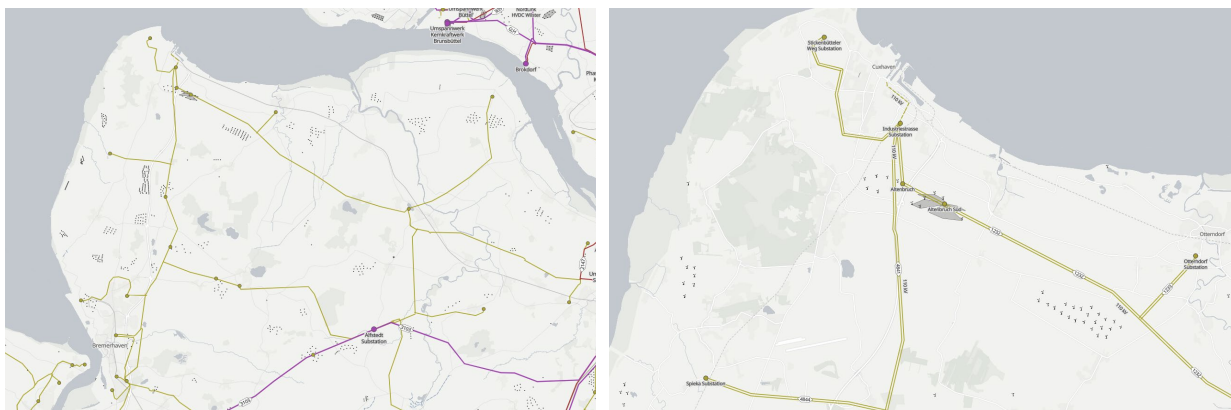


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Stromnetzes der Region (Open Infrastructure Map 2022)

Das Marktstammdatenregister ist das Register für den deutschen Strom- und Gasmarkt, in dem vor allem Stammdaten zu Strom- und Gaserzeugungsanlagen sowie Stammdaten von Marktakteuren wie Anlagenbetreibern, Netzbetreibern und Energielieferanten zu registrieren sind. Cuxhaven weist die in Tabelle 4 gelisteten installierten Anlagen auf. Die onshore installierten Windkraftanlagen mit insgesamt ~67.160 kW und die Eigenerzeugung von Solarstrom durch kleine Photovoltaikanlagen mit insgesamt ~11.773 kW spielen demzufolge aktuell eine wichtige Rolle bei der Stromerzeugung. Durch den Bau eines Holzheizkraftwerks mit 17 MW Leistung wird aktuell die Nutzung von Biomasse, die derzeit noch bei 695 kW liegt, erweitert. Andere Gase und Erdgas werden mit insgesamt 1.057 kW installierter Leistung in BHKW bzw. 894 kW installierter Leistung in Mini- und Micro-BHKW genutzt. Damit beträgt der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Cuxhaven 97,6 % (79.628 kW) und der Anteil aus fossilen Energieträgern 2,4 % (1.953 kW).

Tabelle 4: Installierte Anlagen (ohne Speicher) laut Marktstammdatenregister gerundet auf kW (Postleitzahlenbereiche: 27472, 27474, 27476, 27478; Stand 01.12.2022)

Energieträger	installierte Leistung	Anlagen	in Planung/Bau
<b>Biomasse</b>	695 kW	3	17 MW (Holzheizkraftwerk)
<b>andere Gase</b>	1.058 kW	3; davon 2=526 kW	20 kW (1 Anlage)
<b>Erdgas</b>	895 kW	49; davon 1 >50 kW	-
<b>Solare Strahlungsenergie</b>	11.773 kW	766, davon 2≈750 kW	151 kW (23 Einzelanlagen)
<b>Wind</b>	67.160 kW	25; davon 23 >2000 kW und 3 <500 kW	-
<b>Summe</b>	81.581 kW		17.171 kW

In Abbildung 12 sind die installierten Windenergieanlagen (WEA) und Solaranlagen größer 300 kW aufgezeigt. Rot umrandet sind die direkt der Stadt Cuxhaven zugehörigen Anlagen.

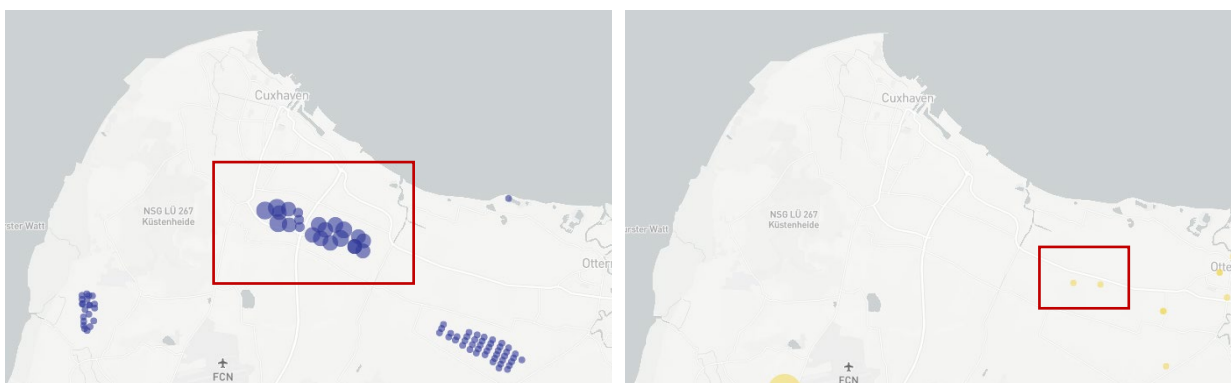


Abbildung 12: Installierte WEA (links); installierte Solaranlagen (rechts) (eigene Darstellung)

## 2.1.2 Gasinfrastruktur

### Gasinfrastruktur (landseitig)

Betreiber des lokalen Erdgasversorgungsnetzes in der Stadt Cuxhaven ist die EWE Netz GmbH. Ein Ausschnitt des lokalen Gasnetzes ist in Abbildung 13 dargestellt. Gespeist wird dieses Netz von der von Bremerhaven kommenden Ferngasleitung ETL-69, die von der Gasunie Deutschland Transport Services GmbH betrieben wird. Der Übergang von der Leitung ETL-69 zum lokalen Versorgungsnetz befindet sich auf dem Betriebshof der EWE Netz GmbH in der Humphry-Davy-Straße 41 in Cuxhaven.

Eine künftige Anbindung von Cuxhaven an das „European Hydrogen Backbone“-Netz (siehe Abschnitt 1.4 d) ist - auch nach aktuellem Stand des nationalen Gasnetzentwicklungsplans bis 2050 - nicht vorgesehen.



Abbildung 13: Ausschnitt lokales Gasversorgungsnetz (E.W.E. AG 2022)

### Gasinfrastruktur (wasserseitig)

In direkter Umgebung zu Cuxhaven liegt aktuell keine Erdgas-Pipeline. Im weiteren Einzugskreis der Deutschen Bucht sind die Europipe I/II mit Anlandung in Dornum sowie die Norpipe mit Anlandung in Emden zu nennen (siehe Abbildung 14)

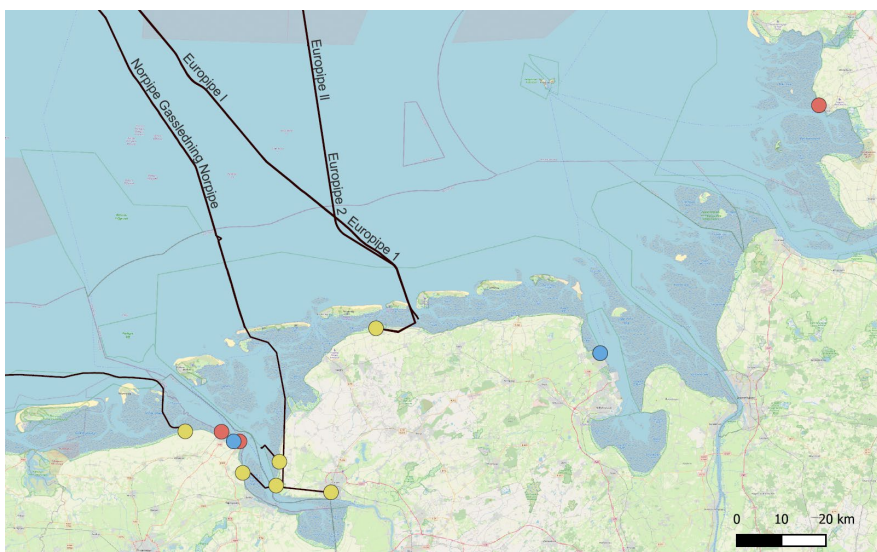


Abbildung 14: Pipelines in der Nordsee, blaue Punkte repräsentieren Anlandestelle für LNG, rote Punkte repräsentieren Anlandestelle für Strom, gelbe Punkte repräsentieren Anlandestellen für Gas (eigene Darstellung)

Bis 2035 ist der Aufbau einer reinen Wasserstoff-Pipeline namens AquaDuctus der Projektfamilie AquaVentus geplant, welche für den Wasserstofftransport von 1 Mio. t/a ans Festland dimensioniert sein soll. Laut projektseitiger Planung soll der im Entenschnabel mittels Offshore-Windenergie produzierte Wasserstoff Helgoland passieren und am nördlichen Ufer der Elbmündung anlanden (Abbildung 15). (GASCADE Gastransport: AquaDuctus 2022)

Eine Anlandung von per Schiff transportiertem Erdgas über schwimmende oder fest installierte Terminals ist für Cuxhaven aktuell nicht vorgesehen.

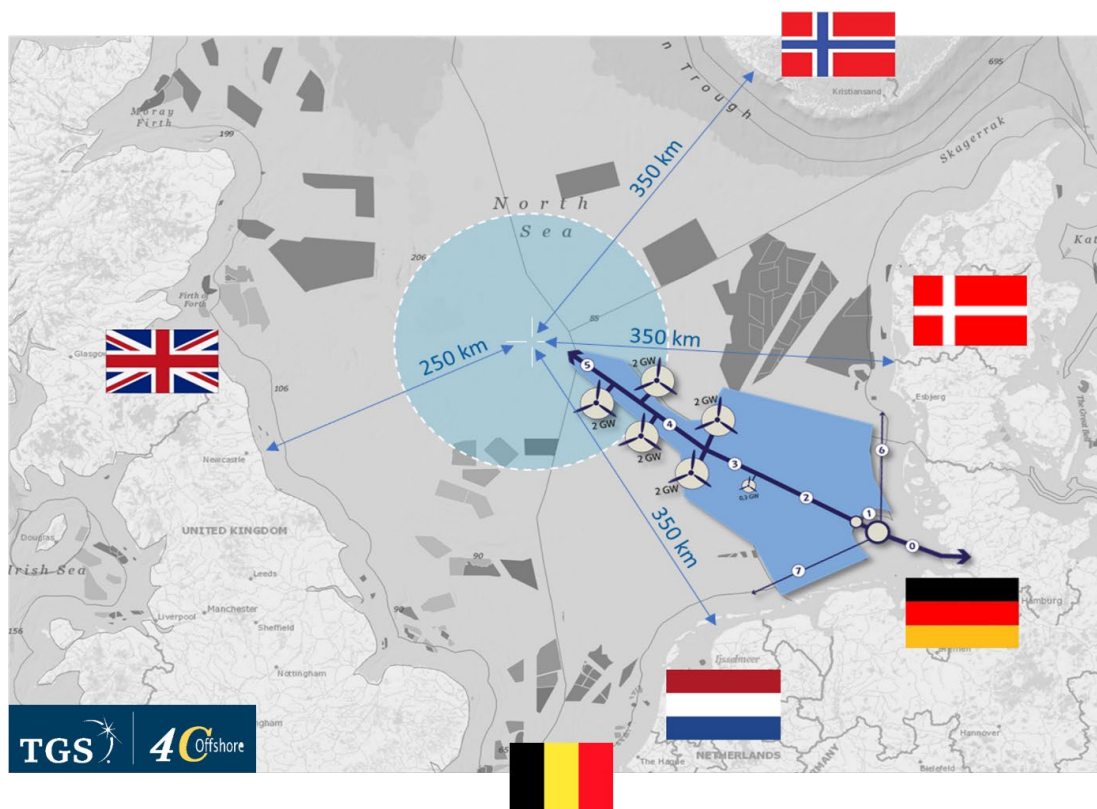


Abbildung 15: Darstellung der geplanten Wasserstoffinfrastruktur in der Nordsee (AquaVentus-Planungen in blau, schematischer Verlauf einer möglichen Pipeline in dunkelblau) ©4cOffshore

### Kavernenspeicher unter Cuxhaven

Kavernen könnten eine Möglichkeit zur großvolumigen Speicherung von gasförmigem Wasserstoff darstellen. Insbesondere bestehende Untertage-Erdgaskavernen in Deutschland könnten nach Information des Nationalen Wasserstoffrats auf die Speicherung von Wasserstoff umgerüstet werden. Erste Erdgaskavernenspeicher in Etzel (Ostfriesland) und Rüdersdorf (Brandenburg) werden bereits mit positiven Teilergebnissen für das Speichern von Wasserstoff getestet. (Teuffer 2022)

Für Cuxhaven und das Umland können mehrere unterirdisch verlaufende Salz- und Tongesteinsschichten verzeichnet werden, die in der Vergangenheit für die Speicherung von Erdgas oder als Endlager für hochradioaktive Abfälle analysiert wurden. Diese unterirdischen Gesteinsschichten sind in unterschiedlichen geohistorischen Phasen entstanden. Stellenweise haben Salzsteinschichten vertikale Deformationen in Richtung Erdoberfläche, die in diesem Bericht vereinfacht als Salzstöcke zusammengefasst werden. Vorhandene Salzstöcke und Tonschichten in der Umgebung von Cuxhaven sind in Abbildung 16 dargestellt.

Für die Nutzung dieser Schichten als Speicher von Wasserstoff werden je nach benötigtem Speichervolumen mehrere vertikale Hohlräume in die Salz- bzw. Tonsteinschicht gespült. Die Herstellung eines einzelnen Kavernenspeichers bedarf in etwa 2 bis 5 Jahre. Bei gängigen Kapazitäten von Speicherkavernen liegen Erstellungs- und Betriebskosten weit unter denen obertägiger Druckspeicher. Weitere Vorteile von

Kavernenspeichern sind ein geringer obertägiger Flächenbedarf, eine hohe Speicherdichte von bis zu über 200 bar und hohe Speicherkapazitäten. Salzsteinkavernen gelten als besonders gut für die Speicherung von Wasserstoff geeignet, da sie als technisch dicht bezeichnet werden können und somit nur äußerst geringe Verluste von ca. 0,015 % zu erwarten sind. Auf Grund dessen werden Salzsteinkavernen als besonders sichere Speichermöglichkeit für Wasserstoff eingeschätzt.

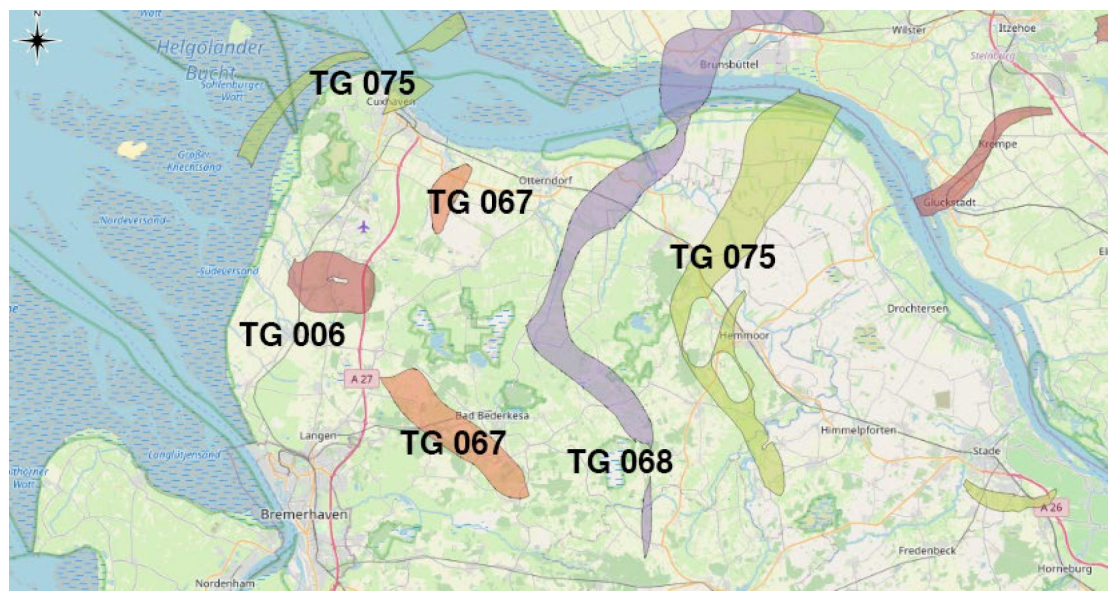


Abbildung 16: Geographische Lage der Teilgebiete der Ton- und Kristallingesteine (Saleem Chaudry 2022)

Drei Teilgebiete der Steinsalzschicht TG 075 liegen in einer Tiefe von 640 bis 1500 m unter Normalhöhennull (NHN) unterhalb der Stadt Cuxhaven, der Region und der vorgelagerten Elbmündung. Diese Anteile von TG 075 hätten das Potenzial, als lokaler Wasserstoffspeicher in Form von Speicherkavernen verwendet zu werden. Die südlich des Flughafens Sea-Airport Cuxhaven & Nordholz gelegene Tongesteinsschicht TG 006 befindet sich in einer Tiefe zwischen 400 bis 1500 m unter NHN. Einen Anschluss von Cuxhaven zu TG 006 und beiden Teilgebieten von TG 067 würde das Speichervolumen erweitern, für den Fall, dass zusätzliche Speicher benötigt werden sollten. TG 068 ist eine Steinsalzschicht, die in einer Tiefe von 730 bis 1500 m unter NHN gelagert ist. (Saleem Chaudry 2022)

Anzumerken ist, dass keine der in Abbildung 16 dargestellten Gesteinsschichten bislang als Kaverne erschlossen ist. Eine grundlegende Untersuchung für die Speicherung von Wasserstoff und die Testung verschiedener Druckstufen wären erforderlich.

### 2.1.3 Wärmeversorgung

Der Wärmebedarf im Raum Cuxhaven lag im Jahr 2017 bei 866.740 MWh und wurde zu 94,4 % aus fossilen Energieträgern wie Erdgas (69 %), Heizöl (17 %), Kohle (8 %) und Flüssiggas (0,4 %) bereitgestellt. Lediglich 5,1 % wurden durch erneuerbare Energieträger gedeckt. Die Wärmeversorgung wird mit den genannten Energieträgern von den Haushalten und den Industrie- und Gewerbetreibenden individuell am Standort umgesetzt. Ein Wärmenetz ist nicht vorhanden. (B.A.U.M Consult 2019)

Aktuell besteht ein Nahwärmenetz im Hafen, das mit Inbetriebnahme des Holzheizkraftwerkes gespeist werden wird. Dies könnte perspektivisch ausgebaut werden. Darüber hinaus soll mit Fertigstellung des Holzheizkraftwerkes ein Fernwärmenetz aufgebaut werden (Holzheizkraftwerke Cuxhaven 2023). Die Möglichkeiten der Abwärmenutzung von Industrieprozessen, z. B. von Elektrolyseuren, in Bestands- und Neubauten wurden im Rahmen eines Stakeholderdialog am 05.01.2023 mit der Genossenschaft „Wohnstätten Cuxhaven“ besprochen.



## 2.1.4 Verkehrsinfrastruktur

Die Verkehrsinfrastruktur ist ein wesentlicher Bestandteil für die Entwicklung der Stadt Cuxhaven und der umliegenden Region. In diesem Kapitel wird die bestehende infrastrukturelle Anbindung von Cuxhaven betrachtet.

### Überregionales Straßenverkehrsnetz

Cuxhaven ist überregional sowohl über die A27 an Bremerhaven und Bremen als auch über die B73 an Stade und Hamburg angebunden (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Übersichtskarte Cuxhaven (Open Street Map 2022)

### ÖPNV

Das Verkehrsgebiet Cuxhaven liegt im Mobilitätsangebot der KVG Stade GmbH & Co. KG. Dieses erstreckt sich zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Hamburg und Soltau. Stadtlinienverkehre werden in Buxtehude, Cuxhaven, Lüneburg, Stade und Winsen (Luhe) betrieben. Hinzu treten Überlandlinien-, Schul- und Berufsverkehre in den Landkreisen Cuxhaven, Harburg, Lüneburg, Rotenburg (Wümme) und Stade. Das Stadtliniennetz von Cuxhaven ist der Abbildung 18 dargestellt.

Laut Angaben des Mobilitätsdienstleistungskonzerns werden bereits seit einigen Jahren immer wieder die jüngsten Modelle der Busersteller mit verschiedensten alternativen Antriebsformen (Hybrid, Wasserstoff, Brennstoffzelle, Akkubus) an den unterschiedlichen Standorten der KVG getestet, um Informationen über Zuverlässigkeit, Reichweite und Betriebstauglichkeit zu gewinnen. Eine sukzessive Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben sei in den nächsten Jahren vorgesehen. (KVG Stade GmbH & Co KG 2021a)



Abbildung 18: Stadtliniennetz Cuxhaven (KVG Stade GmbH & Co. KG 2021b)

## Schienerverkehrsnetz

Cuxhaven ist über die eingleisige, nicht elektrifizierte Zugstrecke Nr. 1310 (DB 125) mit Bremerhaven verbunden. Auf dieser Strecke fahren nahezu ausschließlich dieselbetriebene ÖPNV-Züge der sogenannten „Nordseebahn“. In seltenen Fällen fahren Güterzüge auf der Strecke. In diesen Fällen müssen einzelne Fahrten der stündlich getakteten Nordseebahn gestrichen werden. (Academic 2022)

In Bremerhaven ist die Strecke Nr. 1310 mit der zweigleisigen, elektrifizierten Strecke Nr. 1740 (DB 125) nach Bremen angeschlossen. Es besteht somit eine direkte Schienenverbindung zwischen Cuxhaven und dem für den Güterverkehr wichtigen Rangierbahnhof Maschen. (Academic 2022)

In Richtung Hamburg ist Cuxhaven ebenfalls über die Zugstrecke Nr. 1720 (DB 101.3) angeschlossen. Diese Strecke ist nur zwischen Stade und Hamburg elektrifiziert. (Academic 2022) Eine durchgängige Elektrifizierung sowie ein zweispuriger Ausbau sind bis 2032 geplant.

Im bestehenden Schienennetz zwischen Buxtehude, Bremerhaven und Cuxhaven werden darüber hinaus 14 wasserstoffbetriebene Personenzüge seit Ende 2022 eingesetzt (siehe dazu auch Abschnitt 1.4 „Verkehrssektor“).

Innerhalb von Cuxhaven befindet sich eine weitere Zugstrecke zwischen Strecke Nr. 1720 und Steubenhöft im Amerikahafen. Diese Linie dient dem Anschluss des Amerikahafens. Sie ist mehrfach auf dem Terminalgelände aufgeteilt.

## Schiffsverkehr

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, sind aktuell folgende Linienfähren und Ausflugsschiffe, die in Cuxhaven an- und ablegen, in Betrieb:

Tabelle 5: Übersicht der Linien-Fähren und Ausflugsschiffe in Cuxhaven

Bezeichnung	Einsatzgebiet	Brennstoff
MS Flipper	Personenfähre zur Insel Neuwerk	Diesel
MS Helgoland	Personenfähre nach Helgoland	LNG, Diesel (1-5 % des gesamten Brennstoffes)
MS Flipper	Seehundsbänke, Nord-Ostseekanal	Diesel
MS Atlantis	Seehundsbänke, Hafentrundfahrten	Diesel
MS Otter	Hafentrundfahrten	Diesel
MS Störtebeker	Seehundsbänke, Hafentrundfahrten	Diesel
Jan Cux	Seehundsbänke, Hafentrundfahrten	Diesel
Jan Cux II	Seehundsbänke, Hafentrundfahrten	Diesel
Adler Cat	Personenfähre zur Insel Hörnum/Sylt	Diesel
Halunder Jet	Personenfähre nach Helgoland	Diesel

## Luftfahrt

Der Sea-Airport Cuxhaven & Nordholz weist folgende Eigenschaften auf (Flughafen-Betriebsgesellschaft Cuxhaven/ Nordholz mbH):

- zweitlängste Landebahn Niedersachsens (2.439 m)
- Allwettertauglichkeit, Nachtflugmöglichkeit
- Anschluss an die A27
- direkt am ca. 40 ha großen Gewerbe- und Industriegebiet Sea-Airpark Cuxhaven/Nordholz gelegen
- größter Marinefliegerstandort Deutschlands
- Einsatzbereiche: Frachtverkehr, Geschäftsflüge, Offshore-Dienste, Projekte der Arbeits- und Forschungsluftfahrt, Flüge nach Helgoland
- Perspektive: Aufbau einer Landbasis für die luftgestützte Versorgung der Offshore-Windparks in der Nordsee

### 2.1.5 Hafeninfrasturktur

Der Hafen von Cuxhaven (DECUX) ist einer der größten Mehrzweckhäfen Deutschlands und liegt am südlichen Ufer der Elbflusmündung. Hafenbetreiber sind die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG als größter Hafenbetreiber an der deutschen Nordsee, und die Cuxport GmbH. Weitere Betreiber sind die Blue Water BREB GmbH, die Titan Wind Energy (Europe) A/S, die EnTec Industrial Services GmbH & Co. KG und die Machulez Unternehmensgruppe.

### Deutsches Offshore-Industrie-Zentrum Cuxhaven

Wichtiger Bestandteil des Hafens ist das Deutsches Offshore-Industrie-Zentrum Cuxhaven (DOIZ). Das DOIZ dient dem Bau und dem Verschiffen aller erforderlichen Komponenten für Offshore-Windkraftanlagen. Realisiert wurde das Zentrum mit der Unterstützung des Landes Niedersachsen. Insgesamt wurden im Laufe der letzten Jahre über 600 Mio. € aus privaten und öffentlichen Geldern in den Ausbau der Infrastruktur des DOIZ investiert. Für Europa gewinnt das DOIZ mit dem fortschreitenden Ausbau immer mehr an Bedeutung. Zusätzlich zur landseitigen Infrastruktur sind diverse Kaianlagen, die speziell auf Schwertransport, Umschlag und Lagerung von Offshore-Wind-Fracht ausgelegt sind, vorhanden. Teil der Offshore Terminals sind unter anderem eine Schwerlastplattform mit einer zulässigen maximalen Flächenlast von 90 t/qm, ein Portalkran mit einer sicheren Arbeitslast (SWL) von 500 t sowie eine mehr als 5 ha große schwerlastfähige Logistikfläche mit einer zulässigen maximalen Flächenlast von 25 t/qm. Straßen in und um das DOIZ sind ebenfalls speziell auf Schwerlasttransporte ausgelegt. (DOIZ 2022)

## Terminalinfrastruktur

Der Hafen von Cuxhaven bietet spezielle Terminals für das Verladen, Löschen und Lagern von RoRo-Fracht (Roll-on Roll-off), Containern, Offshore-Wind-Projektfracht, Schwerlastfracht, Schüttgut sowie Stückgutverladungen. Ein Öl- oder Gasterminal ist bis dato nicht vorhanden oder geplant. Alle Terminalflächen sind mit Entwässerungssystemen und elektrischer Versorgung für die Terminalbeleuchtung versehen. Insgesamt bietet der Hafen aktuell sechs Liegeplatzzonen (LP 1-4, LP 8-9), während drei weitere Liegeplätze (LP 5-7) sich in Realisierung befinden. Sie sollen die Lücke zwischen den Liegeplätzen LP 4 und LP 8 schließen.

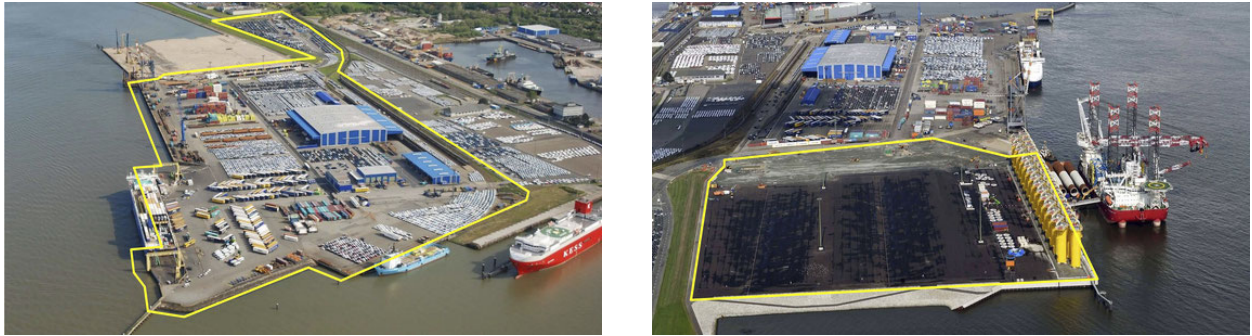


Abbildung 19: LP 1-3 – Mehrzweckterminal (links), LP4 – Offshore-/ Schwerlast-/ Mehrzweck-Terminal (rechts) (offshore-basis.de 2022b)

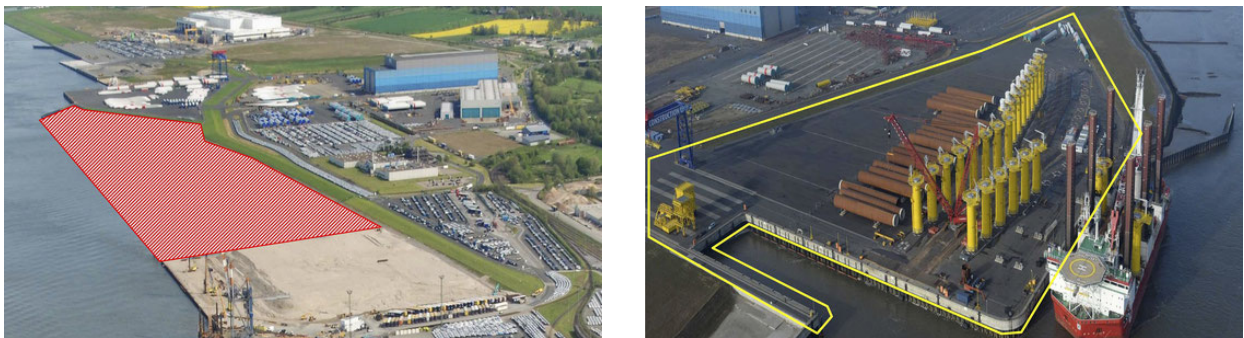


Abbildung 20: LP 5-7 (links), LP 8 – „Terminal I“ Offshore-Terminal (rechts) (offshore-basis.de 2022b)

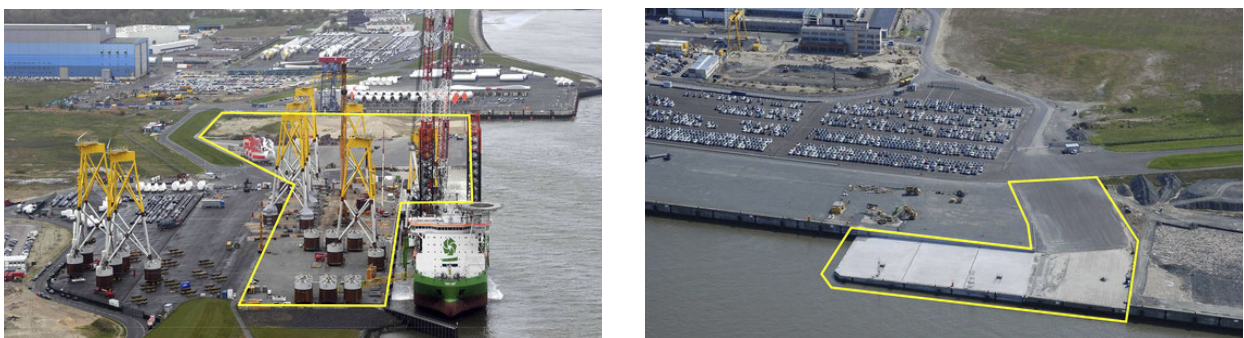


Abbildung 21: LP 9 – „Terminal II“ Offshore-Terminal (links), LP 9.3 (rechts) (offshore-basis.de 2022b)

Nach Fertigstellung des Hafenausbaus soll künftig eine durchgängige Kailänge von knapp 4 km entstehen. Für diesen Ausbau hat das Land Niedersachsen kürzlich 100 Millionen Euro zugesagt (NDR 2023).

Des Weiteren sind zusätzliche landseitige Logistik- und Industrieflächen in Planung. Fischereihafen und Marina werden in diesem Bericht nicht näher betrachtet, da sie weder die benötigte Infrastruktur noch freie Flächen für Wasserstoffanlandungen oder Terminals bieten. Bereits vorhandene und aktuell geplante Liegeplätze und Terminalflächen des Seehafens von Cuxhaven sind in den folgenden Abbildungen 19-21 sowie Abbildung 22 aufgeführt.



Abbildung 22: Übersicht Hafenterminals und Liegeplätze (Niedersachsen Ports 2019)

Liegeplatz	1-3	4	5-7	8	9
<b>Bezeichnung/Status</b>	Europakai Mehrzweck	Mehrzweck inkl. Jack-Up Schiffe	in Planung	„Terminal II“ Offshore Projekte	„Terminal II“ Offshore Projekte
<b>Kailänge</b>	1.025 m	240 m	1.257 m	376 m	734 m
<b>Max. Tiefgang</b>	15,19 m	15,4 m	14,5 m	12,7 m	12,7 m
<b>Gesamtfläche</b>	319 ha	8,5 ha	28 ha	11 ha	12 ha
<b>Einrichtungen</b>	2 RoRo-Rampen, Portalkrane, Hafenschienenkran	Schwerlastfläche, ausreichender Tiefgang für Jack-Up-Schiffe		650 t Portalkran, Schwerlastfläche, Masten	Schwerlastfläche, 1 RoRo-Rampe

### Einschränkungen in Bezug auf Schiffsdimensionen

Die aktuelle Baggertiefe der Elbe erlaubt im Allgemeinen einen tidenabhängigen Tiefgang von 12,80 – 15,10 m flussaufwärts und 12,80 – 13,80 m flussabwärts. Diese Einschränkungen hängen davon ab, ob sich ein Schiff mit oder gegen die Tidenflutwelle entlang der Elbe bewegt. Weitere Einschränkungen der Elbe sind eine maximale Gesamtlänge der Schiffe von 400 m und eine maximale Breite von 60 m. (Niedersachsen Ports 2021)

Die möglichen Schiffsdimensionen im Hafen von Cuxhaven sind begrenzt durch die Wasserstände der Elbe, die Länge und die Baggertiefe der Liegeplätze. Der durchschnittliche Tidenhub am Standort Cuxhaven beträgt 2,94 m und die nötige „Under Keel Clearance“ (UKC) beträgt 1 m. (Niedersachsen Ports 2021)

### Industriell nutzbare Flächen in Hafennähe

Einen Überblick über freie und geplante Industrieflächen bietet Abbildung 23. Die Flächen sind in drei sukzessive Entwicklungsschritte unterteilt. 95 % der im ersten und zweiten Schritt entwickelten Flächen ist bereits an Unternehmen wie Cuxhaven Steel Construction GmbH, AMBAU GmbH, Siemens Gamesa Renewable Energy AG, Nordmark GmbH und Titan Wind Energy (Europe) A/S vergeben. Noch freie Flächen dieses Schrittes sind in zwei Teilflächen unterteilt und der Abbildung 24 zu entnehmen:

- Bereich B: 1,9 ha
- Bereich D: 4,0 ha

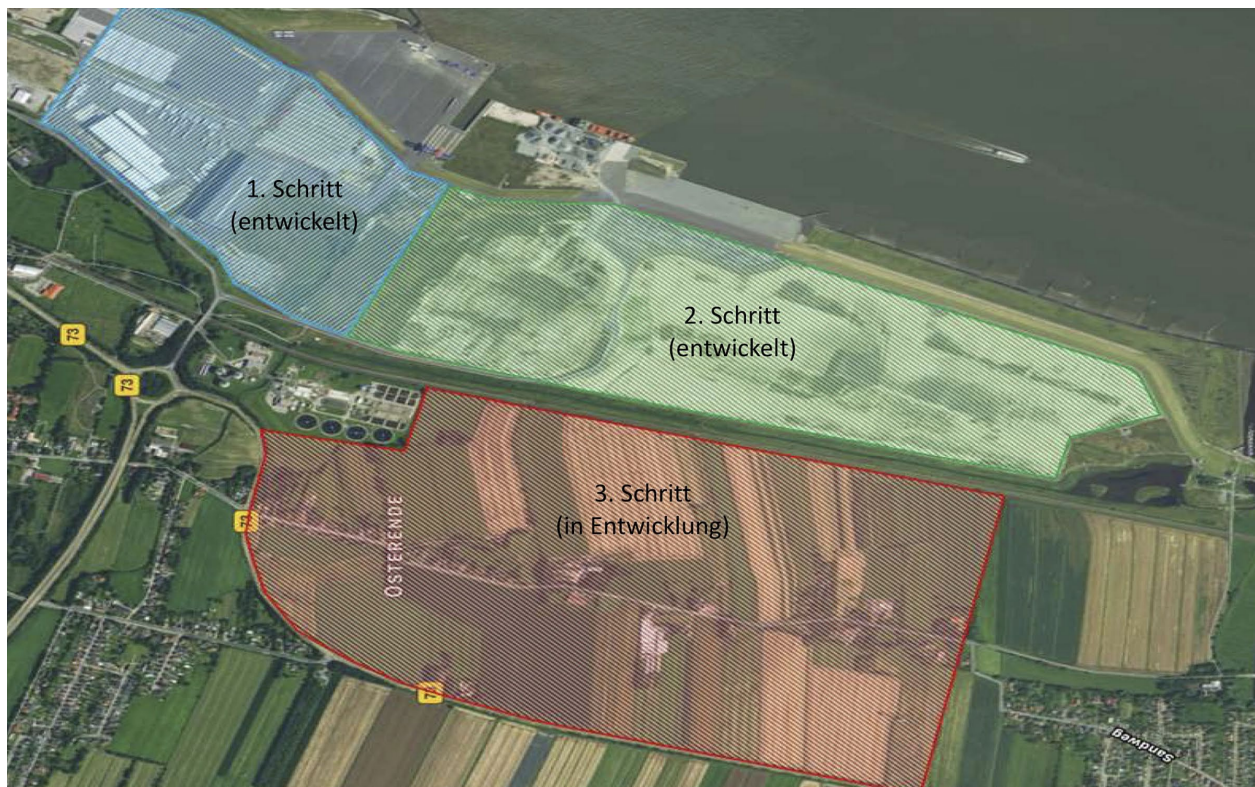


Abbildung 23: Industrielle Entwicklungsflächen in Cuxhaven (offshore-basis.de 2022a)

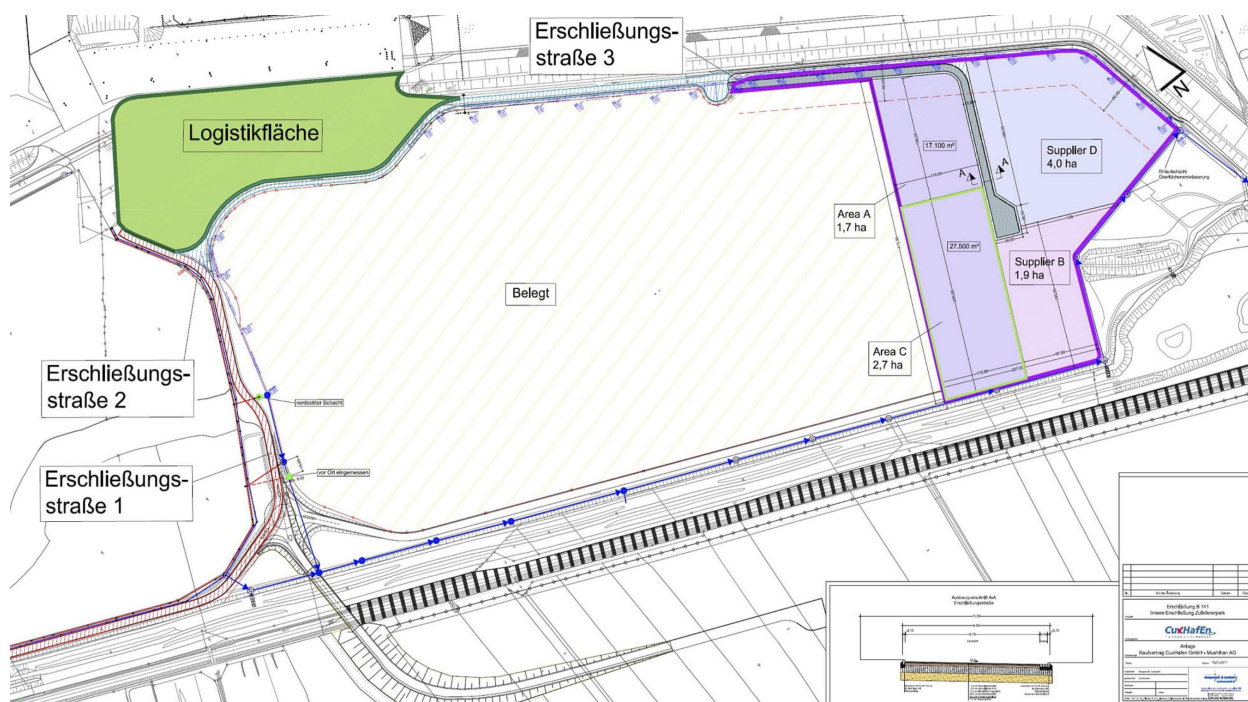


Abbildung 24: Freie Entwicklungsflächen in Cuxhaven im 2. Schritt (offshore-basis.de 2022a)

## 2.2 Wasserstoffmarktanalyse der Stadt Cuxhaven und der Region

Ausgangsbasis für die Wasserstoffmarktanalyse bildet die Darstellung aller bisherigen und aktuellen Projekte zum Thema Wasserstoff in Cuxhaven und der Region (siehe Abschnitt 2.2.1). Darauf aufbauend werden die wesentlichen Akteure identifiziert (siehe Abschnitt 2.2.2) und Planungen und bisherige Entwicklungen im Bereich Wasserstoff analysiert (siehe Abschnitt 2.2.3). Ergänzt werden diese Informationen durch Ergebnisse aus Interviews und Workshops, innerhalb derer die aktuellen Entwicklungen im Bereich Wasserstoff diskutiert, mögliche Hemmnisse herausgestellt sowie Impulse aufgenommen wurden (Abschnitt 2.2.4).

### 2.2.1 Wasserstoffprojekte

Der Status Quo der Wasserstoffprojekte wird nachfolgend im Rahmen von Steckbriefen erfasst (AquaVentus 2022; Alstom 2022; EWE 2022; Wintershall DEA 2022; ifh Göttingen 2022; IHK Lüneburg Wolfsburg 2022; KONGSTEIN 2021; Ile-Region Moorexpress-Stader Geest 2020; Deutsches Offshore-Industrie Zentrum Cuxhaven 2022).

<b>Projekt:</b>	<b>AquaVentus</b>
<b>Akteure:</b>	rund 100 Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen
<b>Ziele:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>10 Gigawatt Erzeugungleistung für grünen Wasserstoff aus Offshore-Windenergie und Produktion von 1 Million Tonnen grünen Wasserstoff mittels Elektrolyse-Technologie bis zum Jahr 2035 plus Transport an Land</li> <li>Langfristige Einbindung in ein europäisches Wasserstoffnetzwerk</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	Machbarkeitsstudien
<b>Fördermittel:</b>	IPCEI, TransHyDE
<b>Laufzeit:</b>	2020 – 2035

<b>Projekt:</b>	<b>Energieinsel</b>
<b>Akteure:</b>	SMT GmbH, Büro Elbstrom, Marc Itgen und die Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven, Jörg Singer
<b>Ziele:</b>	Machbarkeitsstudie zur Errichtung einer Energieinsel in der Elbmündung
<b>Ergebnisse:</b>	Konzept für eine Energieinsel
<b>Fördermittel:</b>	keine Angabe
<b>Laufzeit:</b>	keine Angabe

<b>Projekt:</b>	<b>Hyways for Future</b>
<b>Akteure:</b>	EWE als Konsortialführer, über 100 Akteure im Netzwerk
<b>Ziele:</b>	Aktivierung der Wasserstoff-Wertschöpfungskette im Mobilitätssektor im Nordwesten: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufbau von Elektrolysekapazitäten</li> <li>▪ Schaffung eines flächendeckenden Netzes von Wasserstofftankstellen</li> <li>▪ Investitionen in Flotten von Bussen, Sammelfahrzeugen, LKW und PKW</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	Absichtserklärungen mit rund 16 Partnern zur Anschaffung von 60 Brennstoffzellenfahrzeugen in Cuxhaven
<b>Fördermittel:</b>	gefördert mit bis zu 20 Millionen Euro über das HyLand-Programm (BMDV)
<b>Laufzeit:</b>	2020 – 2024

<b>Projekt:</b>	<b>H2Move</b>
<b>Akteure:</b>	iGas Energy, EnTec, Wintershell dea, Turneo
<b>Ziele:</b>	Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in Cuxhaven: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Errichtung eines 2 MW-Elektrolyseurs (Ausbau auf 20 MW)</li> <li>▪ Umrüstung der Mittelplate-Versorgerflotte auf Wasserstoff-Hybrid-Antrieb</li> <li>▪ Errichtung einer Tankstelle zur landseitigen Nutzung</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	Umsetzungsphase
<b>Fördermittel:</b>	gefördert im Rahmen von Hyways for Future und zur Hälfte von Bund und Land (insgesamt 14-Millionen-Euro)
<b>Laufzeit:</b>	2022 – 2024

<b>Projekt:</b>	<b>H2Skills</b>
<b>Akteure:</b>	Handelskammer Braunschweig-Lüneburg-Stade, IHK Lüneburg Wolfsburg
<b>Ziele:</b>	Identifizierung der Weiterbildungsbedarfe in der Wasserstoffwirtschaft im Rahmen von Experteninterviews und eine Online-Befragung mit allen Unternehmen in Nordostniedersachsen (Celle, Cuxhaven, Harburg, Heidekreis, Lüchow-Dannenberg, Lüneburg, Osterholz, Rotenburg (Wümme), Uelzen, Stade und Verden)
<b>Ergebnisse:</b>	erste Ansätze für Zertifikatskurse, Zusatzprüfungen, Weiterbildungsangebote und Ergänzungsmodule zu bestehenden Qualifizierungsangeboten
<b>Fördermittel:</b>	gefördert vom Europäischen Sozialfonds (ESF) im Rahmen von REACT-EU-Initiative
<b>Laufzeit:</b>	2021 – 2023

<b>Projekt:</b>	<b>Wasserstoff-Mobilität durch Bioabfall-Vergärung (WaMoBa)</b>
<b>Akteure:</b>	Abfall-Service Osterholz, FAUN, H2.N.O.N, Landkreis Cuxhaven, Landkreis Osterholz, Landkreis Verden, Stadt Cuxhaven,
<b>Ziele:</b>	ökologisch nachhaltige Bioabfallverwertung: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einsammlung von Bioabfällen durch Brennstoffzellenfahrzeuge und Biogaserzeugung</li> <li>▪ Reformierung des Biogases zu Wasserstoff und Versorgung von Sammel- und Logistikfahrzeugen durch eine H<sub>2</sub>-Tankstelle</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	Umsetzungsphase
<b>Fördermittel:</b>	Gefördert von H2.N.O.N mit Bundes- und Landesmitteln im Rahmen von ARTIE und der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“ (GRW)
<b>Laufzeit:</b>	2020 – 2023



<b>Projekt:</b>	<b>OffsH2ore</b>
<b>Akteure:</b>	PNE, Fraunhofer ISE, Kongstein, Silica, Wystrach
<b>Ziele:</b>	Konzeptstudie für die Offshore-Wasserstoffherzeugung mittels Offshore-Windenergie als Insellösung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entwurf einer 500 MW Offshore H<sub>2</sub>-Produktionsplattform</li> <li>▪ Technisches Anlagenkonzept</li> <li>▪ Techno-ökonomische Analyse</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	technisches Anlagenkonzept für eine Offshore-Wasserstoffproduktion in Verbindung mit einem schiffsbasierten Transportkonzept für Druckwasserstoff
<b>Fördermittel:</b>	Gefördert vom BMWK
<b>Laufzeit:</b>	2020 – 2022

<b>Projekt:</b>	<b>Wasserstoffzüge im Personen-Nahverkehr (Coradia iLint)</b>
<b>Akteure:</b>	Alstom, LNVG, evb, Linde
<b>Ziele:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einsatz von wasserstoffbetriebenen Zügen auf der Strecke zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde und Buxtehude</li> <li>▪ Wasserstofftankstelle zur Versorgung der Züge in Bremervörde</li> </ul>
<b>Ergebnisse:</b>	Beschaffung von 14 wasserstoffbetriebenen Regionalzügen
<b>Fördermittel:</b>	gefördert vom BMDV im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
<b>Laufzeit:</b>	2016 – 2022

### 2.2.2 Akteure

Die derzeit relevanten Akteure in Cuxhaven im Bereich Wasserstoff sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Übersicht Akteure im Bereich Wasserstoff in Cuxhaven

<b>Akteur</b>	<b>Fokus</b>
Agentur für Wirtschaftsförderung (AfW)	Investitionsförderung und Beratung
Alstom	Schienenverkehr
AquaVentus e.V.	Offshore Wasserstoff
Berufsbildende Schulen Cuxhaven	Ausbildung
CARNEADES Project Services GmbH	Energie
Cuxhavener Elektromaschinen GmbH	Elektromaschinen
Cuxhavener Kühlhaus GmbH	Dienstleistungen
Cuxport GmbH	Hafen
Deutsche Fischfang Union (DFFU)	Fischerei
Deutsche Wasserstoff Liga e.V.	Verein
DFDS Germany APS & CO. KG	Logistik
DHL lokaler Fuhrpark	Mobilität
Entec Industrial Services	Logistikdienstleistungen
Erneuerbare Energien Hamburg Cluster	Netzwerk
EWE Gasspeicher GmbH	Energie
EWE Wasser GmbH	Abwasserreinigung
Fairplay Schleppdampfschiffs-Reederei Richard Borchard GmbH	Schifffahrt
FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG	Mobilität
Fraunhofer IFAM / Maritimes Testzentrum Helgoland	Forschung
FH Elmfleth	Forschung
H2.N.O.N	Netzwerk
Hafenwirtschaftsgemeinschaft (HWG) Cuxhaven e.V.	Maritime Wirtschaft
Harren & Partner	Schifffahrt
Hochschule Bremerhaven	Forschung
IDB Stadtparkasse Cuxhaven	Wohnungswirtschaft
IHK Stade	Netzwerk
Institut für Innovative Logistik und Umwelt (ILU)	Forschung

<b>Akteur</b>	<b>Fokus</b>
Jade Hochschule, Elsfleth	Forschung
Karlson GmbH	Hafen
Kutterfisch-Zentrale GmbH	Fischwirtschaft
Michael Habben truck & trailer	Nutzfahrzeuge
Nautischer Verein Cuxhaven e.V.	Maritim
Niedersachsen Ports GmbH und Co. KG	Hafen
Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung	Politik
OLEC Oldenburger Energiecluster	Netzwerk
Offshore-Safety-Trainingscenter Cuxhaven	Ausbildung
Otto Wulf GmbH	Maritime Dienstleistungen
PNE AG	Energiewirtschaft
Sea Survival Center Cuxhaven	Ausbildung
Seefahrtschule Niedersachsen	Ausbildung
Siedlung Cuxhaven AG	Wohnungswirtschaft
Siemens Gamesa Renewable Energy	Offshore Wind
Stadt Cuxhaven	Politik
Turneo GmbH	Energiewirtschaft
Umweltmanagement AG (UMaAG)	Energiewirtschaft
Universität Bremen	Forschung
Unternehmensverband Cuxhaven Elbe-Weser-Dreieck e.V.	Netzwerk
Wintershall Dea	Energiewirtschaft
Wohnstätten Cuxhaven AG	Wohnungswirtschaft

### 2.2.3 Analyse der bisherigen Entwicklungen

In den Jahren 2019 und 2020 wurden zwei Dokumente zur Analyse des Wasserstoffeinsatzes und der Entwicklung einer Wasserstoffstrategie in Cuxhaven erarbeitet:


- Hydrogentle GmbH: Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum; Juni 2019
- Kongstein GmbH: Wasserstoff als Teil der neuen DNA der Stadt Cuxhaven – Positionierung 2020; Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie für die Stadt Cuxhaven; März 2020

Im Folgenden wird eine Analyse der getätigten Einschätzungen und Empfehlungen und der tatsächlichen Entwicklungen vorgenommen.

#### **Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum (Juni 2019)**

Zunächst wird das Konzept der Hydrogentle GmbH untersucht, welches Optionen im Bereich der Produktion, Verteilung/Speicherung und Nutzung von Wasserstoff aufzeigt (Hydrogentle GmbH 2019). Die Optionen im Bereich der Verteilung/Speicherung von Wasserstoff wurden allgemein gehalten und keine konkreten Angaben gemacht, sodass eine Analyse der Umsetzung hier nicht möglich ist. Die vorgeschlagenen Optionen im Bereich der Produktion und der Nutzung von Wasserstoff sind in Tabelle 7 gelistet und hinsichtlich deren Realisierung farblich eingestuft (rot: aktuell keine Initiative, gelb: in Bearbeitung, grün: realisiert). Detaillierte Ausführungen zur getroffenen Einstufung werden im Anschluss gegeben.

Tabelle 7: Übersicht der Optionen im „Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum“ und aktueller Stand hinsichtlich deren Realisierung

lfd. Nr.	Option	Details	Status der Umsetzung
1	H <sub>2</sub> aus On-shore-Wind	Kombination aus Wasserstofferzeugung aus Onshore-Windenergieanlagen und Strombezug über einen Direktvermarkter (kurzfristig)	
2	H <sub>2</sub> aus Off-shore-Wind	Wasserstofferzeugung aus Offshore-Wind (mittelfristig)	
3	Landstromversorgung von Schiffen	Bereitstellung des an Bord benötigten Stroms während der Hafentiegezeit durch Einsatz einer an Land befindlichen Brennstoffzelle	
4	Notstromversorgung	Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung von kritischen Einrichtungen (Kühlhäuser, Serverstationen oder Mobilfunkanlagen) durch Einsatz von Brennstoffzellen	
5	Tourismusschiffe	Umrüstung von Schiffen mit festem Routenprofil auf ein wasserstoffbasiertes Antriebssystem	
6	Industrielle Anwendungen	Einsatz von Wasserstoff bei energieintensiven Prozessen	
7	Abwärmennutzung	Abwärmennutzung der Elektrolyse für Gebäudebeheizung	
8	Kläranlage	Einsatz des reinen Sauerstoffs, der als Nebenprodukt bei der Elektrolyse entsteht, in Kläranlagen	
9	H <sub>2</sub> -Tankstelle	Einrichtung einer Wasserstofftankstelle zur Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen (PKW und LKW)	
10	Mobilität	Einsatz von wasserstoffbetriebenen <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Busflotten (ÖPNV)</li> <li>b) Spezialfahrzeugen (Stadtreinigung und technische Dienste)</li> <li>c) Staplern (Hafenlogistik)</li> </ul>	  

**Zu Nr. 1:** Im Rahmen des H2Move-Projekts wird ein 2 MW-Elektrolyseur voraussichtlich ab 2023 täglich 1.000 kg Wasserstoff produzieren. Wasser und Strom werden über das EWE-Netz bereitgestellt, sodass der Strom nicht direkt aus Onshore-Windenergie bezogen wird. Aufgrund des niedersächsischen Strommixes sowie eines lokalen Überschusses an erneuerbaren Energien in Cuxhaven kann der Elektrolyseur als bilanziell grün angesehen werden. (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz 2020) Im Hinblick auf den geplanten Ausbau der Elektrolyseur-Kapazität auf 20 MW könnte Onshore-Windenergie in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Stromversorgung spielen.

**Zu Nr. 2:** Aktuell sind keine Offshore-Windparks in relativer Nähe von Cuxhaven geplant, um mit diesen onshore oder offshore Wasserstoff zu erzeugen. 2013 erfolgte der Abbau des onshore errichteten Testfeldes für Offshore-Windkraftanlagen aufgrund der Erweiterung des Hafen- und Industriegeländes.

Als Mitglied im AquaVentus Förderverein e. V. hat sich die Agentur für Wirtschaftsförderung (AfW) positioniert, um die Interessen Cuxhavens zu fördern. In diesem Zusammenhang setzt sich die AfW dafür ein, dass Cuxhaven zum Versorgungshafen für die AquaVentus-Projekte hinsichtlich der Verladung von Offshore-Windkraftmodulen bzw. für den Betrieb und die Wartung dieser Anlagen wird. Zudem steht Cuxhaven als Anlandungspunkt für einen ersten containerbasierten Import von Wasserstoff zur Verfügung.

Die Idee zur Errichtung einer Energieinsel in der Elbmündung nahe Cuxhaven mit Onshore/Offshore-Windkraftanlagen mit gekoppelter Wasserstoffproduktion ist aktuell in der Konzeptphase (siehe 2.2.1 „Energieinsel“). Die AfW der Stadt Cuxhaven hat hierzu eine erste Projektskizze beauftragt. Darüber hinaus befindet sich eine Masterarbeit zu dem Thema in der Ausfertigung.

**Zu Nr. 3:** Vor dem Hintergrund, dass Cuxhaven der erste Hafen der fünf niedersächsischen Seehäfen der Betreibergesellschaft Niedersachsen Ports ist, der eine Landstromversorgung anbietet (Liegeplatz 9.3), könnte dieser Einsatz einer Brennstoffzelle von Interesse sein. Derzeit wird der Strom aus dem öffentlichen Stromnetz

bezogen. Mögliche Alternativen sind der Einsatz von Batterien, LNG und Wasserstoff. Wie aus Tabelle 8 hervorgeht, ist die Nutzung von Wasserstoff als mobile Landstromlösung im Vergleich zu den anderen Technologien noch im Nachteil. Gründe sind die aktuell noch hohen CAPEX- und OPEX-Kosten und die daraus resultierenden hohen Energiebereitstellungskosten. Dennoch gewinnt der Energieträger Wasserstoff an Bedeutung und eine Verbesserung des TRL und Kostensenkungen sind zu erwarten.

Tabelle 8: Übersicht mobile Landstromlösungen (Hanseatic Transport Consultancy und MKO Marine Consulting 2022)

	Direktstrom	Batterie	Wasserstoff	LNG
<b>Leistungsdaten</b>	16,7 MWh	1,7 MWh/Einheit	500 kW/Einheit für 16 Stunden	1,3 MW/Einheit für 20 Stunden
<b>TRL</b>	7-8	7-8	4-5	7-8
<b>CAPEX</b>	0,7 – 1,5 Mio. €	1,5 Mio. €	> 2,0 Mio. €	1,2 – 1,5 Mio. €
<b>OPEX</b>	niedrig	hoch	hoch	hoch
<b>Energiebereitstellungskosten</b>	gering	gering	hoch	hoch
<b>Wartungskosten</b>	gering	gering	hoch	mittel

**Zu Nr. 4:** Für die unterbrechungsfreie Versorgung bzw. Notstromversorgung von kritischen Infrastrukturen können stationäre Brennstoffzellen eingesetzt werden. Diese Technologie ist schon heute kommerziell am Markt verfügbar und wird z. B. an immer mehr Standorten zur Notstromversorgung von Digitalfunkstandorten eingesetzt. Aktuell findet auch hier analog zur Landstromversorgung von Schiffen keine Anwendung in Cuxhaven statt. Gründe hierzu sind nicht bekannt. Hohe Investitionskosten für die Umrüstung und noch nicht verfügbarerer grüner Wasserstoff sind als Ursachen denkbar. Auch hier können zukünftige Kostensenkungen und die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff die Hemmnisse reduzieren. Der Einsatz in den Krankenhäusern von Cuxhaven wäre bspw. Ebenfalls möglich.

**Zu Nr. 5, 8, 9:** Diese drei Optionen wurden im H2Move-Projekt konkretisiert. So wurde eine Elektrolyseanlage mit einer Leistung von 2 MW zur Erzeugung von grünem Wasserstoff zur Versorgung der Mittelplate-Versorgungsflotte installiert, die von Diesel- auf Wasserstoff-Hybridantrieb umgestellt werden soll. Wenngleich es sich nicht, wie bei Nr. 5 formuliert, um Tourismusschiffe handelt, soll durch diese erste praktische maritime Anwendung der Grundstein für eine Wasserstoffinfrastruktur gelegt werden, von deren Ausbau der Hafen und die gesamte Region profitieren.

Zudem soll der bei der Elektrolyse als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff in der Kläranlage der EWE genutzt werden.

Für die Zukunft ist geplant, die Elektrolysekapazität auf 20 MW zu erweitern und den Wasserstoff an Land an einer Wasserstofftankstelle anzubieten. Wasserstoff könnte dann zur Betankung von Bussen, Müllfahrzeugen, Scootern, Strandbahnen und Autos verwendet werden. Im weiteren Verlauf kann der Wasserstoff auch zur Versorgung von Krabbenkuttern und anderer Schiffe verwendet werden. (Wintershall DEA 2022; ifh Göttingen 2022)

**Zu Nr. 6:** Wie in Abschnitt 1.5 erwähnt, bietet die Umstellung der Energienutzung in größeren Industrieanlagen (z. B. in der Stahlindustrie) von CO<sub>2</sub>-intensiven hin zu emissionsfreien Prozessen unter Einsatz von grünem Wasserstoff ein großes Potenzial. Aktuell findet kein Einsatz von Wasserstoff in ansässigen Industrieunternehmen in Cuxhaven statt. Zu prüfen wäre insbesondere der Einsatz im DOIZ.

**Zu Nr. 7:** Im Gebäudebereich gibt es in Cuxhaven derzeit keine laufenden Wasserstoffprojekte. Um das zukünftige Potenzial abzuschätzen, wurde am 05.01.2023 ein Interview mit der Wohnungswirtschaft geführt. Hierbei wurde das Potenzial der Nutzung von Industrieabwärme, z. B. von Elektrolyseuren über Fern- und Nahwärmenetze in Bestands- und Neubauten besprochen. Im Stakeholderdialog mit der Wohnungswirtschaft war ein grundsätzliches Interesse zu erkennen, die Wärmeversorgung durch Wärmenetze abzudecken.

**Zu Nr. 10:** Der Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätsbereich gestaltet sich aktuell wie folgt:

- a) Aktuell sind keine konkreten Pläne für den Einsatz von Wasserstoff in Busflotten bekannt (siehe Abschnitt 2.1.4).
- b) Im Rahmen von Hyways for Future hat die Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven mit rund 18 Partnern Absichtserklärungen zur Anschaffung von 60 Brennstoffzellenfahrzeugen abgeschlossen. So werden die Technischen Dienste Cuxhaven in Zukunft ein herkömmliches Müllsammelfahrzeug durch ein Brennstoffzellenfahrzeug ersetzen. Auch die Feuerwehr plant den Umstieg auf Brennstoffzellenfahrzeuge. (EWE 2022) Der Mobilitätsbereich wird sich auch durch das Projekt WaMoBa (kommunale Abfallentsorgung) entwickeln können.
- c) Im Bereich der Hafenlogistik sind in Cuxhaven derzeit keine Projekte geplant. Terminalzugmaschinen (TRL 7), Leercontainerhandler (TRL 8) und Flurförderfahrzeuge (TRL 9) mit Brennstoffzellenantrieb sind am Markt erhältlich. Für Krane sind derzeit keine marktreifen wasserstoffbetriebenen Technologien vorhanden. In den folgenden 3-5 Jahren ist eine Marktentwicklung zu erwarten. In dem vom BMDV-geförderten Projekt Clean Port & Logistics hat die HHLA ein Cluster zur Erprobung wasserstoffbetriebener Geräte in der Hafenlogistik eingerichtet. Dabei soll das Erreichen der Marktreife und die Integration in den regulären Hafenbetrieb unterstützt und beschleunigt werden (HHLA 2022). Die Ergebnisse dieses Projekts könnten als Blaupause für den konkreten Einsatz von Wasserstoff in der Hafeninfrastruktur Cuxhavens dienen. Die Cuxport GmbH ist als anteilige Tochter der HHLA direkt in das Cluster involviert und ist daher über die Ergebnisse informiert.

### Wasserstoff als Teil der DNA der Stadt Cuxhaven – Positionierung 2020 (März 2020)

Im Dokument „Wasserstoff als Teil der DNA der Stadt Cuxhaven – Positionierung 2020“ wurden die lokalen Bedingungen von Cuxhaven untersucht und der Fokus auf maritime Anwendungen und Wasserstoffherzeugung durch Offshore-Windenergie gelegt. Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die Anregungen und den Status der Umsetzung (rot: nicht beauftragt, gelb: erste Ansätze, grün: umgesetzt).

Tabelle 9: Übersicht der Anregungen in „Wasserstoff als Teil der DNA der Stadt Cuxhaven – Positionierung 2020“ und aktueller Stand

lfd. Nr.	Anregungen	Status der Umsetzung
1	Identifizierung von zwei Leuchtturmprojekten und Anregung zur Umsetzung	
	a) Cuxhaven als Offshore H <sub>2</sub> -Landepunkt	
	b) Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel	
2	Vorschlag zur Schaffung eines Wissenszentrums "Maritimer Wasserstoff" Cuxhaven und Anregungen für bestehende Akteure	
3	Vorschlag zur Erstellung eines Masterplans	
4	Hinweis zur Einbindung von Fördermitteln (keine Nennung von konkreten Förderprogrammen)	
5	Identifikation der lokalen Unterstützung durch Politik, dem Rathaus, der Institutionen, der Unternehmen sowie der Bürger	
6	Entwicklung von Ansätzen zur Positionierung und Vermarktung von Wasserstoff, maritimen Anwendungen und Offshore-Wind in Cuxhaven	

**Zu Nr. 1a, 3, 4, 5:** Im Rahmen dieses Masterplans wird Cuxhaven als Offshore H<sub>2</sub>-Landepunkt untersucht. Darüber hinaus werden Wasserstoffprojekte und Akteure in Cuxhaven sowie spezifische Fördermöglichkeiten identifiziert und Handlungsempfehlungen entwickelt.

**Zu Nr. 1b:** Die Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel wird in der vorliegenden Studie nicht behandelt. Die Fährverbindung könnte als Blaupause für eine Machbarkeitsstudie genutzt werden.

**Zu Nr. 2:** Für die Etablierung eines Wissenszentrum wurden in Rahmen dieses Masterplan Akteure identifiziert und in einem ersten Workshop zusammengebracht (siehe Abschnitt 2.2.4).

**Zu Nr. 6:** Im Jahr 2022 entstand das DOIZ Cuxhaven auf Vorschlag des damaligen Ministers für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Der vorliegende Masterplan zeigt weitere Ansätze für die Positionierung und Vermarktung von Wasserstoff, maritimen Anwendungen und Offshore-Wind in Cuxhaven auf.

#### 2.2.4 Hemmnisse und Bedarfe für den Aufbau eines Wasserstoffmarktes

Basierend auf einem Workshop mit Akteuren der Stadt Cuxhaven und der Region, der am 17. November 2022 in Cuxhaven durchgeführt wurde, wurden die bisherigen Entwicklungen und Hemmnisse für den Aufbau eines Wasserstoffmarktes in Cuxhaven und der Region identifiziert und Bedarfe entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette inklusive Weiterbildung & Qualifikation diskutiert.

Herausforderungen und Hemmnisse lägen laut der Teilnehmenden vor allem in den folgenden Themenbereichen:

- Regulatorik:
  - bislang noch keine Zertifizierung von grünem Wasserstoff
  - bislang noch keine Definition von grünem Wasserstoff auf EU-Ebene
  - unzureichende Förderkonzepte bzw. umfassende Bürokratie insbesondere im Bereich des Mittelstands, um Förderprogramme in Anspruch nehmen zu können
- Techno-Ökonomie:
  - Marktrisiken aufgrund der Unsicherheit in der Industrie (Henne-Ei-Problem) und der ungeklärten Risikoverteilung entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette
  - Unklarheiten darüber, welche konkreten wasserstoffbasierten Energieträger sich in welchem Segment durchsetzen werden und damit verbunden Unsicherheit bei der Technologieauswahl
  - Klärung von Forschungsbedarfen und entsprechende Förderkonzepten
  - spezifisch Hafeninfrastuktur: fehlende technische Lösungen für Spezialfahrzeuge

Hinsichtlich des Aufbaus eines Wasserstoffmarktes in Cuxhaven wurden folgende Bedarfe identifiziert bzw. Vorschläge diskutiert:

#### Ideen aus der Gruppenarbeit zur Wasserstoffproduktion in Cuxhaven

Für den Aufbau einer wirtschaftlich attraktiven Produktion von Wasserstoff in Cuxhaven sahen die Akteure folgende Punkte als notwendig an:

- Pipeline-Anbindung an das Gastransportnetz/Gasfernleitungsnetz
- Erteilung eines klaren Mandats für die Wasserstoffproduktion aus Windkraft außerhalb des EEG sowie Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für die Errichtung von erneuerbaren Energieanlagen, für den Bau von Infrastrukturprojekten und für den Bau von Elektrolyseuren
- Gewährleistung einer konstanten Abnahme, z. B. über die Anschaffung von Fahrzeugen durch die öffentliche Hand (Polizei, Feuerwehr, Müllabfuhr) oder über die Industrie
- Anstieg der Anzahl Abnehmer
- Überwindung des Nadelöhrs der (großskaligen) Elektrolyseurproduktion
- Ausbau der Hafeninfrastuktur, um verstärkt Offshore-Windenergieanlagen bauen zu können
- Nutzung von Offshore-Windstrom für die Produktion von grünem Wasserstoff
- Klärung der Unsicherheit in der Schifffahrt in Bezug auf die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff („Was passiert, wenn Elektrolyseure ausfallen, kein Wasserstoff produziert werden kann und Wasserstoff für die Betankung zur Verfügung steht?“)
- Schaffung einer Infrastruktur für Forschung und Forschungspersonal

- Aufbau eines Pilotprojektes mit mehr als 70 MW-Elektrolysekapazität
- Errichtung einer Energieinsel in der Elbmündung
- Nutzung des Tourismus, um die Region Cuxhaven als wichtigen Baustein der Offshore-Wasserstoffproduktion zu vermarkten (z. B. über einen „Showcase“) und die Region so als attraktiven Arbeitsstandort zu bewerben

### **Ideen aus der Gruppenarbeit zum Wasserstoffverbrauch in Cuxhaven**

Hinsichtlich des Wasserstoffverbrauchs in Cuxhaven sahen die Akteure folgende Punkte als Voraussetzung an:

- Die Akteure plädieren für die Entwicklung eines Konzeptes für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, das sich über einen Zeitraum von 15 Jahren erstreckt. Ausgehend von Intervallen von 5 Jahren würde dies die langfristige Vision für die Stadt stärken.
- Zusätzlich müssen die Wasserstoffpreise gesenkt und Finanzierungsinstrumente eingesetzt werden, um Attraktivität zu gewährleisten. Im Bereich der Mobilität soll die öffentliche Hand den Markt durch die Anschaffung von Fahrzeugen erschließen.
- Beim Import sei Wasserstoff zu priorisieren und der Transport per Pipeline versus Schiff näher zu analysieren. Für Pipelines müssen Flächen gesichert und die Akzeptanz bei den Bürgern gefördert werden.
- Darüber hinaus muss ein sicheres Investitionsumfeld geschaffen werden, um potenzielle Interessenten zu ermutigen.
- Die Arbeitsgruppe hält Cuxhaven aufgrund des Tiefgangs des Hafens für einen guten Standort für eine Bunkerstation für Schiffe z. B. auf dem Weg in die Ostsee und von und nach Hamburg (im Jahr mehr als 60.000 Schiffsbewegungen). (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2023)
- Zudem sehen die Akteure die Notwendigkeit eines Anschlusses an das Wasserstoff-Ferngasnetz.

### **Ideen aus der Gruppenarbeit zur Weiterbildung & Qualifikation in Cuxhaven**

Nach Produktion und Verbrauch wurde die Bildungslandschaft in Cuxhaven thematisiert und analysiert. Abschließend wurden Fragen zur Bildungslandschaft in Cuxhaven gestellt. Die Akteure sehen eine bunte Bildungslandschaft in Cuxhaven, die gute Voraussetzungen für die erfolgreiche Ausbildung von Fachkräften bietet. Ein Vorschlag der Teilnehmenden war, den Tourismus zur Vermarktung von Cuxhaven zu nutzen, um die generelle Attraktivität als Arbeitsstandort zu fördern. Zudem wünschen sich die Teilnehmenden die Realisierung eines ersten Pilotprojekts, mit dem eine Schnittstelle zwischen Industrie und Forschung geschaffen wird.

In Ergänzung wurde dazu ein erster Workshop zur Analyse von Cuxhaven als wissensbasierter Standort für maritime Wasserstoffanwendungen sowie zur Erarbeitung von Maßnahmen zur Einrichtung eines Wissenszentrums mit interessierten Stakeholdern durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu werden in einem separaten Bericht von dritter Seite veröffentlicht.

## **2.3 Förderprogramme für Wasserstoffprojekte**

Im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie sowie des Europäischen Green Deals stehen eine Vielzahl von Förderprogrammen deutschland- und europaweit zur Verfügung. So weist das BMWi beispielsweise ein Fördervolumen von bis zu 1,4 Mrd. EUR aus (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020). Die EU fördert über die „Important Projects of Common European Interest“ (IPCEI) Wasserstoffprojekte. Dies sind transnationale, wichtige Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse. Hier sollen insgesamt 8 Mrd. EUR in unterschiedliche Projekte investiert werden. Im Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung wird der Ausbau der Elektrolysekapazität auf rund 10 GW im Jahr 2030 festgeschrieben. (Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) Auch sollen in der EU zukünftig OPEX-Kosten förderfähig werden. (Europäische Kommission 21.10.2021)

Über die existierende Förderprogramme hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Förderprogramme für den Markthochlauf von Wasserstoff. Dies gilt allgemein für alle Sektoren. Nachfolgend in Tabelle 10 sind beispielhaft Fördersuchmaschinen erfasst.

Tabelle 10: Ausgewählte Fördermittelsuchmaschinen

<b>Fördermittelsuchmaschine</b>	<b>Link</b>
Förderdatenbank (Bund, Länder & EU)	<a href="https://www.foerderdatenbank.de/SiteGlobals/FDB/Forms/Suche/Expertensuche_Fomular.html?submit=Suchen&amp;filterCategories=FundingProgram">https://www.foerderdatenbank.de/SiteGlobals/FDB/Forms/Suche/Expertensuche_Fomular.html?submit=Suchen&amp;filterCategories=FundingProgram</a>
Förderinitiativsuche PTJ	<a href="https://www.ptj.de/suche-foerderinitiativen">https://www.ptj.de/suche-foerderinitiativen</a>
Funding & Tender opportunities (EU)	<a href="https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home">https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home</a>
TRIMIS Search Hub (EU)	<a href="https://trimis.ec.europa.eu/search?facets_query=&amp;filter=&amp;sort_by=search_api_relevance&amp;sort_order=DESC&amp;f%5B0%5D=type%3Aprogramme">https://trimis.ec.europa.eu/search?facets_query=&amp;filter=&amp;sort_by=search_api_relevance&amp;sort_order=DESC&amp;f%5B0%5D=type%3Aprogramme</a>
Tender24	<a href="https://www.tender24.de/NetServer/PublicationSearchControllerServlet?function=SearchPublications&amp;Gesetzesgrundlage=All&amp;Category=InvitationToTender&amp;thContext=publications">https://www.tender24.de/NetServer/PublicationSearchControllerServlet?function=SearchPublications&amp;Gesetzesgrundlage=All&amp;Category=InvitationToTender&amp;thContext=publications</a>

Tabelle 12 im Anhang listet darüber hinaus regionale, bundesweite sowie europaweite Förderprogramme, die unmittelbar in Anspruch genommen werden können. Im maritimen Bereich könnte z. B. die Nachhaltige Modernisierung von Küstenschiffen für Cuxhaven relevant sein. Das BMDV hat Anfang Dezember die vierte Förderbekanntmachung veröffentlicht mit einer Frist zur Antragseinreichung bis zum 28.02.2023. Auch das BMWK fördert den Bau von Betankungsschiffen für LNG und nachhaltige erneuerbare Kraftstoffalternativen in der Schifffahrt.



## 3 Handlungsempfehlungen für die Stadt Cuxhaven

### 3.1 SWOT-Analyse der Stadt Cuxhaven und der Region

Als Vorbereitung für die Handlungsempfehlungen wird eine Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (engl.: SWOT-Analyse) für die Stadt Cuxhaven basierend auf der Marktanalyse der Stadt Cuxhaven und Umgebung (Kapitel 2) durchgeführt.

#### Stärken

- ca. 97 % (ca. 80 MW) großer Anteil an installierter Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit Erweiterung auf ca. 98 % (ca. 97 MW) durch Inbetriebnahme eines neuen Holzheizkraftwerks
- natürliche Vorkommen von Salz- und Tongesteinsschichten in der Region Cuxhaven
- gute Verkehrsanbindung mittels A27 an Bremerhaven und Bremen als auch über die B73 an Stade und Hamburg
- ausgeprägter regionaler und überregionaler ÖPNV und Anbindung ans Schienenverkehrsnetz
- strategisch günstig gelegener Tiefwasserhafen mit ausgebauter Hafeninfrastuktur für Roll-on Roll-off-Fracht, Container, Offshore-Wind-Projektfracht, Schwerlastfracht, Schüttgut sowie Stückgutverladungen
- Deutsches Offshore-Industrie Zentrum (DOIZ) mit dem Bau und dem Verschiffen aller erforderlicher Komponenten für Offshore-Windkraftanlagen
- hafennahes, entwickeltes Industrieareal mit einer Freifläche von 5,9 ha und weiteren, mittelfristig zu erschließenden Flächen
- Umrüstung der Mittelplate-Versorgerflotte auf Wasserstoff-Hybrid-Antrieb und Errichtung einer landseitigen Wasserstofftankstelle für die Nutzung im Schwerlastverkehr im Rahmen des H2Move-Projektes mit Erweiterungsoption
- Stärkung der Wasserstoffwertschöpfungskette im Mobilitätssektor im Nordwesten durch Hyways for Future (BMDV-Förderung)
- bestehende Kooperation von wichtigen lokalen Bildungseinrichtungen, wie der Fachhochschule Elsfleth, dem Fraunhofer IFAM sowie der BBS Cuxhaven, um Fachkräftemangel vorzubeugen
- viele interessierte und teilweise bereits aktive Akteure im Bereich Wasserstoff

#### Schwächen

- keine Anbindung an das Höchstspannungsnetz (aktueller Anschluss nur 110 kV)
- keine Anlandung eines Offshore-Stromkabels, um größere Mengen Windstrom landseitig in Wasserstoff und Folgeprodukte umzuwandeln
- keine Anbindung von Cuxhaven ans Wasserstoffnetz des „European Backbones“ vor 2050 laut Netzentwicklungsplan der Ferngasnetzbetreiber
- keine Anlandung von per Schiff transportiertem Erdgas über schwimmende oder fest installierte Terminals vorgesehen, die später auf Wasserstoff umgerüstet werden könnten
- aktuell nur ein kleines Nahwärmenetz im Hafen in Cuxhaven vorhanden (bspw. zur späteren Nutzung von Abwärme aus Elektrolyseuren)

## **Chancen**

- Nutzung der natürlichen Gesteinsschichten zum Bau von Kavernenspeichern für eine großvolumige Wasserstoffspeicherung
- Umstellung des ÖPNV und weiterer Zugverbindungen auf Wasserstoffbetrieb
- Ansiedlung von Firmen aus der (Offshore-)Wasserstoffwertschöpfungskette auf der freien Industriefläche sowie Firmen zur Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu Folgeprodukten
- bestehende Wasserstoffprojekte motivieren weitere Marktteilnehmer zur Umstellung ihrer Logistik oder Produktion auf Wasserstoff
- mittelfristige Wasserstofferzeugung durch Offshore-Wind in der (deutschen) Nordsee und Anlandung in Cuxhaven
- Schiffsimporte von grünem Wasserstoff
- Etablierung einer Bunkerstation für grüne Schiffstreibstoffe und somit eines grünen Schiffsverkehrs (Cuxhaven als „grüner Korridor“)
- Weiterveredelung des Wasserstoffes in andere wasserstoffbasierte Energieträger, wie Ammoniak oder Methanol

## **Risiken**

- keine Anlandung von Wasserstoff durch Pipeline bzw. Importe
- Hochseeschifffahrt favorisiert einen anderen Hafen zum Bunkern von wasserstoffbasierten Energieträgern

### 3.2 Handlungsempfehlungen für die Stadt Cuxhaven und die Region

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der SWOT-Analyse werden nun fünf Handlungsempfehlungen für die Stadt Cuxhaven und die Region aufgezeigt und erste Maßnahmen formuliert.

#### 1. Empfehlung: Politische Rückendeckung in der Region sicherstellen

##### Erläuterung:

Für die Entwicklung von regionalen Netzwerken und eines regionalen nachhaltigen Zukunftskonzepts von Wirtschaft und Gesellschaft sowie dessen Umsetzung ist die Unterstützung der Politik vor Ort ein wichtiges Erfolgskriterium. Die damit verbundenen Aufgaben und Projekte lassen sich einfacher und effizienter durchführen und umsetzen, wenn die Politik die gleichen Ziele verfolgt und „mit im Boot“ sitzt.

Die „Politik vor Ort“ umfasst in diesem Sinne dabei:

- auf kommunaler Ebene/Kreisebene: Stadtrat/Stadtverordnete/Gemeinderatsmitglieder, Landrat, Kreistagsmitglieder, Bürgermeister
- verschiedene Ausschüsse: Stadtplanung, Wirtschaft, Tourismus, Verkehr, Umwelt etc.
- Verwaltungsleitungen der beteiligten Ressorts und Ämter

##### Grundlage für die Empfehlung:

Am 01. Januar 2023 trat das novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz in Kraft. Die Ziele sehen eine Begrenzung der Klimaerwärmung von 1,5 °C, einen Anteil von mindesten 80 % erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2030 und eine Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern vor. Um dies zu erreichen, wird den erneuerbaren Energien gesetzlich eine überragende Bedeutung eingeräumt und die Ausbaupfade für Wind- und Solarenergie werden deutlich erhöht. Insbesondere die Offshore-Windenergie soll bis 2030 auf 30 GW und bis 2045 auf mindestens 70 GW ausgebaut werden. Weiterhin fördert der Bund innovative Konzepte zur Kombination von regenerativer Energieerzeugung und lokaler wasserstoffbasierter Stromspeicherung. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere der Zubau von Offshore-Windenergie und lokaler Wasserstoffherzeugung eine große Chance für Cuxhaven, da sich hier die Stärken der Region mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien und dem Tiefwasserhafen sowie dem DOIZ mit dem Umschlag von Offshore-Wind-Projektfracht entfalten. Auch die niedersächsische Landesregierung bekennt sich zur „Norddeutschen Wasserstoffstrategie“ und stellt zusammen mit dem Bund derzeit 2,3 Milliarden Euro für Wasserstoffprojekte zur Verfügung. Die Weichen für eine zukünftige grüne Wasserstoffwirtschaft sind damit gestellt.

##### Erste Maßnahmen:

- Etablierung eines gemeinsamen Zielbildes mit lokalen Stakeholdern und der Politik
- Bereitstellung von personellen Ressourcen, z. B. in Form eines Standortmanagers für Wasserstoffprojekte und Stakeholdermanagement
- Prüfung der Möglichkeit von politischen Anreizoptionen für Unternehmen in der Region

## 2. Empfehlung: DOIZ und Hafen als Grundbaustein weiter festigen und ausbauen

### Erläuterung:

Das DOIZ gilt als wichtiger Bestandteil des Hafens von Cuxhaven und der Wertschöpfung vor Ort. Die Stärkung des Standortes und der Ausbau der Infrastruktur ist Grundbaustein für die Ansiedlung von weiteren Firmen.

### Grundlage für die Empfehlung:

Zur Etablierung einer (grünen) Wasserstoffwertschöpfungskette gehören nicht nur die Produktion, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff, sondern auch die Komponentenfertigung in sämtlichen die Wasserstoffwertschöpfungskette übergreifenden Bereichen. Dies beginnt bereits bei der Fertigung von Bauteilen für die Erzeugung von grünem Strom, um damit später Wasserstoff erzeugen zu können. Die Stromerzeugung mittels Offshore-Windkraftanlagen weist dabei ein enormes Potenzial auf. Industriezentren, die sich auf die Fertigung, den Umschlag sowie den Betrieb und Wartung solcher Anlagen spezialisiert haben, können daher profitieren. Dies gilt insbesondere für Standorte, die einen direkten Zugang zum Meer aufweisen, sodass weite Transportwege über Land vermieden werden können.

Der Hafen von Cuxhaven und das damit verbundene DOIZ bieten hier mit der bereits bestehenden Infrastruktur und Unternehmensansiedlung im Bereich der Offshore-Industrie eine optimale Ausgangsbasis: Als einer der größten Mehrzweckhäfen Deutschlands am südlichen Ufer der Elbflusmündung verfügt dieser über eine strategisch günstige Lage für den Im- und Export der benötigten Komponenten. Der Tiefwasserhafen verfügt über infrastrukturelle Vorteile eines trimodalen Mehrzweckterminals unter anderem für Container und RoRo Umschlag mit Anschluss an den Schienen- und Straßenverkehr. Weitere Terminals sind für Schüttgut und Stückgut sowie für den Umschlag und die Lagerung von Offshore-Wind-Projektfracht und Schwerlastfracht vorhanden. Cuxhaven verfügt somit über eine gut ausgebaute Hafeninfrastuktur mit Liegeplätzen für Schiffe mit ausgeprägtem Tiefgang. Die angekündigte Unterstützung der niedersächsischen Landesregierung über 100 Millionen Euro zum Hafenausbau verdeutlicht die Wichtigkeit des Standortes. Die Erweiterung der Fläche bietet ansässigen Unternehmen Planungssicherheit für zukünftige Projekte und ist ein positives Signal für (industrielle) Neuansiedlungen. Durch die Ansiedlung weiterer Unternehmen in diesem Bereich, können Synergien gehoben (bspw. kurze Produktionswege) und gemeinsame Ressourcen aufgebaut werden (z. B. gemeinsame Logistikinfrastruktur). Eine Erweiterung der Unternehmensvielfalt hinsichtlich Hersteller von Elektrolyseuren zur Kopplung mit Offshore-Windkraftanlagen für die Produktion von grünem Wasserstoff offshore ist z. B. denkbar.

Weiterhin kann sich das DOIZ neben der Fertigung von Komponenten für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft als zukünftiger Wasserstoffabnehmer im Bereich der Logistik etablieren, um auch die Fertigung bzw. Logistik klimaneutral zu gestalten. Weitere industrielle Wasserstoff-Abnehmer könnten sich im östlichen hafennahen Teil von Cuxhaven ansiedeln mit einem aktuell ca. 5,9 ha freien Bauareal sowie zukünftig weiteren 60 ha.

### Erste Maßnahmen:

- Ausbau der Infrastruktur vor Ort – Erschließung und Anbindung der Grundstücke
- Kontaktaufnahme zu Unternehmen vor Ort, um weitere Bedarfe herauszuarbeiten:
  - Abfrage der Planungen zur evtl. Erweiterung der Fertigungsanlagen, Angebot von Einzelworkshop
  - Herausarbeiten von Anforderungen an die Infrastruktur (Wunschliste)
- Etablierung eines Runden Tisches zwischen Stromerzeugern, Netzbetreibern und Großabnehmern bzw. perspektivischen Wasserstoffproduzenten
- Fortsetzung aktiver Werbemaßnahmen und Ansprache von weiteren Zuliefererfirmen im Offshore-Bereich
- Prüfung und Schaffung von politischen Anreizen
- Stärkung der Fachkräfteausbildung vor Ort und Etablierung eines Wissenszentrums gemeinsam mit der Berufsbildenden Schule Cuxhaven, der Fachhochschule Eilsfleth, dem Fraunhofer IFAM sowie der IHK

### 3. Empfehlung: Mit der Mobilität die regionale Wasserstoffwirtschaft in Cuxhaven vorantreiben

#### Erläuterung:

Entscheidend für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Cuxhaven ist neben dem Angebot von Wasserstoff vor Ort auch die Sicherstellung der Abnahme. Insbesondere der öffentliche Verkehrs- bzw. Mobilitätssektor kann hier eine erste Planungssicherheit schaffen und gleichzeitig einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen liefern. Dazu zählen die Umstellung des ÖPNV auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, der Einsatz weiterer Wasserstoffzüge auf nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten, sowie die Versorgung erster Fährschiffe mit Druckwasserstoff, um auch wasserseitig die Dekarbonisierung voranzutreiben. Zur landseitigen Versorgung des DOIZ mit Materialien, Teilen und Modulen für die Produktion könnte eine erste Umstellung der Logistik auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und eine CO<sub>2</sub>-neutrale Logistik erfolgen.

#### Grundlage für die Empfehlung:

Cuxhaven weist viele Stärken auf, die für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft von zentraler Bedeutung sind. Die Region hat mit derzeit 67 MW installierter Wind- und 11 MW installierter PV-Leistung eine gute Grundlage, um aus überschüssigem erneuerbaren Strom Wasserstoff zu produzieren. Für einen ersten Markthochlauf sorgt der Bau eines 2 MW-Elektrolyseurs mit angeschlossener Tankstelle für den Schwerlastverkehr. Durch den Bau der Wasserstoffinfrastruktur besteht der Anreiz, weitere Teile des Mobilitätssektors umzustellen. Bei guter Marktlage ist mittelfristig eine Skalierung auf 20 MW-Wasserstofferzeugungsleistung angedacht. Gleichzeitig wird mit der Umrüstung der Mittelplate-Versorgerflotte auf Wasserstoff-Hybrid-Antrieb ein weiteres Pilotprojekt im maritimen Sektor geschaffen, das als Vorbild weitere Marktteilnehmer zur Umrüstung ihrer Schiffsflotte motivieren könnte.

Im Bereich der Logistik könnte sich z. B. Niedersachsen Ports als industrieller Abnehmer im Rahmen der Nutzung von wasserstoffbetriebenen Hafenequipment, wie z. B. Hafenmobilkranen, Portalkranen, Stapelkrane, Reachstacker, Stapler oder Portalhubwagen, etablieren. Zum aktuellen Zeitpunkt sind diese Technologien allerdings nicht verfügbar, werden aber im HHLA Netzwerk Clean Port & Logistics evaluiert.

#### Erste Maßnahme:

- Durchführung einer Wasserstoffbedarfsanalyse bzw. -prognose im Bereich der Mobilität gemeinsam mit den einzelnen Stakeholdern (landseitig und maritim)
  - Status quo-Analyse: Analyse der jeweiligen Flottengröße sowie Fahrtstrecken, um daraus in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Flotte (Fahrzeug-/Schiffstypen) und der Strecke die Verbräuche und Laufleistung zu berechnen
  - Fahrzeug/Schiffslebens- und -austauschzyklen: Festlegung mit Stakeholdern, ab wann und welcher Anteil neu anzuschaffender Fahrzeuge/Schiffe durch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge/Schiffe erfolgen soll, Prüfung von Umrüstungsmöglichkeiten im Schiffsverkehr
  - Wasserstoffbedarfs-/Mengenrüst: Berechnung des Mengengerüsts in Abhängigkeit des Hochlaufs der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge/Schiffe
- Ausbau der Wasserstofferzeugungsleistung mit Erweiterung der Tankstelleninfrastruktur und Umstellung der Flotten/Einführung von wasserstoffbetriebenen Schiffen/Fährverbindungen

#### **4. Empfehlung: Ansiedlung von wasserstoff-weiterverarbeitender Industrie und Bereitstellung von wasserstoffbasierten Syntheseprodukten – insbesondere als maritimer Kraftstoff**

##### **Erläuterung:**

Um lokal produzierten oder meeresseitig angelandeten Wasserstoff (im großen Maßstab) im Bereich der Schifffahrt nutzen zu können, bedarf es einer wasserstoff-weiterverarbeitenden Industrie zur Bereitstellung von wasserstoffbasierten Treibstoffen, wie Ammoniak oder Methanol. Diese könnten aufgrund der höheren Energiedichte in der hochseetauglichen Schifffahrt zum Einsatz kommen.

##### **Grundlage für die Empfehlung:**

Die Synthetisierung von Ammoniak und Methanol bietet die Möglichkeit, Wasserstoff weiter zu verarbeiten und die Anwendungsoptionen zu vergrößern. Insbesondere für Schiffsantriebe könnten Kraftstoffe in Form von Ammoniak und Methanol zur Verfügung gestellt werden. Auch der maritime Weitertransport als Frachtgut ist denkbar.

Der Standort Cuxhaven verfügt wasserseitig über den Vorteil der Nähe zur Deutschen Bucht, der Schifffahrtslinien des Nord-Ostseekanals (NOK) und des Elbfahrwassers. Das bedeutet: Alle Schiffe, die von oder in Richtung NOK oder Hamburg manövrieren, passieren Cuxhaven. Die günstige Lage des Hafens weist Vorteile im Hinblick auf kurze Revierfahrten für eine Wasserstoff-, Methanol- oder Ammoniakaufnahme von Schiffen an einer Bunkerstation auf. Durch den ausgeprägten Tiefgang ist eine Nutzung des Hafens zur Betankung jeglicher Schiffsklasse möglich.

Das freie Bauland direkt in Hafennähe und der hohe Anteil an erneuerbaren Energien könnte für den zeitlich vorgelagerten Aufbau einer Vor-Ort-Wasserstoffproduktion genutzt werden, verbunden mit der Möglichkeit, die Synthese, Speicherung und Betankung ebenfalls dort vornehmen zu können. Bei einer späteren wasserseitigen Anlandung von Wasserstoff per Schiff oder Pipeline könnten die vorhandenen Synthesekapazitäten weiter ausgebaut werden.

Weiterhin könnte die Abwärme, die bei der Wasserstoffproduktion entsteht, für eine Nahwärmeversorgung von Quartieren genutzt werden. Inwieweit man die Abwärme der nachgelagerten exothermen Ammoniaksynthese nutzen kann, sollte überprüft werden. Aktuell gibt es in Cuxhaven nur ein kleines Nahwärmenetz im Hafen. Das im Aufbau befindliche Holzheizkraftwerk könnte hier den ersten Grundstein für eine Erweiterung des Nahwärmenetzes legen.

##### **Erste Maßnahmen:**

- Identifikation und -analyse der Akteure im Bereich Methanol/Ammoniak (sowohl Hersteller als auch Abnehmer)
- Kontaktaufnahme zu Akteuren und Diskussion der Vision einer Wasserstoff ver- und weiterverarbeitenden Industrie in Cuxhaven
- Herausstellung erster Bedarfe der Akteure
- Genehmigungsrechtliche Untersuchung der Freiflächen hinsichtlich des Aufbaus einer Ammoniak- bzw. Methanolproduktion

Hinweis: Der Ausbau dieser Industrie ist eng mit Empfehlung Nr. 5 verknüpft.

## 5. Empfehlung: Aufbau großer Speicher für Wasserstoff bzw. Bau einer Bunkerstation für Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte

### Erläuterung:

Für die Zwischenspeicherung von Wasserstoff für eine bedarfsgerechte und zeitlich von der Produktion bzw. Anlieferung entkoppelten Nutzung bedarf es Speicher. Hier bietet sich insbesondere für große Speichervolumina die Nutzung von Kavernen an. Cuxhaven und das Umland weisen mehrere unterirdisch verlaufende Salz- und Tongesteinsschichten auf, die nach Aussolung großvolumige Speicher zur Verfügung stellen könnten. Diese würden es Cuxhaven erlauben, Wasserstoff im großen Maßstab zu lagern und bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen.

Die nachgelagerte Synthese zu Ammoniak oder Methanol (siehe Empfehlung 4) und die anschließende Bebunkerung von Schiffen (Treibstoff und/oder Fracht) weist großes Potenzial für Cuxhaven auf. Es empfiehlt sich, eine entsprechende Bebunkerungsoption (ggf. Bunkerstation) aufzubauen.

### Grundlage für die Empfehlung:

Der Gasnetzentwicklungsplan sieht bis 2050 keinen landseitigen Pipelineanschluss von Cuxhaven an das deutsche bzw. europäische Wasserstoffnetz (European Hydrogen Backbone) vor (FNB Gas 2022). Cuxhaven weist allerdings eine günstige Lage mit Nähe zu der geplanten Offshore-Wasserstoffleitung AquaDuctus in der Deutschen Bucht auf und hat geografisch das Potenzial für einen möglichen Sticheitungsanschluss. Auch ein Anschluss an die bisher in der Konzeptphase befindliche Energieinsel in der Elbmündung wäre denkbar.

Um die angelandeten Wasserstoffmengen dann im großen Maßstab bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen bzw. ggf. weiterzuverarbeiten und zur Verfügung zu stellen, besteht der Bedarf nach Speichern. Hier könnten sich die unterirdisch verlaufenden Salz- und Tongesteinsschichten mit dem Bau von Kavernen für eine großvolumige Wasserstoffspeicherung eignen. Ein direkter landseitiger, großvolumiger und containerbasierter Weitertransport per LKW oder über die Schiene hängt stark von der geografischen Lage der Endverbraucher ab und kann sich gegenüber einer Anlandung in anderen Häfen als unwirtschaftlich erweisen. Auch eine Anbindung an das deutsche Wasserstoff-Ferngasnetzwerk in Bremen mit dem Bau einer ca. 105 km langen Ferngasleitung (Kostenschätzung Gasnetzbetreiber 158 Mio. EUR., Stand Dezember 2022) erscheint mit Blick auf die zuvor genannte Nichtberücksichtigung in der Netzentwicklungsplanung zum aktuellen Zeitpunkt als unwahrscheinlich. Grundsätzlich erklären sich die Gasnetzbetreiber offen für Anpassungen ihrer Planungen, sollte sich in Cuxhaven ein großer Wasserstoffbedarf entwickeln bzw. eine große Anlandung von Wasserstoff avisiert werden.

Wie in Empfehlung 3 beschrieben, liegt großes Potenzial in der maritimen Verwendung von Wasserstoff und landseitigen Mobilitätsanwendungen. Insbesondere die Bebunkerung von Schiffen z. B. für den Offshore-Betrieb (SOV (engl. Service Operation Vessel), Jack-Up-Schiffe und kleinere Schiffe wie z. B. CTVs (engl. Crew Transfer Vessel) kann ein deutlicher Wachstumsmarkt sein. Hochseetaugliche Schiffe könnten mit wasserstoffbasierten Derivaten wie Ammoniak oder Methanol bebunkert werden. Hierfür kommen unterschiedliche Bunkerstrategien in Frage, welche im Rahmen der ersten Maßnahmen nachfolgend erläutert werden.

### Erste Maßnahmen:

- Begutachtung der Teilgebiete TG006, TG075, TG067 und TG068 aus dem Bericht des Öko-Institutes als perspektivische Kavernenspeicher für Wasserstoff
- Kontaktaufnahme zu den bzw. -pflege der Stakeholder der Offshore-Wasserstoffpipeline für die Berücksichtigung einer Sticheitung
  - Zu berücksichtigende Aspekte für die Umsetzung einer solchen Sticheitung sind die zu querende hochfrequentierte Schifffahrtsline der Elbe und deren Baggertiefe, die Morphodynamik sowie diverse Schutzgebiete wie z. B. das Schleswig-Holsteinische Wattenmeer und andere umliegende Schutzgebiete

(Vogelschutzgebiete, besonders sensibles Meeresgebiet (PSSA), Schutzzone 1). Der Planungs- und Genehmigungsprozess für den Bau einer Sticheitung ist absehbar anspruchsvoll.

- Eine Anlandung der Wasserstoffpipeline könnte süd-östlich des Hafens erfolgen. Hierzu müsste eine genehmigungsrechtliche Überprüfung für einen geeigneten Standort durchgeführt werden.
- Planung der Bunkerstation
  - Die Art und Weise der Bebunkerung hängt davon ab, welche Energieträger als Kraftstoffe in zukünftigen Schiffsantrieben verwendet werden (z. B.  $\text{GH}_2$ ,  $\text{LH}_2$ , Ammoniak, LOHC oder Methanol). Erste Pilotprojekte setzen sich mit der Betankung von Ammoniak und Methanol auseinander. So wird eine Bunkerbarge für den Treibstoff Ammoniak im Zuge des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Wasserstoffleitprojektes „TransHyDE-Campfire“ geplant. Methanol ist bereits ein in der Schifffahrt etablierter Treibstoff – hierfür können gängige Bunkerbargen verwendet werden.
  - Für die Umsetzung von Wasserstoff- bzw. Derivat-Bebunkerungen von Schiffen gibt es mehrere Optionen, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen:
    - Eine gängige Option der Bebunkerung ist die wasserseitige Treibstoffübergabe von einer Bunkerbarge zum Empfängerschiff (STS: Ship-to-Ship). Hierbei wird die Bunkerbarge am Empfängerschiff längsseitig vertäut, um die Wasserstoffübergabe zu realisieren. Frachtschiffe werden auf diese Weise bebunkert, um Zeit während des planmäßigem Ladungsumschlags am Lade- oder Löschhafen zu sparen. Vorteil dieser Methode ist, dass eine Bebunkerung gleichzeitig mit dem Ladungsumschlag bei Frachtschiffen stattfinden kann und dies landseitig keinen Einfluss auf den Hafenbetrieb nimmt.
    - Eine landseitige Bebunkerungsoption, die sich weitgehend flexibel gestaltet, ist die trailerbasierte Bebunkerung (TTS: Truck-to-Ship). Treibstoffbeladende Trailer werden an der Kaikante positioniert und mittels Bunkerschläuchen mit dem Schiff verbunden. Je nach Schiff ist es möglich, mehrere Trailer gleichzeitig mit den Schiffstanks zu verbinden und somit eine höhere Übergaberate zu erreichen. Vorteil dieser Methode ist, dass Trailer in der Regel auch in Fischereihäfen und Marinas Platz finden und somit kleinere Schiffe, Boote und Yachten betanken können. Des Weiteren ist diese Methode auch gleichzeitig mit dem Ladungsumschlag bei Frachtschiffen möglich.
    - Ebenfalls örtlich flexibel gestaltet sich die Wasserstoffübergabe bei austauschbaren Tankcontainern. Hierbei werden leere mobile Tankcontainer von den Schiffen gelöscht und durch volle ersetzt. Dies ist nur möglich, wenn das Schiff darauf ausgelegt ist.
    - Bei einer fest installierten Wasserstoff-Bunkerstation (PTS: Port-to-Ship) werden Schiffe an einem speziellen Liegeplatz bebunkert. Je nach Design kann eine Bunkerstation für diverse Schiffe verwendet werden. Aus zeitlichen Gründen ist es Frachtschiffen in der Regel nicht möglich, an einer Bunkerstation für einen mehrstündigen Bunkerprozess halt zu machen, da ein Ladungsumschlag an dieser Stelle nicht möglich ist. Hier wäre es denkbar, lediglich eine Bunkerbarge an der Bunkerstation zu bebunkern, um die erneuerbaren Energieträger anschließend an das Frachtschiff am Ort des Ladungsumschlags zu übergeben.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Volumetrische und gravimetrische Energiedichte von Brennstoffen (Tropfengrößen mit fixem Energiegehalt von 1 kWh).....	4
Abbildung 2: Herstellung von Wasserstoff und Farbkennzeichnung (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2021).....	5
Abbildung 3: Speichermethoden für Wasserstoff.....	7
Abbildung 4: Wasserstofftransport per Straße ©malp/stock.adobe.com.....	9
Abbildung 5: Schiffstransport von flüssigem Wasserstoff mit Komposit-Kryotanks ©AA+W/stock.adobe.com.....	10
Abbildung 6: Wasserstofftransport per Pipeline ©malp/stock.adobe.com.....	11
Abbildung 7: Sektorenübergreifender Einsatz von Wasserstoff.....	13
Abbildung 8: Technologiereifegrade mobiler Wasserstoff-Anwendungen.....	14
Abbildung 9: Hydex – Wasserstoff-Index letzte 30 Tage (Stand 19.01.2023).....	18
Abbildung 10: v. l. n. r. Lage des Landkreises Cuxhaven in Niedersachsen, Landkreis Cuxhaven © Landkreis Cuxhaven 2016, Gemeinde Cuxhaven © Landkreis Cuxhaven 2016.....	20
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Stromnetzes der Region (Open Infrastructure Map 2022).....	21
Abbildung 12: Installierte WEA (links); installierte Solaranlagen (rechts) (eigene Darstellung).....	21
Abbildung 13: Ausschnitt lokales Gasversorgungsnetz (E.W.E. AG 2022).....	22
Abbildung 14: Pipelines in der Nordsee, orangene Punkte repräsentieren Anlandestelle für LNG, blaue Punkte repräsentieren Anlandestelle für Strom, grüne Punkte repräsentieren Anlandestellen für Gas ....	22
Abbildung 15: Darstellung der geplanten Wasserstoffinfrastruktur in der Nordsee (AquaVentus-Planungen in blau, schematischer Verlauf einer möglichen Pipeline in dunkelblau) ©4cOffshore.....	23
Abbildung 16: Geographische Lage der Teilgebiete der Ton- und Kristallingesteine (Saleem Chaudry 2022) ....	24
Abbildung 17: Übersichtskarte Cuxhaven (Open Street Map 2022).....	25
Abbildung 18: Stadtliniennetz Cuxhaven (KVG Stade GmbH & Co. KG 2021b).....	26
Abbildung 19: LP 1-3 – Mehrzweckterminal (links), LP4 – Offshore-/ Schwerlast-/ Mehrzweck-Terminal (rechts) (offshore-basis.de 2022b).....	28
Abbildung 20: LP 5-7 (links), LP 8 – „Terminal I“ Offshore-Terminal (rechts) (offshore-basis.de 2022b).....	28
Abbildung 21: LP 9 – „Terminal II“ Offshore-Terminal (links), LP 9.3 (rechts) (offshore-basis.de 2022b).....	28
Abbildung 22: Übersicht Hafenterminals und Liegeplätze (Niedersachsen Ports 2019).....	29
Abbildung 23: Industrielle Entwicklungsflächen in Cuxhaven (offshore-basis.de 2022a).....	30
Abbildung 24: Freie Entwicklungsflächen in Cuxhaven im 2. Schritt (offshore-basis.de 2022a).....	31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige Kennzahlen für Elektrolyseurtechnologien im Jahr 2020/2050 (IRENA 2021) .....	7
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Transportmittel.....	12
Tabelle 3: Expliziten Ausbauzielen für die Wasserelektrolyse bis 2030; (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2021).....	19
Tabelle 4: Installierte Anlagen (ohne Speicher) laut Marktstammdatenregister gerundet auf kW (Postleitzahlenbereiche: 27472, 27474, 27476, 27478; Stand 01.12.2022) .....	21
Tabelle 5: Übersicht der Linien-Fähren und Ausflugsschiffe in Cuxhaven .....	27
Tabelle 6: Übersicht Akteure im Bereich Wasserstoff in Cuxhaven.....	33
Tabelle 7: Übersicht der Optionen im „Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum“ und aktueller Stand hinsichtlich deren Realisierung.....	35
Tabelle 8: Übersicht mobile Landstromlösungen (Hanseatic Transport Consultancy und MKO Marine Consulting 2022) .....	36
Tabelle 9: Übersicht der Anregungen in „Wasserstoff als Teil der DNA der Stadt Cuxhaven – Positionierung 2020“ und aktueller Stand.....	37
Tabelle 10: Ausgewählte Fördermittelsuchmaschinen .....	40
Tabelle 11: Marktübersicht Elektrolyseure, nach (C.A.R.M.E.N. e.V 2021) (IRENA 2021) .....	57
Tabelle 12: Übersicht Förderprogramme.....	58

## Literaturverzeichnis

- Academic (2022): Bahnstrecke Hamburg–Cuxhaven. Online verfügbar unter <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/132406>, zuletzt aktualisiert am 30.04.2015, zuletzt geprüft am 01.12.2022.
- Albrecht, Uwe; Ulrich Büniger; Michalski, Jan; Raksha, Tetyana; Wurster, Reinhold; Zerhusen, Jan (2020): Internationale Wasserstoffstrategien. Executive Summary. Hg. v. Weltenergierat – Deutschland e.V. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Online verfügbar unter [https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2021/03/WEC\\_H2\\_Strategie\\_Executive-Summary\\_DE\\_final.pdf](https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2021/03/WEC_H2_Strategie_Executive-Summary_DE_final.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2022.
- Alstom (2022): Weltpremiere: Erstes Netz mit 14 Wasserstoffzügen nimmt in Niedersachsen Betrieb mit Passagieren auf. Online verfügbar unter <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/8/weltpremiere-erstes-netz-mit-14-wasserstoffzuegen-nimmt-niedersachsen>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Andreas Gelfort; Christian Schneller; Philipp Heuser; Leona Jovy; Philipp Steffens; Vito Tisci (2022): H2-Barometer. Unabhängige Bewertung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland. Hg. v. E-Bridge Consulting GmbH. Online verfügbar unter [https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2022/09/E-Bridge\\_H2-Barometer\\_Ausgabe-2\\_2022.pdf](https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2022/09/E-Bridge_H2-Barometer_Ausgabe-2_2022.pdf), zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- AquaVentus (2022): AquaVentus-Vision. Online verfügbar unter <https://aquaventus.org/>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- B.A.U.M Consult (2019): Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept für die Stadt Cuxhaven. Online verfügbar unter <https://www.afw-cuxhaven.de/assets/Uploads/Klimaschutzkonzept-Stadt-Cuxhaven-2019.pdf>.
- Bloomberg NEF (2022): 2H 2022 Hydrogen Market Outlook – Policy Finally Arrives. Blomberg Finance.
- BMDV (2022a): Die Beförderung gefährlicher Güter. Online verfügbar unter [https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/die-befoerderung-gefaehrlicher-gueter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/die-befoerderung-gefaehrlicher-gueter.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 24.11.2022.
- BMDV (2022b): Gefahrgut - Recht / Vorschriften - Straße. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Gefahrgut/gefahrgut-recht-vorschriften-strasse.html>, zuletzt aktualisiert am 14.12.2022, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- BMWi (2018): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklungen im Jahr 2018, 21 ff. Online verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=24](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=24), zuletzt geprüft am 14.01.2022.
- Bründlinger, Thomas; Elizalde König, Julian; Frank, Oliver; Gründig, Dietmar; Jugel, Christoph; Kraft, Patrizia et al. (2018): dena-Leitstudie - Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena) ; Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH). Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- BUND (2016): Stromeinsatz zu Heizzwecken. Online verfügbar unter [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/bund/standpunkt/stromeinsatz\\_zu\\_heizzwecken\\_standpunkt.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/standpunkt/stromeinsatz_zu_heizzwecken_standpunkt.pdf), zuletzt geprüft am 14.01.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20), zuletzt geprüft am 07.01.2022.
- Clean Shipping Coalition (2021): UN SHIPPING AGENCY CLIMATE TALKS AGAIN HELD BACK BY HANDFUL OF BLOCKERS. Online verfügbar unter <http://www.cleanshipping.org/news/un-shipping-agency-climate-talks-again-held-back-by-handful-of-blockers/>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.

- Deutsches Offshore-Industrie Zentrum Cuxhaven (2022): HyExpert. Online verfügbar unter <https://www.offshore-basis.de/wasserstoff/hyexpert/>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Dirk Altwig; Jörn Bischoff; Andrea Stein; Andrea Pujari (2022): Weltpremiere: Erstes Netz mit 14 Wasserstoffzügen nimmt in Niedersachsen Betrieb mit Passagieren auf. Hannover/Bremervörde. Online verfügbar unter [https://www.lnvg.de/fileadmin/media/lnvg/Pressemitteilungen/20220824\\_Weltpremiere.pdf](https://www.lnvg.de/fileadmin/media/lnvg/Pressemitteilungen/20220824_Weltpremiere.pdf).
- DNV (2021): Alternative Fuels for Containerships. Online verfügbar unter <https://www.dnv.com/maritime/publications/alternative-fuels-for-containerships-download.html>, zuletzt geprüft am 29.03.2022.
- DNV (2022): Energy Transition Outlook. A global and regional forecast to 2050.
- DOIZ (2022): Das Deutsche Offshore-Industrie-Zentrum Cuxhaven. Online verfügbar unter <https://www.offshore-basis.de/>, zuletzt aktualisiert am 14.12.2022, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- DVGW (2022): DVGW energie | wasser-praxis konkret. Online verfügbar unter [https://wvgw.de/dyn\\_pdf/ewp/2022/konkret/38/](https://wvgw.de/dyn_pdf/ewp/2022/konkret/38/), zuletzt aktualisiert am 10.10.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2022.
- DVZ (2022): Methanol lohnt sich wirtschaftlich nicht. Online verfügbar unter <https://www.dvz.de/rubriken/test-technik/alternative-antriebe/detail/news/methanol-lohnt-sich-wirtschaftlich-nicht.html>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- E.W.E. AG (2022): Planausschnitt Cuxhaven Stadt.
- Esfeh, Shaghayegh Kazemi; Monnerie, Nathalie; Mascher, Sophia; Baumstark, David; Kriechbaumer, Dorottya; Neumann, Nicole et al. (2022): Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Online verfügbar unter [https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2022/kurzstudie-maritime-treibstoffe.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2022/kurzstudie-maritime-treibstoffe.pdf?__blob=publicationFile&v=4), zuletzt geprüft am 14.06.2022.
- Europäische Kommission (21.10.2021): Staatliche Beihilfen: Kommission billigt neue Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen. Maria TSONI, Arianna PODESTA. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip\\_21\\_6982](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_21_6982).
- Europäische Kommission (2022): Delivering the European Green Deal. Online verfügbar unter [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de), zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- European Parliament & Council (2019): Clean Vehicle Directive. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj>.
- EWE (2022): Hyways for Future. Online verfügbar unter <https://www.hyways-for-future.de/de/projekt>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Flughafen-Betriebsgesellschaft Cuxhaven/ Nordholz mbH: SeaAirport Cuxhaven/Nordholz. Take off for flexibility. Online verfügbar unter [https://www.afw-cuxhaven.de/assets/Uploads/Broschuere\\_SeaAirport\\_Cuxhaven\\_Nordholz.pdf](https://www.afw-cuxhaven.de/assets/Uploads/Broschuere_SeaAirport_Cuxhaven_Nordholz.pdf), zuletzt geprüft am 16.12.2022.
- FNB Gas (2022): Wasserstoffbericht.
- Fraunhofer (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Online verfügbar unter [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10\\_Fraunhofer\\_Wasserstoff-Roadmap\\_fuer\\_Deutschland.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf).
- Frithjof Staiß; Jörg Adolf; Florian Ausfelder; Christoph Erdmann; Manfred Fishedick; Christopher Hebling et al. (2022): Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse. Unter Mitarbeit von Nationale Akademie der

- Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. München (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). Online verfügbar unter [https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/PDFs/Analyse\\_Wasserstoff\\_neu.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/Analyse_Wasserstoff_neu.pdf), zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- Gao, K.; Tengler, M.; Bhashyam, A.; Wang, X.; Bravante, M.; Annex, M. (2022): 1H 2022 Hydrogen Levelized Cost Update – Higher LCOE and Gas Prices. Hg. v. BloombergNEF.
- GASCADE Gastransport: AquaDuctus (2022). Online verfügbar unter <https://www.gascade.de/wasserstoff/aqueductus>, zuletzt aktualisiert am 30.11.2022, zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- Getting to Zero Coalition (2021): The Next Wave Green Corridors. Online verfügbar unter <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/11/The-Next-Wave-Green-Corridors.pdf>, zuletzt geprüft am 24.06.2022.
- H2 Mobility (2022): H2-Tankstellennetz. Online verfügbar unter <https://h2-mobility.de/en/>, zuletzt geprüft am 19.10.2022.
- Hanseatic Transport Consultancy und MKO Marine Consulting (2022): Mobile Landstromversorgung – Technologische Möglichkeiten und Voraussetzungen im Auftrag der NOW GmbH. Online verfügbar unter [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/09/NOW\\_Studie-Mobile-Landstromversorgung.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/09/NOW_Studie-Mobile-Landstromversorgung.pdf).
- HHLA (2022): Startschuss für Innovationscluster: Wasserstoff soll schwere Hafentechnik antreiben. Online verfügbar unter <https://hhla.de/medien/news/detailansicht/startschuss-fuer-innovationscluster-wasserstoff-soll-schwere-hafentechnik-antreiben>, zuletzt geprüft am 12.12.2022.
- Hickner, Michael A.; Herring, Andrew M.; Coughlin, E. Bryan (2013): Anion exchange membranes: Current status and moving forward. In: *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 51 (24), S. 1727–1735. DOI: 10.1002/polb.23395.
- Holzheizkraftwerke Cuxhaven (2023): Der Strom aus Cuxhaven. Online verfügbar unter <https://www.holzheizkraftwerke.de/>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- Hydrogentle GmbH (2019): Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum.
- ifh Göttingen (2022): Wasserstoff-Infrastruktur und maritime Wirtschaft Technische, institutionelle und regionale Grundlagen für die Mittelstandspolitik. Online verfügbar unter [https://ifh.wiwi.uni-goettingen.de/site/assets/files/6733/ifh\\_fb-3\\_2022.pdf](https://ifh.wiwi.uni-goettingen.de/site/assets/files/6733/ifh_fb-3_2022.pdf).
- IHK Lüneburg Wolfsburg (2022): H2Skills. Online verfügbar unter <https://www.ihk.de/ihklw/produkte/beratung-und-service/energie-und-umwelt/h2skills-weiterbildungsbedarfe-im-wasserstoffsektor-5346640>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Ile-Region Moorexpress-Stader Geest (2020): 16. Sitzung der Lenkungsgruppe. Umsetzung der Fortschreibung des Regionalen Entwicklungskonzeptes 2014-2020.
- International Energy Agency (2019): The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA. Online verfügbar unter [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf), zuletzt geprüft am 08.01.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2021): Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making. A Guide to Policy Making. Website. Online verfügbar unter <https://www.irena.org/publications/2021/May/Green-Hydrogen-Supply-A-Guide-To-Policy-Making>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2022, zuletzt geprüft am 01.10.2022.
- IRENA (2021): Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. Online verfügbar unter [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Green\\_Hydrogen\\_breakthrough\\_2021.pdf?la=en&](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&)

hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6#:~:text=The%20electrolyser%20investment%20cost%20for,Based%20on%20IRENA%20analysis.

- Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021). Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 14.01.2022.
- KONGSTEIN (2021): Offsh2ore. Online verfügbar unter <https://kongstein.com/offsh2ore-a-concept-design-study-for-offshore-hydrogen-production-from-offshore-wind-in-island-mode-configuration/>.
- KVG Stade GmbH & Co KG (2021a): Zahlenspiegel. Online verfügbar unter [https://www.kvg-bus.de/fileadmin/user/pdf/zahlenspiegel\\_2021.pdf](https://www.kvg-bus.de/fileadmin/user/pdf/zahlenspiegel_2021.pdf), zuletzt geprüft am 16.01.2023.
- KVG Stade GmbH & Co. KG (2021b): Stadtliniennetz Cuxhaven. Online verfügbar unter [https://www.kvg-bus.de/fileadmin/user/pdf/stadtliniennetz\\_cuxhaven\\_08.11.2021.pdf](https://www.kvg-bus.de/fileadmin/user/pdf/stadtliniennetz_cuxhaven_08.11.2021.pdf), zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- MAN (2022): Containerschiff reduziert Treibhausgas- Emissionen durch Betrieb mit synthetischem Kraftstoff. Online verfügbar unter <https://www.man-es.com/de/home/2022/04/06/containerschiff-reduziert-treibhausgas--emissionen-durch-betrieb-mit-synthetischem-kraftstoff.>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- Manfred Klell; Helmut Eichseder; Alexander Trattner (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung,. 4. Auflage.
- McKinsey & Company (2022): Global Energy Perspective 2022. Executive Summary. Online verfügbar unter [https://www.mckinsey.com/~/\\_media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf](https://www.mckinsey.com/~/_media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf), zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- Meinen, Heinke (2022): DLR - Institut für vernetzte Energiesysteme - Forschungsprojekt HyCavMobil. Online verfügbar unter [https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13776/23923\\_read-57990/](https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13776/23923_read-57990/), zuletzt aktualisiert am 19.10.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2022.
- NDR (2023): Land gibt 100 Millionen für Hafenausbau in Cuxhaven. Online verfügbar unter [https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg\\_ostfriesland/Land-gibt-100-Millionen-fuer-Hafenausbau-in-Cuxhaven,aktuelloldenburg11512.html](https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg_ostfriesland/Land-gibt-100-Millionen-fuer-Hafenausbau-in-Cuxhaven,aktuelloldenburg11512.html), zuletzt geprüft am 16.01.2023.
- Niedersachsen Ports (2019): NPorts Perspektivpapier Nordseehafen Cuxhaven.
- Niedersachsen Ports (2021): Port Information Guide Cuxhaven.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2020): Energiewendebericht 2020.
- Now GmbH (2018a): Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Online verfügbar unter <https://www.dvw-info.de/wp-content/uploads/2019/06/NOW-Elektrolysestudie-2018.pdf>.
- Now GmbH (2018b): Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. Berlin, zuletzt geprüft am 19.10.2022.
- offshore-basis.de (2022a): Freie Industrie- und Gewerbeflächen. Online verfügbar unter <https://www.offshore-basis.de/infrastruktur/freie-gewerbeflaechen/>, zuletzt aktualisiert am 30.11.2022, zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- offshore-basis.de (2022b): Terminals und Liegeplätze. Online verfügbar unter <https://www.offshore-basis.de/infrastruktur/terminals-und-liegeplaetze/>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Open Infrastructure Map (2022). Online verfügbar unter <https://openinframap.org/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2022, zuletzt geprüft am 16.01.2023.

- Open Street Map (2022): Open Street Map. Hg. v. Google Maps.
- Peter Kurzweil; Otto K. Dietmeier (2018): Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Philipp Gerbert; Patrick Herhold; Jens Burchardt; Stefan Schönberger (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. v. The Boston Consulting Group GmbH und Prognos AG. Online verfügbar unter [https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20180118\\_bdi\\_studie\\_klimapfade\\_fuer\\_deutschland\\_01.pdf](https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20180118_bdi_studie_klimapfade_fuer_deutschland_01.pdf), zuletzt geprüft am 19.10.2022.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Stellungnahme | Juni 2021. Online verfügbar unter [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04\\_Stellungnahmen/2020\\_2024/2021\\_06\\_stellungnahme\\_wasserstoff\\_im\\_klimaschutz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- Saleem Chaudry, Judith Krohn (2022): Fachliche Beratung des Landkreises Cuxhaven zu den Ergebnissen des Zwischenberichts Teilgebiete im Standortauswahlverfahren für ein Endlager. In: *Öko-Institut e.V.*
- SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, FDP (2021): Koalitionsvertrag. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Mehr Fortschritt Wagen. Hg. v. SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, FDP.
- Staiß, Frithjof; Adolf, Jörg; Ausfelder, Florian; Erdmann, Christoph; Hebling, Christopher; Jordan, Thomas et al. (2022): Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Unter Mitarbeit von Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. Online verfügbar unter [https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/PDFs/Analyse\\_Wasserstoff\\_neu.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/Analyse_Wasserstoff_neu.pdf), zuletzt geprüft am 18.10.2022.
- Stecherle, Philip; Brandes, Julian; Heilig, Judith; Wrede, Daniel; Kost, Christoph; Schlegl, Thomas et al. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Hg. v. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). Freiburg.
- Sternier, M. (2017): Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien. Online verfügbar unter [https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017\\_okt\\_energiwirtschaftliches\\_kurzgutachten\\_fur\\_ptx-allianz.pdf](https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017_okt_energiwirtschaftliches_kurzgutachten_fur_ptx-allianz.pdf), zuletzt geprüft am 14.01.2022.
- Tagesspiegel (2022): EU einigt sich auf maritimen Emissionshandel. Online verfügbar unter <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/eu-einigt-sich-auf-maritimen-emissionshandel>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- Teuffer (2022): Roadmap für Wasserstoffspeicher veröffentlicht. In: *energate GmbH*, 06.12.2022. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/228662/roadmap-fuer-wasserstoffspeicher-veroeffentlicht>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- Umweltbundesamt (2022): Seeschifffahrt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#fakten-zur-seeschifffahrt-und-zu-ihren-auswirkungen-auf-die-umwelt>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- UN Climate Change Conference UK (2021): CLYDEBANK DECLARATION FOR GREEN SHIPPING CORRIDORS. Online verfügbar unter <https://ukcop26.org/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors/>, zuletzt geprüft am 21.12.2022.
- van Rossum, Rik; Jens, Jaro; La Guardia, Gemma; Wang, Anthony; Kühnen, Luis; Overgaa, Martijn (2022): European Hydrogen Backbone. Online verfügbar unter <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/04/EHB-A-European-hydrogen-infrastructure-vision-covering-28-countries.pdf>.

- Vito Milella; Bodo Nachbar; Andrew Kelly; Stefan Lieske; Stephan Bude; Thomas Bayer et al. (2020): Potenzialbeschreibung Potenzialbeschreibung - Wasserstofftransport über das Schienennetz. Unter Mitarbeit von Mistill Kilicarslan. Hg. v. DB Energie GmbH. Online verfügbar unter <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>, zuletzt geprüft am 18.10.2022.
- Warnecke, Matthias; Röhling, Simone (2021): Underground hydrogen storage – Status quo. In: *zdgg* 172 (4), S. 641–659. DOI: 10.1127/zdgg/2021/0295.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2023): Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Online verfügbar unter [https://www.wsa-elbe-nordsee.wsv.de/Webs/WSA/Elbe-Nordsee/DE/1\\_Wasserstrassen/1\\_Revier/Elbe/elbe\\_node.html](https://www.wsa-elbe-nordsee.wsv.de/Webs/WSA/Elbe-Nordsee/DE/1_Wasserstrassen/1_Revier/Elbe/elbe_node.html), zuletzt geprüft am 27.01.2023.
- Wintershall DEA (2022): Wasserstoffprojekt H2Move nimmt in Cuxhaven Fahrt auf. Online verfügbar unter <https://wintershalldea.de/de/newsroom/clone-wasserstoffprojekt-h2move-nimmt-cuxhaven-fahrt-auf>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.
- Wuppertal Institut; DIW Econ: Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Online verfügbar unter <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>, zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. (2021): Seehäfen in der Energiewende: Wasserstoff. Arbeitspapier.



## Anhang

Tabelle 11: Marktübersicht Elektrolyseure, nach (C.A.R.M.E.N. e.V 2021) (IRENA 2021)

Anbieter	Tech- nologie	Modell	H <sub>2</sub> Menge (Nm <sup>3</sup> /h)	Leistungsklasse
<b>AquaHydrex (USA)</b>	AEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>AREVAH2 (FR)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>AsahiKASEI (JPN)</b>	AEL	Electrolyzer Acilyzer™	k. A.	k. A.
<b>AVX/Kumatec Hydrogen (DE)</b>	PEM	PEM-40-100	20	100 kW
		PEM-100-25	5	3 kW
		PEM-40-1000	200	1000 kW
<b>Carbotech (DE)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Ceres (GBR)</b>	HTEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Cockerill Jingli (CHN)</b>	AEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Bloomenergy (USA)</b>	HTEL	Bloom Electrolyzer	86,8	360 kW
<b>Denora (IT)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
	AEL			
<b>Elogen (FR)</b>	PEM	E Serie (5 Modelle)	10 - 1000	50- 5000 kW
<b>Enapter (DE)</b>	AEM	EL 2.1	5	1 MW
		AEM-Multicore	208,3	
<b>Giner ELX (USA)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Green Hydrogen Systems (DNK)</b>	AEL	HyProvide A Series (3 Modelle)	30/60/90	1 MW
<b>Haldor Topsoe (DNK)</b>	HTEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>HIAT (DE)</b>	PEM	HYP40	20	102 kW
		HYP100	5	35 kW
<b>Hitachi Zosen (JPN)</b>	AEL/PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Höller Electrolyzer (DE)</b>	PEM	Prometheus (3 Modelle)	k. A.	k. A.
<b>Honda (JPN)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>H-Tec Systems (DE)</b>	PEM	ME 100/350	47	225 kW
		ME 450/1400	210	1000 kW
<b>Hydrogen Pro (NOR)</b>	AEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Hydrogenics (USA)</b>	PEM	HyLyzer (5 Modelle)	199,5 – 1000	k. A.
	AEL	HySTAT (6 Modelle)	9,7 – 99,5	
<b>Hygear (NL)</b>	AEL	Hy.Gen-e (5 Modelle)	10 - 250	k. A.
<b>iGas (DE)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>ITM Power (GBR)</b>	PEM	HGAS (5 Modelle)	122,2 – 1875	707–5000 kW
<b>Kobelco (JPN)</b>	AEL/PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>McPhy Energy (FR)</b>	AEL	Piel (4 Modelle)	0,4 – 10	3 – 60 kW
		Mclyzer (6 Modelle)	10 - 800	50 – 100 kW
<b>NEL (NOR)</b>	PEM	M Series / S series / H Series / C	4,920	k. A.
	AEL	Series	3,880	
		A Series		
<b>NextHydrogen (CAN)</b>	AEM	NH 100 / 300 / 500	17 – 500	k. A.
<b>OxEon Energy (USA)</b>	HTEL	Prototyp	k. A.	k. A.
<b>Peric (CHN)</b>	AEM	KCDQ (13 Modelle)	k. A.	k. A.
	PEM	SDQ (10 Modelle)	k. A.	
<b>PlugPower (USA)</b>	PEM	1 MW Electrolyzer	200	k. A.
		5 MW Elektrolyzer	1000	
		ALLGASH (2 Modelle)	50 – 200	
		MERRIMACK (2 Modelle)	10 - 30	
<b>Shanghai Zhizhen (CHN)</b>	AEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Siemens energy (DE)</b>	PEM	Silyzer 300	1100,1 – 22222,2	k. A.
<b>Solidpower (IT)</b>	HTEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Sunfire (DE)</b>	HTEL	Sunfire-HyLink SOEC	750	k. A.
	AEL	Sunfire-HyLink Alkaline	2230	
<b>Sylfen (FR)</b>	HTEL	Prototyp	k. A.	k. A.

<b>Teledyne (USA)</b>	PEM	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Thyssenkrupp (DE)</b>	AEL	20 MW Module	4000	k. A.
<b>Tianjin (CHN)</b>	AEL	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Toshiba (JPN)</b>	HTEL	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 12: Übersicht Förderprogramme

<b>Exemplarische Förderprogramme</b>	<b>Fördergeber</b>	<b>Link</b>
<b>Regional</b>		
Pilot- und Demonstrationsvorhaben der Wasserstoffwirtschaft (Wasserstoffrichtlinie)	Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz	<a href="https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Niedersachsen/wasserstoffrichtlinie.html#:~:text=Das%20Land%20Niedersachsen%20unterst%C3%BCtzt%20Sie,F%C3%B6rderung%20f%C3%BCr%20Einzel%20oder%20Verbundvorhaben.">https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Niedersachsen/wasserstoffrichtlinie.html#:~:text=Das%20Land%20Niedersachsen%20unterst%C3%BCtzt%20Sie,F%C3%B6rderung%20f%C3%BCr%20Einzel%20oder%20Verbundvorhaben.</a>
Einzelbetriebliche Investitionsförderung	Nbank	<a href="https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Einzelbetriebliche-Investitionsf%C3%B6rderung.html#aufeinblick">https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Einzelbetriebliche-Investitionsf%C3%B6rderung.html#aufeinblick</a>
Innovationsförderprogramm für Forschung und Entwicklung in Unternehmen (IFP)	Nbank	<a href="https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Innovationsf%C3%B6rderprogramm-f%C3%BCr-Forschung-und-Entwicklung-in-Unternehmen-(IFP).html#aufeinblick">https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Innovationsf%C3%B6rderprogramm-f%C3%BCr-Forschung-und-Entwicklung-in-Unternehmen-(IFP).html#aufeinblick</a>
Verbesserung der Stadt-/Umlandmobilität im öffentlichen Personennahverkehr (Flexible Bedienformen)	Nbank	<a href="https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Verbesserung-der-Stadt-Umlandmobilit%C3%A4t-im-%C3%B6ffentlichen-Personennahverkehr-(Flexible-Bedienformen).html#hvkalkulationstool">https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Verbesserung-der-Stadt-Umlandmobilit%C3%A4t-im-%C3%B6ffentlichen-Personennahverkehr-(Flexible-Bedienformen).html#hvkalkulationstool</a>
Anschaffung brennstoffzellenbetriebener kommunaler Spezialfahrzeuge	Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz	<a href="https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Anschaffung-brennstoffzellenbetriebener-kommunaler-Spezialfahrzeuge.html#aufeinblick">https://www.nbank.de/F%C3%B6rderprogramm/e/Aktuelle-F%C3%B6rderprogramme/Anschaffung-brennstoffzellenbetriebener-kommunaler-Spezialfahrzeuge.html#aufeinblick</a>
<b>Deutschlandweit</b>		
Electrochemical Materials and Processes for Green Hydrogen and Green Chemistry (ECCM)	BMWK, BMBF	<a href="https://www.ptj.de/en/project-funding/applied-energy-research/eccm">https://www.ptj.de/en/project-funding/applied-energy-research/eccm</a>
Aufruf für deutsch-chinesische F&E-Kooperationsprojekte im Bereich Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge	BMDV	<a href="https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/deutsch-chinesische-forschungs-und-entwicklungs-kooperationsprojekte/">https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/deutsch-chinesische-forschungs-und-entwicklungs-kooperationsprojekte/</a>
Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge	BMDV	<a href="https://www.bag.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KSNI/Ksni_node.html">https://www.bag.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KSNI/Ksni_node.html</a>
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II): F&E-Projekte zu Wasserstoff und Brennstoffzellen	BMDV	<a href="https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/09/NIP-II-Foerderrichtlinie-FEI-2021.pdf">https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/09/NIP-II-Foerderrichtlinie-FEI-2021.pdf</a>
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) – Maßnahmen der Marktaktivierung – Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität	BMDV	<a href="https://www.ptj.de/nip">https://www.ptj.de/nip</a>
Nachhaltige Modernisierung von Küstenschiffen	BMDV	<a href="https://www.namkue.de/">https://www.namkue.de/</a>

<b>Exemplarische Förderprogramme</b>	<b>Fördergeber</b>	<b>Link</b>
Entwicklung regenerativer Kraftstoffe	BMDV	<a href="https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/regenerative-kraftstoffe/">https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/regenerative-kraftstoffe/</a>
KMU-innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz	BMBF	<a href="https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/innovativer-mittelstand/kmu-innovativ/kmu-innovativ-ressourceneffizienz-und-klimaschutz/kmu-innovativ-ressourceneffizienz-und-klimaschutz.html">https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/innovativer-mittelstand/kmu-innovativ/kmu-innovativ-ressourceneffizienz-und-klimaschutz.html</a>
7. Energieforschungsprogramm	BMBF	<a href="https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2019/02/2337_bekanntmachung">https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2019/02/2337_bekanntmachung</a>
Energieforschungsprogramm – Forschung und Entwicklung im Grundlagenbereich	BMBF	<a href="https://www.ptj.de/projektfoerderung/anwendungsorientierte-grundlagenforschung-energie/ideenwettbewerb-gruener-wasserstoff">https://www.ptj.de/projektfoerderung/anwendungsorientierte-grundlagenforschung-energie/ideenwettbewerb-gruener-wasserstoff</a>
Internationale Projekte zum Thema grüner Wasserstoff	BMBF	<a href="https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/documents/internationale-kooperationen-gruener-wasserstoff.html">https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/documents/internationale-kooperationen-gruener-wasserstoff.html</a>
Klimaneutrale Produkte durch Biotechnologie – CO <sub>2</sub> und C <sub>1</sub> -Verbindungen als nachhaltige Rohstoffe für die industrielle Bioökonomie (CO <sub>2</sub> BioTech)	BMBF	<a href="https://www.ptj.de/projektfoerderung/biooekonomie/co2biotech">https://www.ptj.de/projektfoerderung/biooekonomie/co2biotech</a>
KMU-innovativ: Materialforschung	ProMat_KMU/ BMBF	<a href="https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/innovativer-mittelstand/kmu-innovativ/kmu-innovativ-materialforschung-promat_kmu/kmu-innovativ-materialforschung-promat_kmu.html">https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/innovativer-mittelstand/kmu-innovativ/kmu-innovativ-materialforschung-promat_kmu/kmu-innovativ-materialforschung-promat_kmu.html</a>
IKT für Elektromobilität: wirtschaftliche E-Nutzfahrzeug-Anwendungen und Infrastrukturen	BMWK	<a href="https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/Programme/Projekte/AktuelleTechnologieprogramme/IKT-EM/IKT-EM-3-Foerderprogramm/foerderung.html">https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/Programme/Projekte/AktuelleTechnologieprogramme/IKT-EM/IKT-EM-3-Foerderprogramm/foerderung.html</a>
Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)	BMWK	<a href="https://www.zim.de/ZIM/Navigation/DE/Foerderangebote/Kooperationsprojekte/kooperationsprojekte.html">https://www.zim.de/ZIM/Navigation/DE/Foerderangebote/Kooperationsprojekte/kooperationsprojekte.html</a>
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW) – Modul 5: Transformationskonzepte	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz und Prozesswaerme/Modul5_Transformationskonzepte/modul5_transformationskonzepte_node.html">https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz und Prozesswaerme/Modul5_Transformationskonzepte/modul5_transformationskonzepte_node.html</a>
Energieforschungsprogramm – Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung	BMWK	<a href="https://www.energieforschung.de/">https://www.energieforschung.de/</a>
Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW): Modul I – Transformationspläne, Machbarkeitsstudien	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html">https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html</a>
Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW): Modul II – Systemische Förderung (Investitions- und Betriebskosten)	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html">https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html</a>
Absatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neuen_antrag_stellen.html">https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neuen_antrag_stellen.html</a>
Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW): Modul III – Einzelmaßnahmen	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html">https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html</a>
Bau von Betankungsschiffen für LNG und nachhaltige erneuerbare Kraftstoffalternativen in der Schifffahrt (Betankungsschiff RL)	BMWK	<a href="https://www.bafa.de/DE/Wirtschaft/Handwerk_Industrie/Betankungsschiffe_LNG/betankungsschiffe_lng_node.html">https://www.bafa.de/DE/Wirtschaft/Handwerk_Industrie/Betankungsschiffe_LNG/betankungsschiffe_lng_node.html</a>
FH-Kooperativ	Bund	<a href="https://www.forschung-fachhochschulen.de/fachhochschulen/de/massnahmen/fh-kooperativ/fh-kooperativ_node.html">https://www.forschung-fachhochschulen.de/fachhochschulen/de/massnahmen/fh-kooperativ/fh-kooperativ_node.html</a>
Dekarbonisierung in der Industrie	BMUV	<a href="https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/foerderprogramm/">https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/foerderprogramm/</a>

<b>Exemplarische Förderprogramme</b>	<b>Fördergeber</b>	<b>Link</b>
Umweltinnovationsprogramm (UIP)	BMUV	<a href="https://www.umweltinnovationsprogramm.de/foerderinformationen">https://www.umweltinnovationsprogramm.de/foerderinformationen</a>
Unterstützung des internationalen Ausbaus von Erzeugungsanlagen von grünem Wasserstoff	BMWi und BMBF	<a href="https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/20210410-pm-sachstand-foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=10">https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/20210410-pm-sachstand-foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=10</a>
Förderung von Maßnahmen im Bereich des Exports grüner und nachhaltiger (Umwelt-)Infrastruktur	BMUV	<a href="https://www.exportinitiative-umweltschutz.de/foerderung/foerderrichtlinie/">https://www.exportinitiative-umweltschutz.de/foerderung/foerderrichtlinie/</a>
HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland	BMDV	<a href="https://www.ptj.de/projektfoerderung/nip/hyland-aufruf3">https://www.ptj.de/projektfoerderung/nip/hyland-aufruf3</a>
Alternative Antriebe im Schienenverkehr	BMDV	<a href="https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/2-runde-des-hyperformer-wettbewerbs-startet/">https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/2-runde-des-hyperformer-wettbewerbs-startet/</a>
Herstellung erneuerbarer CNG- und LNG-Kraftstoffe mittels biologischer Methanisierung	BMDV	<a href="https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/Foerderaufruf_Biologische-Methanisierung_20220329.pdf">https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/Foerderaufruf_Biologische-Methanisierung_20220329.pdf</a>
Marktaktivierung alternativer Technologien für die umweltfreundliche Bordstrom- und mobile Landstromversorgung von See- und Binnenschiffen	BMDV	<a href="https://www.bav.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bordstrom/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=4">https://www.bav.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bordstrom/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=4</a>
Investitionskredit Nachhaltige Mobilität (268/269) – Für Unternehmen	KfW	<a href="https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/F%C3%B6rderprodukte/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(268-269)/">https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/F%C3%B6rderprodukte/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(268-269)/</a>
IKK – Nachhaltige Mobilität (267) – Für Kommunen	KfW	<a href="https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunen/F%C3%B6rderprodukte/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(267)/">https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunen/F%C3%B6rderprodukte/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(267)/</a>
Klimaschutzoffensive für den Mittelstand	KfW	<a href="https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Klimaschutzoffensive-f%C3%BCr-den-Mittelstand-(293)/">https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Klimaschutzoffensive-f%C3%BCr-den-Mittelstand-(293)/</a>
Bundesförderung für innovative Brennstoffzellenheizgeräte in Gebäuden	KfW	<a href="https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)?redirect=365568">https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)?redirect=365568</a>
<b>EU</b>		
IPCEI	European Commission	<a href="https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen/ipceis-hydrogen_en">https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen/ipceis-hydrogen_en</a>
InvestEU	European Commission	<a href="https://www.eib.org/de/products/mandates-partnerships/investeu/index.htm">https://www.eib.org/de/products/mandates-partnerships/investeu/index.htm</a>
Horizon Europe Framework Programme (abgeschlossen)	European Commission	<a href="https://cinea.ec.europa.eu/programmes/horizon-europe_en">https://cinea.ec.europa.eu/programmes/horizon-europe_en</a>
Innovation Fund Large Scale Projects	European Commission	<a href="https://cinea.ec.europa.eu/funding-opportunities/calls-proposals/innovation-fund-third-large-scale-call-projects_en">https://cinea.ec.europa.eu/funding-opportunities/calls-proposals/innovation-fund-third-large-scale-call-projects_en</a>
KDT JU Key Digital Technologies Joint Undertaking	European Commission	<a href="https://www.kdt-ju.europa.eu/current-call">https://www.kdt-ju.europa.eu/current-call</a>
Circular bio-based Europe – Joint Undertaking	European Commission	<a href="https://www.cbe.europa.eu/open-calls-proposals">https://www.cbe.europa.eu/open-calls-proposals</a>
Clean Aviation – CAJU	European Commission	<a href="https://www.clean-aviation.eu/clean-aviation/participation/calls-for-proposals">https://www.clean-aviation.eu/clean-aviation/participation/calls-for-proposals</a>