

Wasserstoff-Anwendungen im Seehafen Emden

WAS_h₂Emden

Ergebnisse der Potenzialanalyse

Innovative und umweltfreundliche Wasserstoffanwendungen im Seehafen Emden



Gefördert durch:



IHATEC
Innovative
Hafentechnologien



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber:

Projektkonsortium des Projektes WASH2Emden

Autoren:

Sören Berg, MARIKO GmbH

Marcel Frerichs, abh INGENIEUR-TECHNIK GmbH

Manuel Gigli, Tyczka GmbH

Dr. Andreas Hänel, DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

Dr. Matthäus Wuczkowski, Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG

Im Rahmen des Projektes:

Wasserstoff-Anwendungen im Seehafen Emden

WASH₂Emden

Gefördert durch:



IHATEC
Innovative
Hafentechnologien



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt:

Niedersachsen
Ports

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG

Dr. Matthäus Wuczkowski

Tel.: +49 (0) 441 35020 - 613

E-Mail: mwuczkowski@nports.de

Hindenburgstraße 26 - 30

26122 Oldenburg

www.nports.de

 **MARIKO**

MARIKO GmbH

Sören Berg

Tel.: +49 (0) 491 926 - 1147

E-Mail: soeren.berg@mariko-leer.de

Bergmannstraße 36

26789 Leer

www.mariko-leer.de

Vorwort



**TIM KRUTHOFF,
OBERBÜRGERMEISTER STADT EMDEN**

Nachhaltige Energieerzeugung, Ressourceneffizienz und CO₂-Minimierung sind schon lange keine Themen mehr, mit denen sich nur Wissenschaftler oder Spezialisten auseinandersetzen.

Diese Herausforderungen sind Bestandteil unseres täglichen Lebens geworden und zeigen an, wie notwendig es ist, hier intelligente Lösungen zu finden.

Auch für umweltschonende Schiffsverkehre und für den nachhaltigen Betrieb von Häfen sind innovative Konzepte gefragt. Ein wichtiger Baustein dazu ist Wasserstoff, der

mit vorhandenem Überschusswindstrom erzeugt wird. Für Kurzstreckenverkehre und für Anwendungen im Hafen ist er ein idealer Energieträger.

Das Projekt WASH2Emden befasst sich genau mit dieser Herausforderung. Es werden Lösungen erarbeitet, grünen Wasserstoff in Häfen umweltfreundlich zu nutzen. Dies geschieht exemplarisch im Seehafen Emden.

Hierbei gelingt es, eine Versorgungskette abzubilden, die es bislang in keinem deutschen Seehafen gibt. Sie reicht von der Erzeugung aus Windkraft über die Speicherung der Energie bis zur Abnahme durch die Nutzer.

Die vermehrte Produktion von Wasserstoff an der Küste ist eine Chance für unsere Region, bietet aber auch Potenziale bei einer Einspeisung in das Ferngasnetz. So gebührt allen beteiligten Institutionen und Unternehmen Dank für den Einsatz und die konstruktive und vertrauensvolle Mitarbeit an diesem Projekt.

Ich bin davon überzeugt, dass Wasserstoff als zukunftsweisender Energieträger in der maritimen Wirtschaft weiter zu entwickeln ist und hier in Emden ein wichtiger Beitrag dazu geleistet wird.

A handwritten signature in black ink, which reads "Tim Kruthoff". The signature is stylized and cursive.

Einführung

In den vergangenen 18 Monaten wurden die Möglichkeiten untersucht, in Emden Wasserstoff aus regenerativer Energie zu erzeugen und Nutzern im Hafen zur Verfügung zu stellen. Basis dafür ist eine umfassende Umfrage bei den Unternehmen im Emdener Hafen zum Energiebedarf sämtlicher Geräte, Anlagen und Fahrzeuge.

Die Projektergebnisse zeigen: technisch ist eine Wasserstoffwirtschaft gut und meist problemlos umsetzbar. Die Technologie ist weitestgehend erforscht. Viele Anwendungen sind bereits marktreif oder stehen kurz vor der Markteinführung. Unter den heutigen Rahmenbedingungen macht die Herstellung von grünem Wasserstoff bei Einsatz von konventionellem Netzstrom oder auch netzgebundenem Windstrom unter ökonomischen Gesichtspunkten nur Sinn, wenn man sich durch Ausnahmeregelungen - z.B. durch sehr große Energieverbräuche - von den hohen Umlagen befreien lassen kann. Für die Initiierung einer Wasserstoffwirtschaft müssen die Rahmenbedingungen zu Gunsten CO₂-armer Energieträger noch angepasst werden. Grüner Wasserstoff aus grünem Strom lässt sich schon heute kostengünstig herstellen, wenn Windkraft- oder Photovoltaikanlagen ohne Netzanbindung und damit auch ohne Förderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Betrieb sind und der Strom direkt zur Elektrolyse eingesetzt wird.

Ökologisch gesehen ist Wasserstoff für viele Anwendungen sinnvoll, um CO₂-Emissionen zu reduzieren. Damit ist der Einsatz von Wasserstoff ein wichtiger Baustein der Energie-

wende. Allerdings ist Wasserstoff nicht als Allheilmittel zu sehen, sondern als eine wichtige Ergänzung unterschiedlicher Energieträger sowie Grundstoff für CO₂-arme synthetische Kraftstoffe.

Die wesentlichen Herausforderungen sind nun die Kosten durch Skaleneffekte weiter zu senken und die richtigen politischen Hebel zu betätigen, damit grüner Wasserstoff im Vergleich zu fossilen Energieträgern auch wirklich wettbewerbsfähig wird.

Die vorliegende Broschüre zeigt einen Einblick der wichtigsten Projektergebnisse. Weitere und vertiefte Informationen sind dem Abschlussbericht zu entnehmen, der nach Projektende veröffentlicht wird.

An dieser Stelle möchten wir uns bedanken. Unser Dank gilt allen Wegbegleitern im Projekt aus Emden und darüber hinaus. Insbesondere den Hafenunternehmen, den Energieversorgern, den Windkraftanlagenbetreibern, der Stadt Emden und den Behörden und allen, die das Projekt mit der Zurverfügungstellung von Datenmaterial, inhaltlich und konstruktiv unterstützt haben. Unser besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie dem Projektträger TÜV Rheinland, die das Vorhaben finanziell unterstützt haben.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre und freuen uns über Ihr Feedback!

Das WASH2Emden-Projektkonsortium

Steckbrief: Seehafen Emden

Der Seehafen Emden ist der westlichste deutsche Nordseehafen. Er liegt am Nordufer der Ems und besteht aus dem Binnenhafen, dem Außenhafen und den Hafenerweiterungen im Bereich vor dem Larrelter Polder.

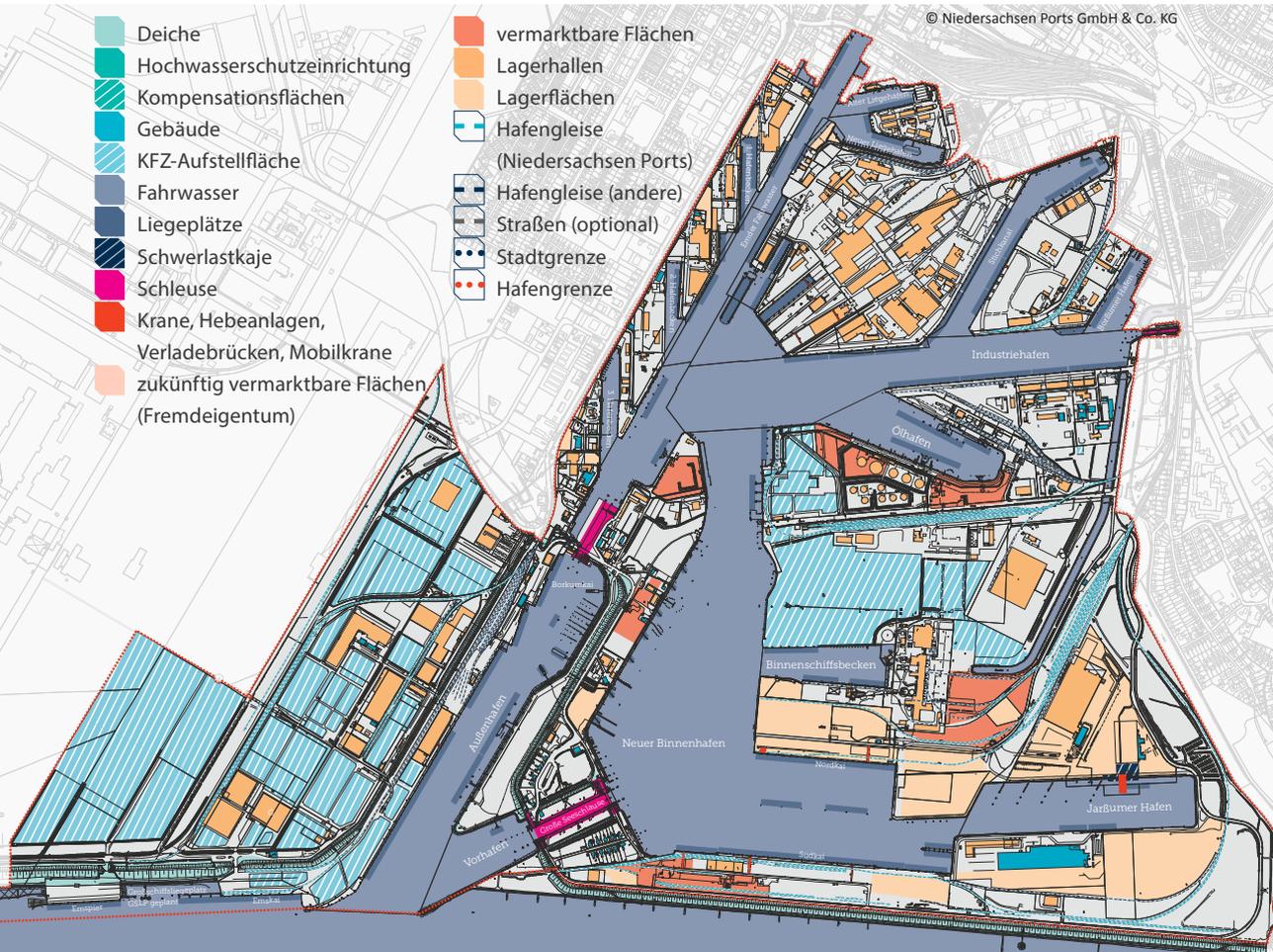
Emden ist ein leistungsstarker Universalhafen, der insbesondere im Roll-on/Roll-off-Umschlag eine führende Position in Europa einnimmt. Neben neuen Kraftfahrzeugen sind Forstprodukte, Flüssiggüter und Windkraftanlagen von großer Bedeutung. Außerdem werden von Emden aus die ganzjährig verkehrenden Schiffslinien für Passagiere und Fracht zur Nordseeinsel Borkum betrieben.

Tideabhängig können Schiffe mit einem Tiefgang von bis zu 10,70 m den Emdener Hafen

anlaufen. Der tidefreie Binnenhafen ist über zwei Schleusen erreichbar.

Ein großer Vorteil des Hafens sind seine enormen Flächenreserven. So stehen im Bereich der tidefreien Hafenanlagen und auf dem Wybelsumer Polder attraktive Ansiedlungsflächen zur Verfügung.

Nicht nur die Nähe zu Windkraftanlagen, die teilweise mehr Strom erzeugen, als in der Region verbraucht werden, sprechen für den Emdener Hafen als Wasserstoffstandort. Als Universalhafen und größter Hafenstandort von Niedersachsen Ports verfügt er über eine vielseitige Umschlagsstruktur und erlaubt es unterschiedliche Anwendungsfelder für Wasserstoff zu testen.





Hintergrund

Problemstellung

In Norddeutschland fällt eine große Menge an regenerativem Überschussstrom an, der aufgrund von Netzengpässen nicht genutzt wird. Windkraftanlagen werden in ihrer Leistung reduziert oder abgeschaltet, da der Strom nicht abgenommen werden kann.

Häfen verursachen eine große Menge an CO₂-Emissionen und Luftschadstoffen, die durch eine stärkere Nutzung regenerativer Energien reduziert werden können.

Lösung

Der zur Verfügung stehende Überschusswindstrom wird genutzt, um ihn mittels Elektrolyse in Wasserstoff (H₂) umzuwandeln, so speicherbar und transportierbar zu machen und unterschiedlichen Anwendungen im Hafenumfeld zuzuführen, z.B. Anwendungen für Anlagen, die Wasserstoff direkt nutzen oder solchen, die den rückverstromten Strom nutzen.

Steckbrief: WASH2Emden

Ziele

Emissionsreduktion beim landseitigen Hafenbetrieb und in der Logistik sowie bei den im Hafen liegenden Schiffen

Aufzeigen der technisch sinnvollsten und wirtschaftlichsten Wasserstoffversorgungskette im Emdener Hafen

Zeitraum

Dezember 2018 bis Mai 2020

Projektpartner:

Niedersachsen
Ports

MARIKO

abh

DBI GTI
Gastechnologisches Institut

Tyczko
UNTERNEHMENSGRUPPE

Kooperationspartner:

epas

University of Applied Sciences
HOCHSCHULE
EMDEN·LEER

EMDION
TECHNOLOGIES

Projektfokus

- Bereitstellungsoptionen von „grünem“ Wasserstoff
- Wasserstoffinfrastruktur und -speicherung
- Potenzielle Wasserstoffverwertung
- Rahmenaspekte für den Wasserstoffeinsatz

Untersuchungsfelder der Potenzial-

Bereitstellung von Wasserstoff

Welche Quellen gibt es, um Wasserstoff im Umfeld von Emden bereitzustellen?

Distribution von Wasserstoff

Welche Transportwege sind möglich und wirtschaftlich, um den Wasserstoff in den Emdener Hafen zu transportieren?

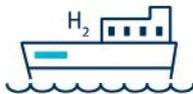


Erneuerbare Energiequelle im Emdener Umfeld: Überschuss Windstrom



Transport mittels Strom

- Transport mittels LOHC-T
- Transport mittels CH₂-Tar
- Transport mittels LH₂-Tar
- Transport mittels Erdgas
- Transport mittels H₂-Pipe



Bezug des regenerativen Wasserstoffs aus dezentralen Quellen



Transport mittels Schiff, S



Erneuerbare Energiequelle im Emdener Hafen



kein Transportweg notwendig

(Erzeugung im Hafen)

R Rückverstromungseinheit

H_2

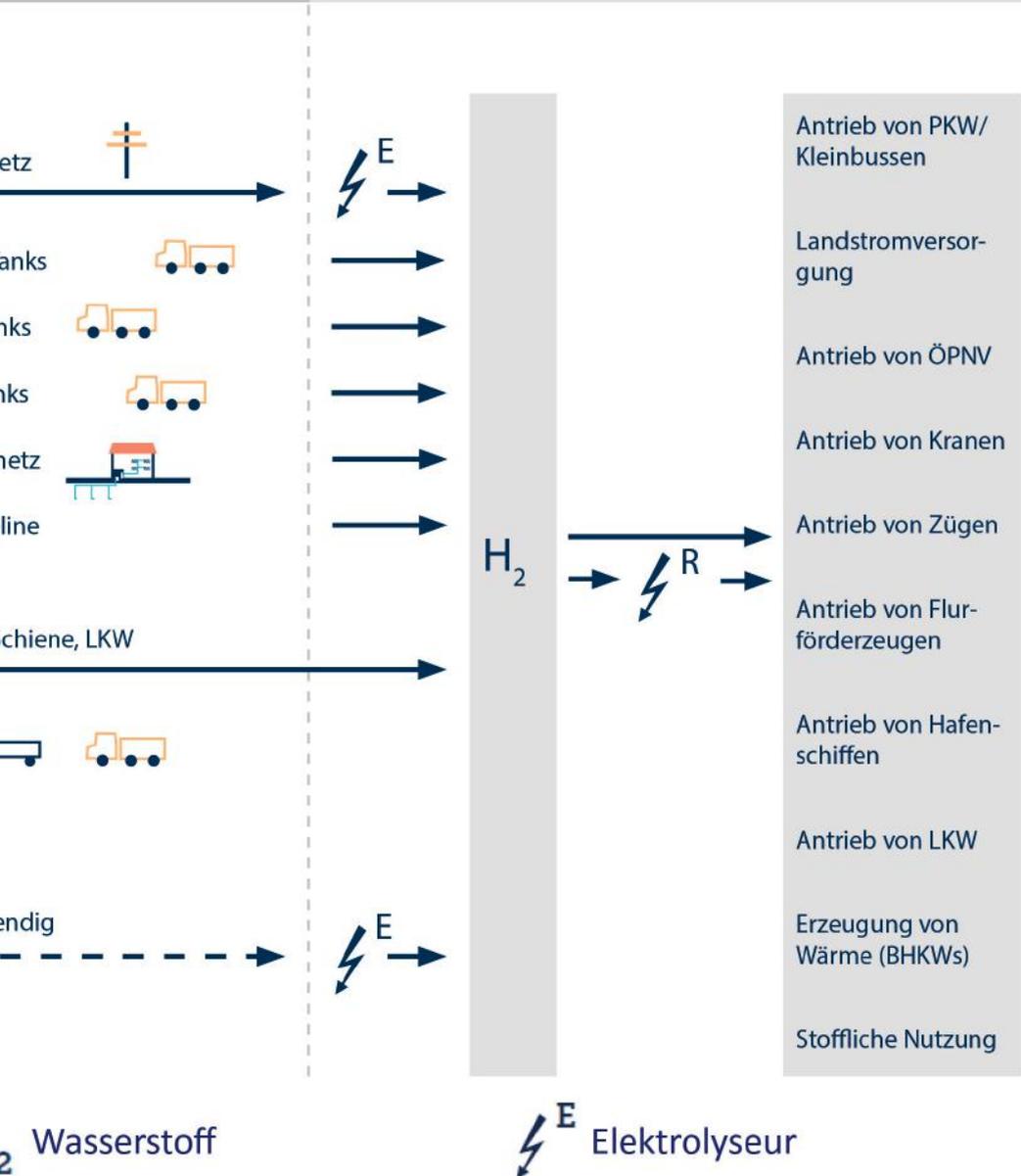
studie im Seehafen Emden

Wasserstoff

Wie hoch ist das Potenzial für die Speicherung und den Einsatz von Wasserstoff im Emdener Hafen und dem hafennahen Umfeld?

Anwendungsfelder im Emdener Hafen

Wie hoch ist das Potenzial für die Speicherung und den Einsatz von Wasserstoff im Emdener Hafen und dem hafennahen Umfeld?





BEREITSTELLUNGSOPTIONEN VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF FÜR DEN SEEHAFEN EMDEN

Im Rahmen des WASH2Emden Projektes wurden verschiedene Szenarien betrachtet, die sich jeweils mit verschiedenen Integrationsmöglichkeiten eines Power-to-Hydrogen-Systems beschäftigen. Zum einen wurde der Betrieb einer Power-to-Hydrogen-Anlage durch den Strombezug aus dem Stromnetz (Strommix mit sehr hohem Anteil regenerativer Energie) des Emdener Hafens analysiert und zum anderen die Stromzufuhr aus Windkraftanlagen. Dies ermöglichte einen weitreichenden Vergleich mehrerer Stromquellen für die örtliche Erzeugung von Wasserstoff im Emdener Hafen. Darüber hinaus wurde der mögliche Wasserstoffimport analysiert.

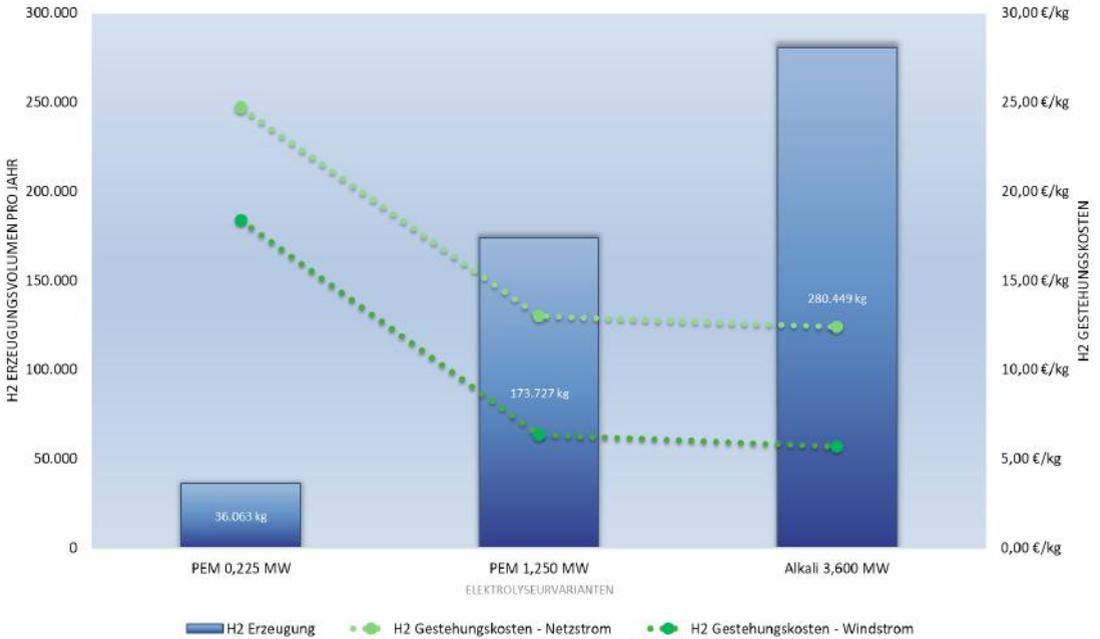
Die Grundidee des Konzeptes Power-to-Hydrogen ist die Umwandlung elektrischer Energie in einen chemischen Energieträger in Form von Wasserstoff. Dabei wird Wasserstoff hergestellt, um diesen beispielsweise zeitversetzt oder direkt verschiedenen Nutzungssektoren zuführen zu können. Die Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom ist die meistdiskutierte Option zur Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff.

Zur Analyse der Nutzungsmöglichkeiten eines Power-to-Hydrogen-Systems im Emdener Hafen wurde im eigenständig aufgebauten Berechnungstool ein Modell erstellt, welches auf Grundlage der benötigten Wasserstoffmenge den Betrieb einer Elektrolyse simuliert. Die eruierten Wasserstoffgestehungskosten dienen dabei als Vergleichswert für die verschiedenen Szenarien der Wasserstoffproduktion.

Der direkte Vergleich der Produktionsmöglichkeiten aus ökonomischer Sicht zeigt, dass bei einer direkten Windstromnutzung im Vergleich zur Netzstromnutzung inklusive aller gesetzlichen Zulagen bis zu 50 % der Kosten eingespart werden können. Ebenfalls lässt sich feststellen, dass eine Degression der Kosten durch die Nutzung eines größeren Elektrolyseurs und einer damit einhergehenden Erhöhung des Produktionsvolumens stattfinden kann.

Das nebenstehende Diagramm (Abb.1) fasst diese Ergebnisse zusammen und gibt darüber hinaus Aufschluss über die Auswirkung der eingesetzten Elektrolyseurgrößen.

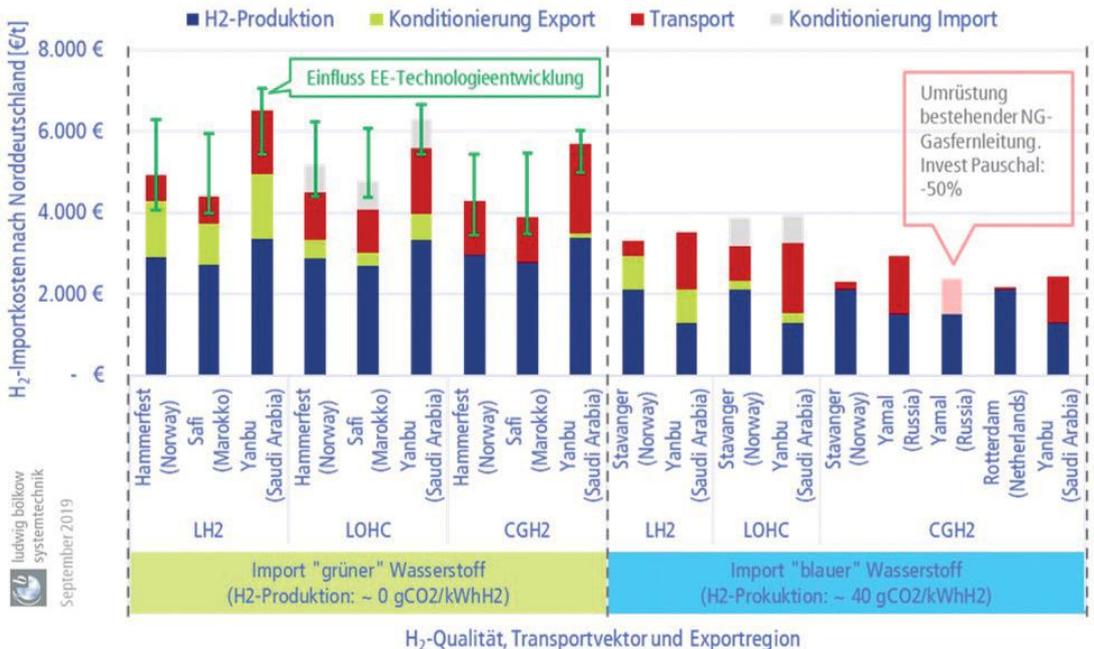
Abb.1: Wasserstoffgestehungskosten und -mengen verschiedener Elektrolyseure



Der Import von grünem Wasserstoff ist bereits bei Preisen zwischen 4 und 6 €/kg möglich, wobei hier insbesondere Marokko durch gute Solar- und Windverhältnisse großes Potenzial hat. Blauer Wasserstoff

dagegen könnte zu einem Preis von 2 bis 4 €/kg von der arabischen Halbinsel oder Russland importiert werden. Hier ist der Transport des Wasserstoffs ein wesentlicher Kostentreiber.

Abb.2: Import von Wasserstoff 2030



ludwig bölkow
systemtechnik
September 2019

H₂-Qualität, Transportvektor und Exportregion

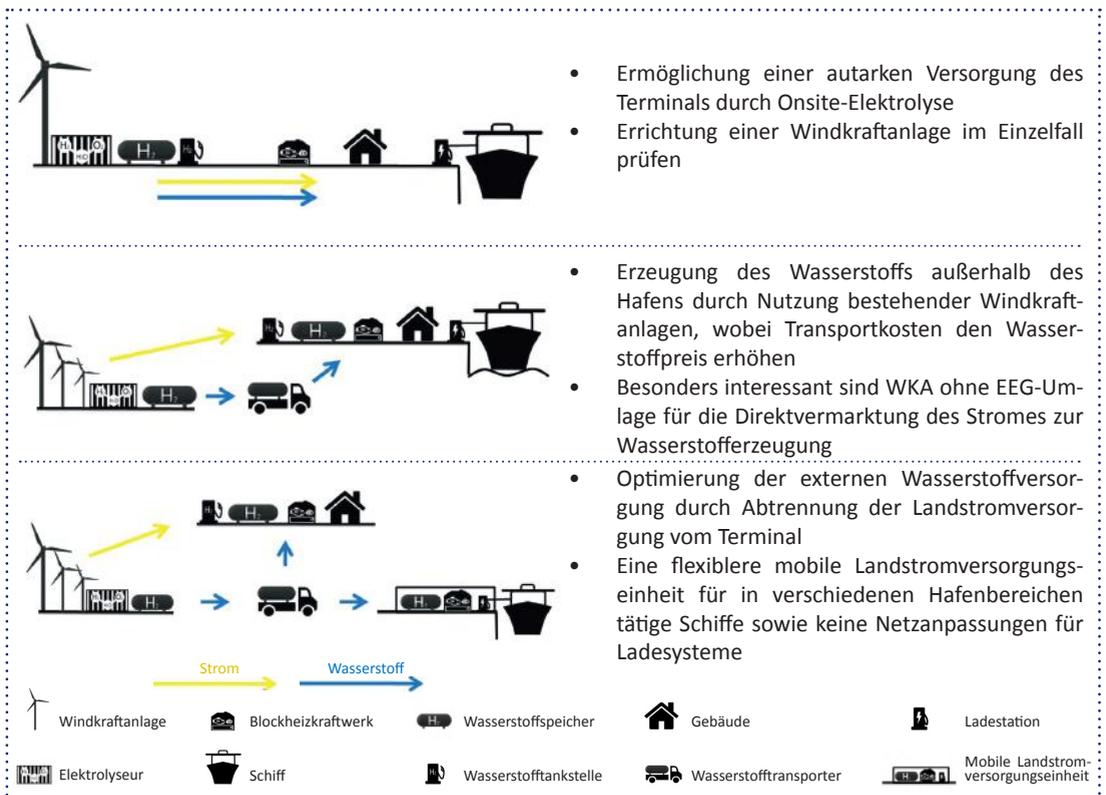
Für das Projekt wurden verschiedene Möglichkeiten der Verteilung von Wasserstoff im Seehafen Emden analysiert. Für die Versorgung der verschiedenen Wasserstoffanwender wie Terminalbetriebe, Schiffe und Fahrzeuge gibt es verschiedene Möglichkeiten, die jeweils ihre Vor- und Nachteile bieten.

Eine davon ist die direkte Erzeugung von Wasserstoff am Terminal, wodurch jeglicher Transport von Wasserstoff für die am Terminal stattfindenden Wasserstoffanwendungen auf ein Minimum reduziert wird, jedoch ein größerer Platzbedarf aufgrund der Onsite-Wasserstoffproduktion bestehen würde. Die Onsite-Produktion bedarf eines umfangreichen Genehmigungsverfahrens. Anfragen bei den entsprechenden Ämtern mündeten in der Aussage, dass die Errichtung einer Windkraftanlage im Hafen nicht genehmigungsfähig ist. Die Netznutzung zur Wasserstoffproduktion im Hafen führt

aufgrund der derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen, Steuern, Abgaben und Umlagen, zu den in der Studie ermittelten Kraftstoffkosten. Diese würden gemäß der Auswertung der durchgeführten Umfrage bei den im Hafen ansässigen Unternehmen nicht akzeptiert werden. Aufgrund der möglichen Abnehmerstruktur im Emdener Hafen bietet sich die Versorgung mit Druckwasserstoff an, wobei das Druckniveau in den Speicherbehältern mit zunehmendem Bedarf an Wasserstoff steigen wird.

Eine andere Möglichkeit der Distribution wäre eine Versorgung per LKW von einer außerhalb gelegenen Erzeugung, was Lager- und Transportkosten mit sich brächte. Eine mobile Landstromversorgung zur flexiblen und terminalunabhängigen Stromversorgung von Schiffen wurde ebenfalls betrachtet (siehe Abb. 3).

Abb. 3: Möglichkeiten der Wasserstoffdistribution



WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR UND -SPEICHERUNG IM SEEHAFEN EMDEN

Im Hinblick auf die unterschiedlichen Verteilungskonzepte wurden verschiedene Speichermöglichkeiten des Wasserstoffs betrachtet (siehe Tab. 1). Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff ist hinsichtlich der hohen Energiedichte die attraktivste Form der Speicherung, jedoch aufgrund der projektbedingten Größenordnungen wenig sinnvoll, da Verflüssigungsanlagen nur in bestimmten Größenordnungen wirtschaftlich sind. Für die Verflüssigung von Wasserstoff wird verflüssigter Stickstoff zur Vorkühlung des gasförmigen Wasserstoffs benötigt. Existiert eine Stickstoffquelle, ist der Betrieb einer Wasserstoffverflüssigungsanlage, nach Angaben von Linde Kryotechnik AG, wirtschaftlich ab einem Bedarf von 5 t/d möglich, ohne Stickstoffquelle ab ca. 15 t/d.

Die Speicherung von Wasserstoff in LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) ist aufgrund der leichten Handhabung und Speicherdichte ebenfalls eine interessante Variante, nur bringt die Entnahme des Wasserstoffs aus solch einem Speichermedium

einen hohen Energieaufwand mit sich. Die Dehydrierung ist eine endotherme Reaktion, die bei ca. 300 °C abläuft und mit einem Energieaufwand von ca. 12 kWh/kg Wasserstoff verbunden ist. Diese Energie kann durch thermische Verwertung eines Teils des gespeicherten Wasserstoffs bereitgestellt werden, entsprechend ca. 1/3 der dehydrierten Wasserstoffmasse. Bei Vorhandensein einer Hochtemperaturwärmequelle kann ggf. die erforderliche Wärmemenge ausgekoppelt und zur Reduzierung des Wasserstoffesinsatzes genutzt werden. Als weitere Alternative kann für den Dehydrierungsprozess eine elektrische Heizung eingesetzt werden.

Eine Speicherung in Druckbehältern ist gerade bei kleineren Anwendungen und einem flexiblen Einsatz sinnvoll. Alle Speichertechniken sind in containerisierten Systemen erhältlich, die eine leichte Erweiterung von Speicherkapazitäten und einen standardisierten Transport ermöglichen (siehe Abb. 4).

Tab. 1: Bewertung unterschiedlicher Speichermedien

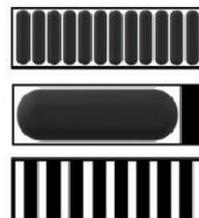
| | Volumetrische Energiedichte | Speicherkosten | Platzbedarf | Energieverlust |
|---------------|-----------------------------|----------------|-------------|----------------|
| LOHC | 1.899,81 kWh/m ³ | € | □□ | △△△ |
| LH2 | 2.359,76 kWh/m ³ | € € | □ | △△ |
| CH2 (500 bar) | 1.479,33 kWh/m ³ | € € € | □□□ | △ |

Abb. 4: Wasserstoffspeicherarten in verschiedenen Größen

Ein 40' Container mit Druckwasserstoff bei 500 bar in Kompositbehältern speichert eine Energiemenge von ca. 34.000 kWh.

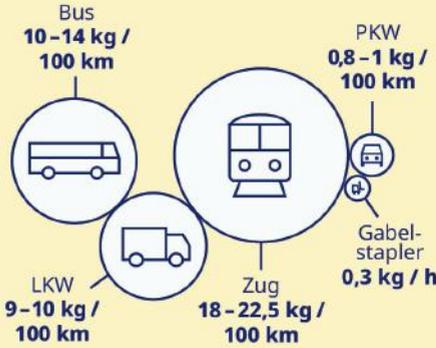
Ein 40' Container Flüssiggastank speichert mit 41.600 l LH2 Energiemenge von ca. 98.000 kWh.

In einem Öltank, der Größe eines 40' Containers lässt sich in ca. 68 m³ LOHC eine Energiemenge von ca. 130.000 kWh speichern.



Zahlen, Daten und Fakten

Verbrauch wasserstoffbetriebener Fahrzeuge



H₂-Erzeugung – theoretisches Potenzial heute + morgen

Stadt Emden



(H₂-Potenzial = Ausfallarbeit + Rückspeisung ins Hochspannungsnetz)

Erneuerbare Stromquellen

Emden & Umgebung, Leistung 2018



Mit 49 GWh könnte man theoretisch ...



854 t ... Wasserstoff produzieren.

6.700 ... Brennstoffzellenfahrzeuge 1 Jahr lang betanken.

Fläche des Emdener Hafens

1.164 ha

davon:

963 ha Land

201 ha Wasser

des Projektes WASH2Emden



1.469

Gabelstapler / Kräne /
Flurförderzeuge



285

Nutzfahrzeuge



277

PKW / Busse

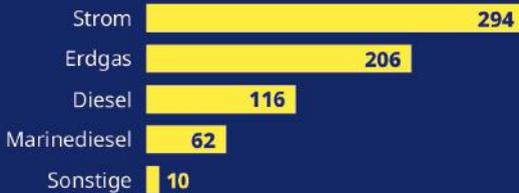


51

Schiffe

... waren
2019 im
Emder Hafen
dauerhaft
tätig.

Energieverbrauch im Emder Hafen 2019 (in GWh)



Im Emder Hafen entstanden 2019 ...



davon ~ **40 %**
bei Geräten,
Anlagen und
Fahrzeugen

davon ~ **9 %** bei
Umschlaggeräten
und Fahrzeugen,
die derzeit mit fossilen
Kraftstoffen betrie-
ben werden

*(Scope 1 + 2 CO₂-Emissionen
nach GHG-Protocol)*

Bisherige Fördermöglichkeiten der NOW GmbH



bis zu **40 %**

der Mehrinvestitionskosten
für Brennstoffzellen-PKW
oder Flurförderzeuge



50 %

der Investitionsausgaben
für öffentlich zugängliche
Wasserstofftankstellen

Einsparung bei 100 %
Umrüstung aller
fossil betriebener
Straßenfahrzeuge
+ Umschlaggeräte

10.500
t CO₂

Wasserstoff-Preis

Pro kg • bei alkalischem Elektrolyseur (3,6 MW)

grauer
Wasserstoff
(Netzstrom)

H₂ **12,40 €**

(5,70 € preisoptimiert)*

grüner
Wasserstoff
(Windenergie)

H₂ **12,30 €**

(5,60 € preisoptimiert)*

**Reduzierung des Strompreises durch Ausnahmen + Sonderregelungen*



Monatliche Betriebskosten für eine
kleine Gabelstapler-Tankstelle

3.000 – 6.000 €

(Investition Tankstelle: ab 0,5 Mio €)



POTENZIELLE WASSERSTOFFNUTZUNG IM SEEHAFEN EMDEN UND DARÜBER HINAUS

Durch eine umfassende Befragung der Hafenakteure und die Auswertung der umfangreichen Datenbank des Projektpartners DBI konnten für den Seehafen Emden und dessen Umgebung potentielle Wasserstoffanwender und -absatzmengen ermittelt werden. Die Analyse stützt sich dabei auf Daten zur Anzahl, Betriebsdauer pro Tag, Treibstoffbedarf und Alter von Geräten, Anlagen und Fahrzeugen (GAF). Eine Übersicht zum aktuellen Bedarf an

fossilen Energieträgern im Hafen und der Stadt Emden ist in folgender Tabelle gegeben.

Für die Ermittlung der potenziell benötigten Wasserstoffmengen wurden mehrere Szenarien jeweils für den Hafen und die Stadt entwickelt. Aufgrund des geringen Entwicklungsstandes von Wasserstoffschiffsantrieben wurden Schiffe in die Entwicklung der Szenarien nicht einbezogen. Weiterhin gilt zu bedenken, dass batteriebetriebene

Tab. 2: Jährlicher Bedarf an fossilen Energieträgern für den Seehafen und der Stadt Emden (2019)

| Energieträger | Seehafen [GWh/a] | Stadt Emden [GWh/a] |
|-----------------------------------|------------------|---------------------|
| Erdgas | 206 | 404 |
| Marinedieselloil | 63 | |
| Diesel & synthetische Kraftstoffe | 116 | |
| LNG | 10 | 300 |
| LPG | 0,4 | |
| Benzin | 0,1 | |
| Summe | 395,5 | 704 |

Fahrzeuge in direkter Konkurrenz zu Wasserstofffahrzeugen stehen, wobei davon ausgegangen wurde, dass sich alle batteriebetriebenen Fahrzeuge (Flurförderfahrzeuge) nur im Hafen befinden. Aus diesem Grund betrachtet das Minimalszenario den Wasserstoffbedarf bei einer 30 % Umstellung aller bis dato fossil betriebenen PKWs und Flurförderfahrzeuge auf kommerzielle verfügbare Wasserstoffbrennstoffzellenlösungen. Das Maximalszenario geht hingegen von einer Umstellung aller GAFs aus, wobei kommerziell verfügbare GAFs mit Brennstoffzelle und die restlichen GAFs mit Wasserstoffverbrennungsmotor ausgestattet werden (siehe dazu auch Tabelle 3). Für den Seehafen wurden die Wasserstoffmengen für die GAFs, welche in der Befragung identifiziert wurden, ermittelt. Für die Stadt Emden wurden Daten

zu industriellen, gewerblichen und kommunalen Betrieben ausgewertet. Dabei konnten weitere Wasserstoffabnehmer wie Züge und BHKWs identifiziert werden. Die folgende Abbildung zeigt das Gesamtpotenzial (100 %) für Wasserstoff im Hafen und in der Stadt und eine potenzielle Verteilung des Wasserstoffbedarfs im Stadtgebiet.

Wasserstoffanwendungen mit durchschnittlichen Verbräuchen:

| | |
|---------------|------------------|
| PKW: | 0,8-1 kg/100km |
| LKW: | 9-10 kg/100km |
| Bus: | 10-14 kg/100km |
| Zug: | 18-22,5 kg/100km |
| Gabelstapler: | 0,3 kg/h |

Abb. 5: Jährlicher Wasserstoffbedarf für das Maximalszenario



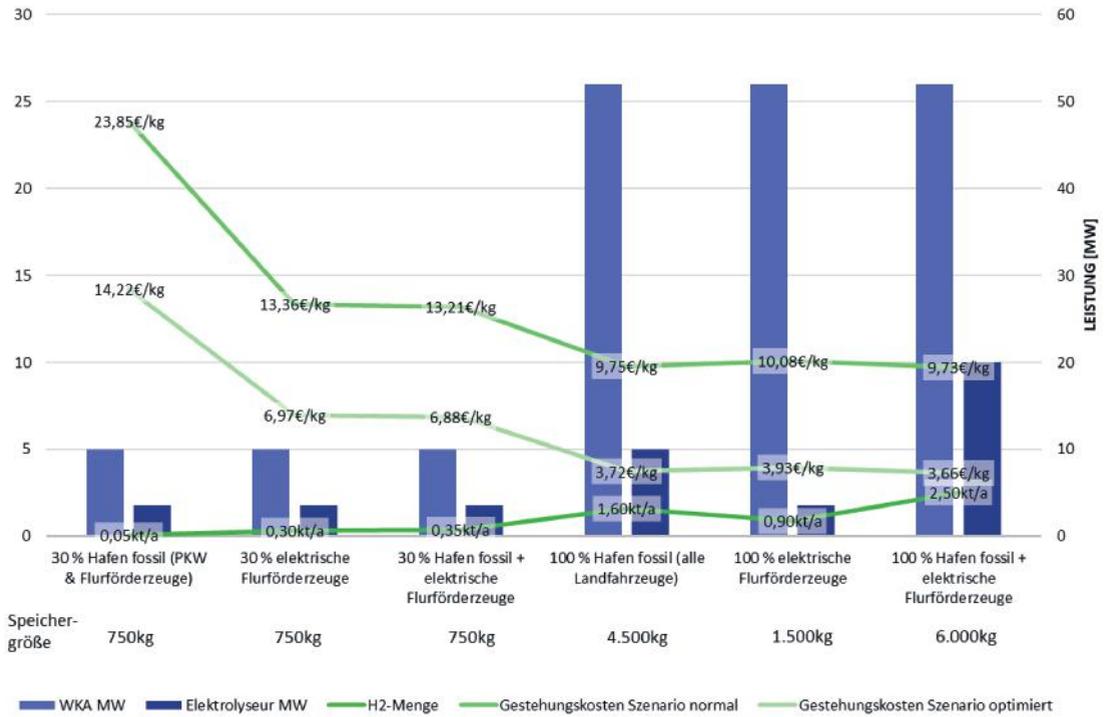
Für das Minimalszenario, bei einer 30 % Umstellung von fossil betriebenen PKWs und Flurförderfahrzeugen, ergibt sich ein Wasserstoffbedarf für den Hafen von 1,5 GWh/a (0,05 kt/a) und für die Stadt Emden von 56,9 GWh/a (1,7 kt/a). Die zusätzliche Umstellung von 394 batteriebetriebenen Flurförderfahrzeugen benötigt 8,9 GWh/a (0,3 kt/a). Im Maximalszenario ergibt sich für die Umstellung aller fossil betriebenen GAFs ein Wasserstoffbedarf im Hafen von 52,2 GWh/a (1,6 kt/a) und für die Stadt Emden von 311,8 GWh/a (9,4 kt/a). Für die Umstellung aller batteriebetriebenen Flurförderfahrzeuge würden zusätzlich 29,7 GWh/a (0,9 kt/a) Wasserstoff benötigt. Möchte man vorerst nur den Hafen mit diesen Wasserstoffmengen versorgen, wäre eine entsprechende Infrastruktur notwendig (siehe Abb. 6). Die Wasserstoffgestehungskosten wurden mit dem bereits genann-

ten Berechnungstool errechnet, wobei hier einzig Windstrom einbezogen wurde.

Interessant für eine Wasserstoffumstellung sind somit Züge, BHKWs, Busse, Gabelstapler, PKWs, Kleintransporter und LKWs. Besonders Züge (~300 kg/d), BHKWs (~50-1.000 kg/d), Busse (~40 kg/d) und LKWs (~30-40 kg/d) eignen sich als Startanwendungen für die Initiierung einer Wasserstoffwirtschaft, da diese regelmäßig mit größeren Wasserstoffmengen versorgt werden müssen. Weiterhin eignen sich PKWs und Flurförderfahrzeuge, aufgrund der Anzahl, dem Alter (im Emdener Hafen: PKW Ø 4 Jahre und Flurförderfahrzeuge Ø 5,5 Jahre) und der marktreifen Technologie, für eine Umstellung. Anschließend können weitere Geräte wie Kleintransporter und Zugmaschinen auf Wasserstoffantriebe umgestellt werden.



Abb. 6: Wasserstoffgestehungskosten und benötigte Leistungen der beiden Szenarien



Tab. 3: Wasserstoffbedarf für 30 % und 100 % Umstellung aller GAFs im Emdor Hafen

| Geräte / Anlagen / Fahrzeuge | 30% Umstellung | | | Vollständige Umstellung | | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | Anzahl [-] | H2-Bedarf [MWh/a] | | Anzahl [-] | H2-Bedarf [MWh/a] | |
| | | Brennstoffzelle | H ₂ -Verbrennungsmotor | | Brennstoffzelle | H ₂ -Verbrennungsmotor |
| Flurförderfahrzeuge (elektrisch) | 394 | 8.921* | - | 1.310 | 29.710** | - |
| Flurförderfahrzeuge (fossil) | 33 | 404* | - | 98 | 1.232** | - |
| PKW | 58 | 1.135* | - | 185 | 3.654** | - |
| Zugmaschine | 24 | 3.562 | 8.906 | 82 | 11.860 | 29.650** |
| LKW | 20 | 605 | 1.513 | 66 | 1.903 | 4.759** |
| Transporter | 25 | 884 | 2.210 | 88 | 2.829 | 7.073** |
| Reachstacker | 2 | 91 | 227 | 9 | 281 | 702** |
| Minibagger | 2 | 0,5 | 1 | 5 | 1 | 3** |
| Bagger | 1 | 44 | 18 | 5 | 77 | 192** |
| Traktor | 9 | 61 | 154 | 28 | 191 | 478** |
| Radlader | 1 | 24 | 59 | 5 | 321 | 803** |
| Hubsteiger | 0 | - | - | 1 | 12 | 29** |
| SMTF | 0 | - | - | 1 | 847 | 2.117** |
| Kleinbus | 23 | 171 | 427 | 80 | 602 | 1.504** |

* Min.-Szenario
 ** Max.-Szenario



© MARIKO GmbH

Der Einsatz von Wasserstoff unterliegt rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich der Zulassung und Nutzung von Wasserstoff-erzeugungsanlagen, aber auch Maßnahmen wie die Schulung von Mitarbeitern sind zu beachten.

Gerade die Nutzung von Strom zur Erzeugung von Wasserstoff birgt angesichts der verschiedenen Gesetze im Energierecht einige Hürden. Elektrolyseure gelten als Letztverbraucher von Strom und müssen damit regulär sämtliche Netzentgelte zahlen, sodass Wasserstoff laut berechneter Szenarien im Projekt zu einem Preis von

12,5 €/kg aus Netzstrom erzeugt werden kann. Über Ausnahmeregelungen ist es möglich, die Netzentgelte zu reduzieren, woraus sich ein optimierter Wasserstoffpreis von 5,85 €/kg ergibt. Die Politik ist bereits von der Industrie dazu aufgefordert worden, an diesen Rahmenbedingungen zu arbeiten.

Grundsätzlich ist jegliches Personal im Umgang mit Wasserstoff zu schulen und auf die besonderen Gefahren hinzuweisen. Darüber hinaus sind die Besonderheiten im Explosionsschutz und die Besonderheiten der jeweiligen Wasserstoffanwendung, sei es Elektrolyse oder Speicherung, zu vermitteln.

RAHMENASPEKTE FÜR DEN WASSERSTOFFEINSATZ IM SEEHAFEN EMDEN

Für die Errichtung einer Wasserstoffversorgungskette im Emdener Hafen sind unterschiedliche Genehmigungsverfahren von der Bereitstellung bis hin zu Distribution von Wasserstoff notwendig. Die wichtigsten Erkenntnisse dazu können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Errichtung einer Windkraftanlage

Genehmigungsgrundlage für die Errichtung von Windkraftanlagen im Hafen bzw. Hafenumfeld sind im Wesentlichen die NBauO (Niedersächsische Bauordnung) und für Anlagen mit einer Höhe von > 50 m das BImSchG.

Errichtung eines Elektrolyseurs

Elektrolyseure sowie vorgesehene Anlagenteile und Verfahrensschritte sind nach der 4. BImSchV grundsätzlich genehmigungspflichtig. Das Genehmigungsverfahren wird nach dem BImSchG durchgeführt.

Speicherung von Wasserstoff

Ab einer Lagerkapazität von 30 t bedarf es eines Genehmigungsverfahrens nach BImSchG mit Öffentlichkeitsbeteiligung; bei geringerer Lagerkapazität ist ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren nach BImSchG durchzuführen.

Errichtung einer Tankstelle

Für die Errichtung kleiner Wasserstofftankstellen mit einer Lagerkapazität < 3 t bedarf es einer Zulassung nach der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) in Verbindung mit einer Baugenehmigung; Größere Wasserstofftankstellen bedürfen einer Genehmigung gemäß BImSchG.

Hafenbestimmungen

Aus der niedersächsischen Hafenordnung (NHafenO) ergeben sich für die derzeit avisierte Ausgestaltung der Wasserstoffversorgungskette keine Besonderheiten. Für die einzelnen Komponenten der Bereitstellung, Distribution und Anwendung des Wasserstoffes ist aber das niedersächsische Hafensicherheitsgesetz (NHafenSG) von Relevanz. Die darin enthaltenen Vorgaben zur Risikobewertung, Ausführung und Umsetzung von Sicherheitsbestimmungen sowie Erstellung eines Gefahrenabwehrplanes sollten im Hinblick auf die Wasserstoffversorgungskette frühzeitig mit der zuständigen Behörde, dem für Häfen zuständigen Ministerium (Fachministerium), abgestimmt werden.

CO₂-MINDERUNG DURCH WASSERSTOFFEINSATZ

Die derzeitigen CO₂-Emissionen im Emdener Hafen ergeben sich aus den eingesetzten Geräten, Anlagen und Fahrzeugen (GAF), dem Stromverbrauch in Gebäuden und Prozessen sowie dem Erdgasverbrauch zur Wärmeerzeugung:

Tab. 4: CO₂-Emissionen im Emdener Hafen

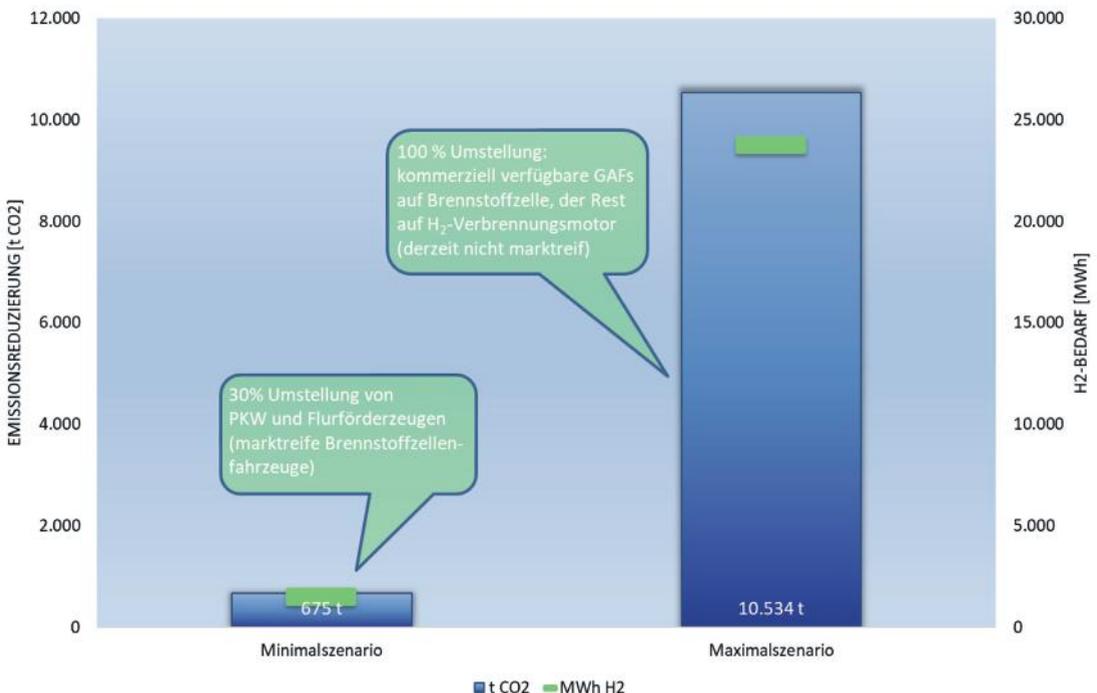
| | |
|---|---------------------------------|
| Alle Fahrzeuge (fossile Kraftstoffe und stromgebunden) | 54.102 t CO₂ |
| Stromnutzung (2019) | 44.412 t CO ₂ |
| Wärmeerzeugung (2019) | 42.057 t CO ₂ |
| Gesamt | 140.571 t CO₂ |

Zu allen Fahrzeugen zählen auch Schiffe und LKW, die im Hafen stationiert sind und sich

im Eigentum im Hafen ansässiger Unternehmen befinden.

Die möglichen CO₂-Emissionsreduktionspotenziale aus den verschiedenen Szenarien sind im Diagramm zu sehen, wo jeweils die möglichen Reduzierungen und entsprechenden Wasserstoffmengen beim Minimal- und Maximalszenario dargestellt sind. Das Minimalszenario ist aufgrund der marktreifen Technologien derzeit das realistischste, erreicht jedoch relativ geringe CO₂-Einsparungen. Das Maximalszenario erzielt dagegen deutlich höhere Einsparungen, ist insbesondere aufgrund der derzeit nicht am Markt verfügbaren wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeuge jedoch nicht zeitnah umzusetzen.

Abb. 7: Emissionsreduzierung vs Wasserstoffbedarf

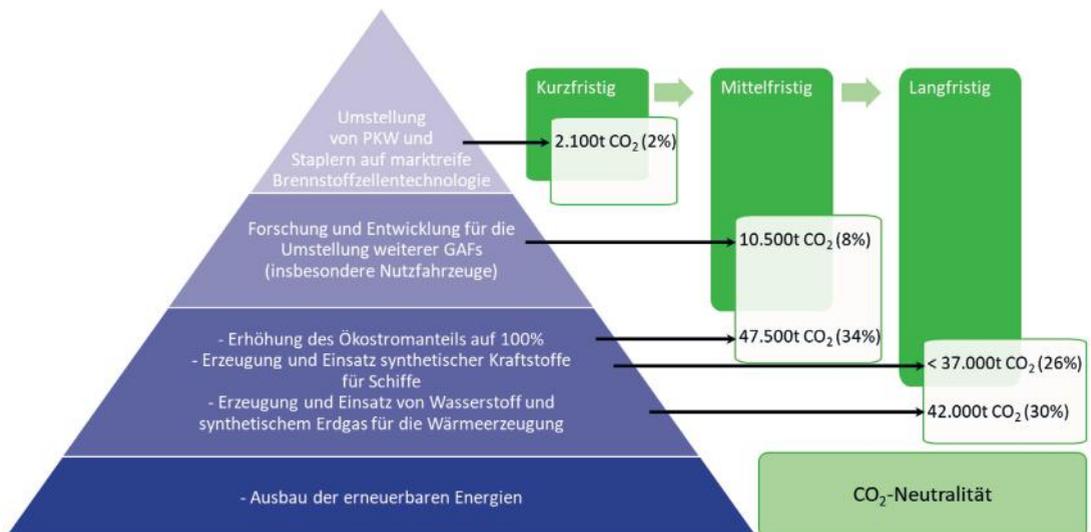




Aus der Abbildung 8 zu weiteren CO₂-Reduktionspotenzialen lässt sich ableiten, welche weiteren Schritte kurz-, mittel- und langfristig notwendig sind, um die CO₂-Neutralität im Emdener Hafen zu erreichen. Hier spielen viele externe Faktoren wie die weitere Forschung und Entwicklung für neue wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, aber auch politische Rahmenbedingungen eine Rolle, um den Ausbau

der erneuerbaren Energien voranzutreiben. Dieser Punkt ist das Fundament der dargestellten Pyramide, da ohne den weiteren und massiven Ausbau erneuerbarer Energien wie Photovoltaik und Windenergie weitere Sektoren wie der Verkehr und die Wärme auch im Emdener Hafen nicht CO₂-neutral werden können.

Abb. 8: CO₂-Reduktionspotentiale und Maßnahmen zur Erreichung der CO₂-Neutralität



Technologieoptionen

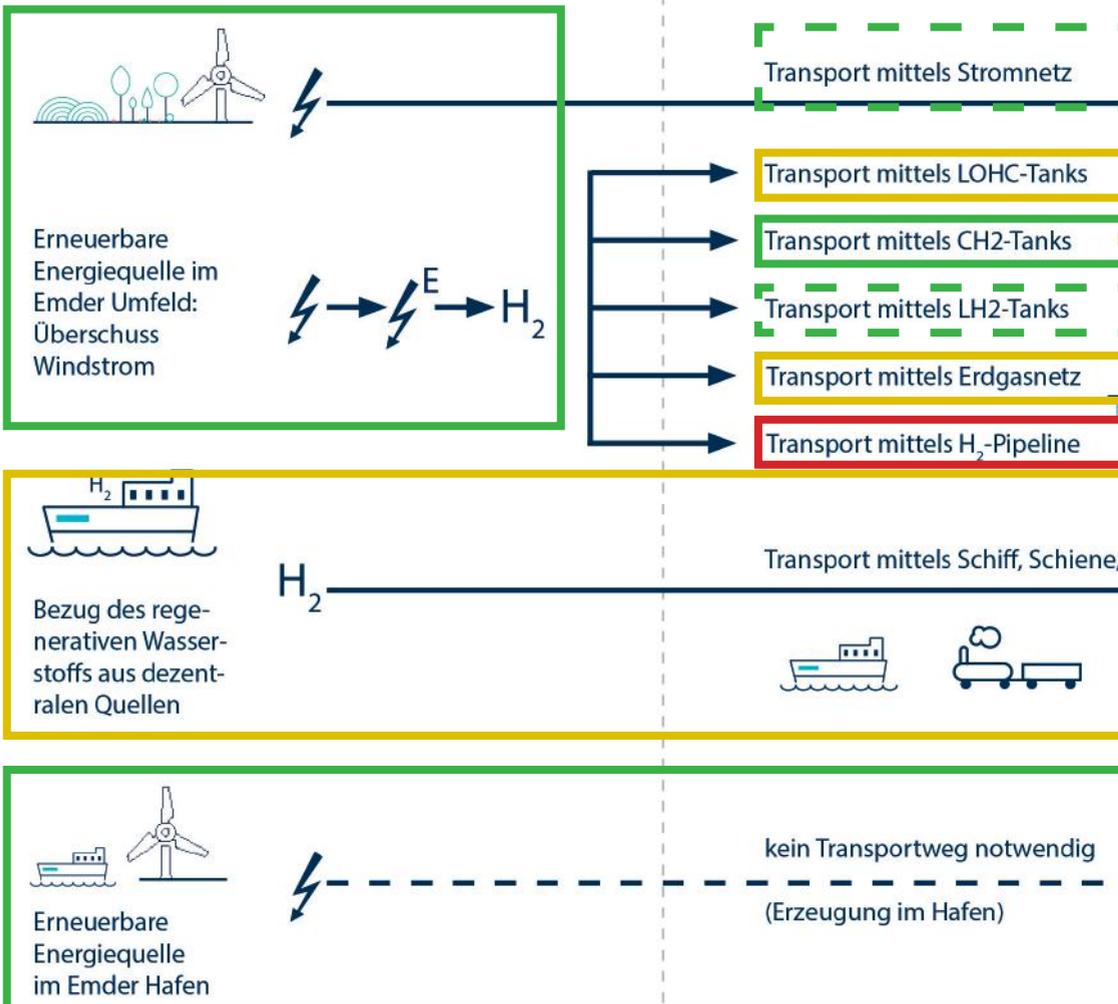
Welche Komponenten einer Wasserstoffversorgungskette

Bereitstellung von Wasserstoff

Welche Quellen gibt es, um Wasserstoff im Umfeld von Emden bereitzustellen?

Distribution von Wasserstoff

Welche Transportwege sind technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll, um den Wasserstoff in den Emdener Hafen zu transportieren?



Marktreif und kurzfristig gut darstellbar

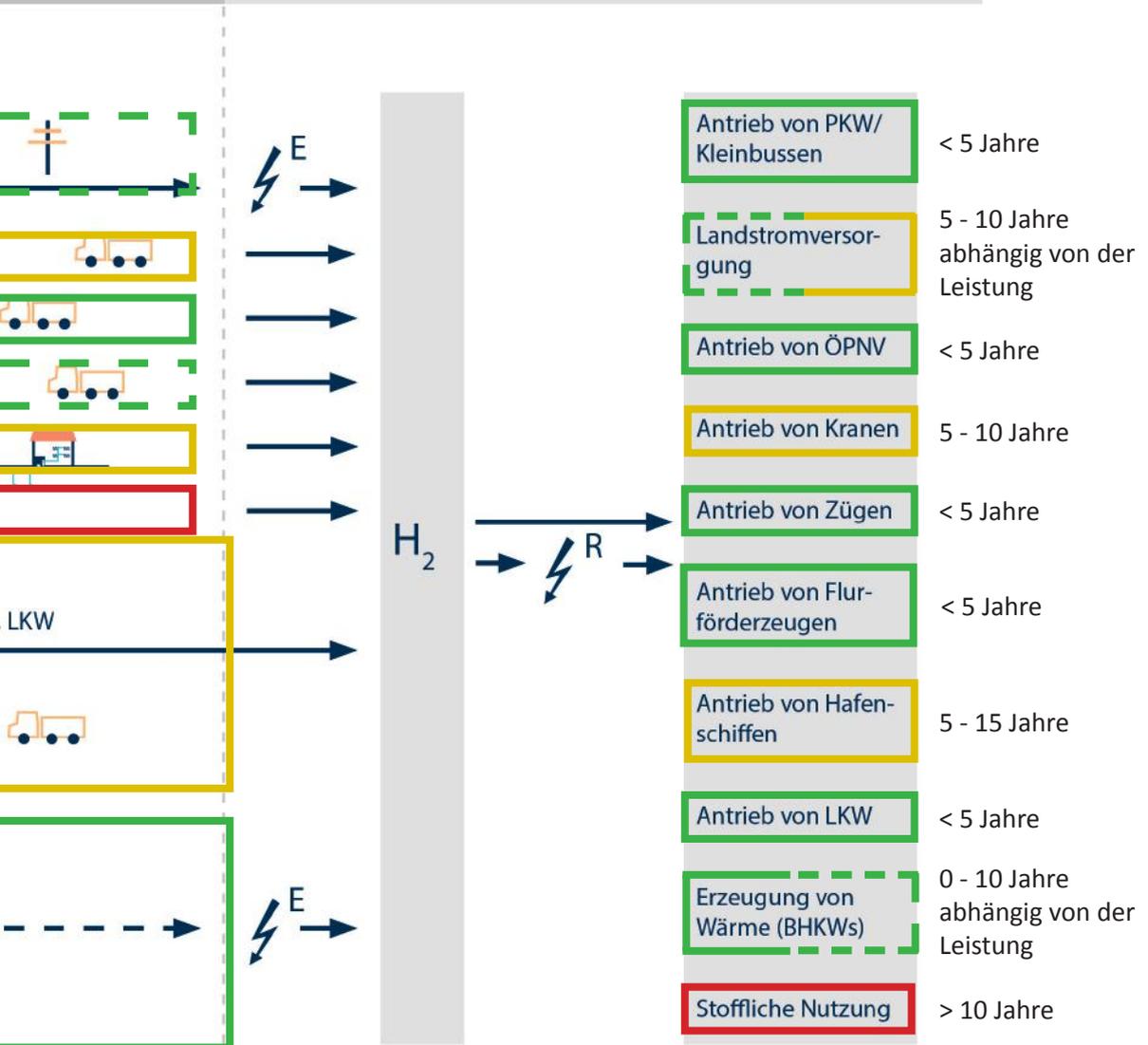
Marktreif und mittelfristig darstellbar

für den Emdener Hafen

sind kurz- und mittelfristig im Emdener Hafen darstellbar?

Anwendungsfelder im Emdener Hafen

Wie hoch ist das Potenzial für die Speicherung und den Einsatz von Wasserstoff im Emdener Hafen und dem hafennahen Umfeld?

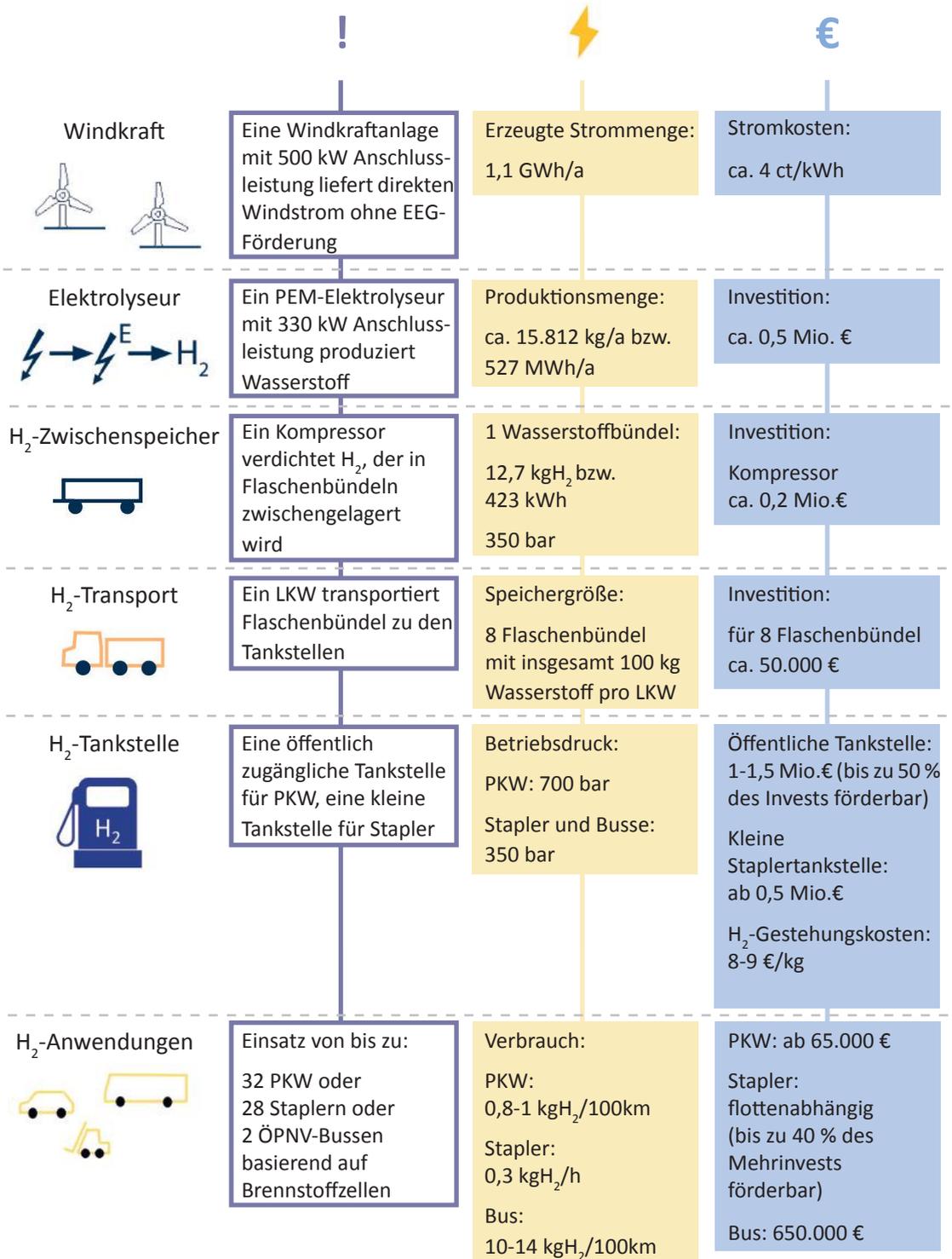


 In Entwicklung und / oder langfristig darstellbar

 Aufgrund der Rahmenbedingungen / der Mengen aktuell nicht darstellbar für Emden

Beispielhafte Wasserstoffkette

Was kann eine 500 kW Windkraftanlage versorgen?



Gut zu wissen: Wasserstoff-Farbenlehre

Je nach Ursprung wird Wasserstoff unterschiedlich bezeichnet – im Sprachgebrauch verwendet man deshalb Farben für das in Wahrheit farblose Gas. Hier ein Überblick:



Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen. In der Regel wird bei der Herstellung Erdgas unter Hitze in Wasserstoff und CO₂ gespalten. Das CO₂ wird anschließend ungenutzt in die Atmosphäre abgegeben und verstärkt so den globalen Treibhauseffekt: Bei der Produktion einer Tonne Wasserstoff entstehen rund 10 Tonnen CO₂.



Blauer Wasserstoff ist grauer Wasserstoff, dessen CO₂ bei der Entstehung jedoch abgeschieden und gespeichert wird (Englisch: Carbon Capture and Storage, CCS). Das bei der Wasserstoffproduktion erzeugte CO₂ gelangt so nicht in die Atmosphäre und die Wasserstoffproduktion kann bilanziell als CO₂-neutral betrachtet werden.



Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt. Unabhängig von der gewählten Elektrolysetechnologie erfolgt die Produktion von Wasserstoff CO₂-frei, da der eingesetzte Strom zu 100 % aus erneuerbaren Quellen stammt und damit CO₂-frei ist.



Türkiser Wasserstoff ist Wasserstoff, der über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt wurde. Anstelle von CO₂ entsteht dabei fester Kohlenstoff. Voraussetzungen für die CO₂-Neutralität des Verfahrens sind die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energiequellen, sowie die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs.

