

- Wasserstoff -

Logistik ist Schlüssel zum Erfolg der Nationalen Wasserstoffstrategie

ISL-Thesenpapier 2020



Inhalt

Executive Summary	1
1 H für Wasserstoff	2
2 Wasserstoff ermöglicht Diversifizierung der Energieerzeugung	3
3 Die nationale Wasserstoff-Strategie erfordert erheblichen Ausbau regenerativer Energien	4
4 Der Weg zur Wasserstoffgesellschaft	6
5 Fazit	11
6 Literatur	13

Executive Summary

Wasserstoff ist in mehrfacher Hinsicht ein vielseitiges Element. Eingesetzt wird er entweder als Rohstoff zum Beispiel bei der Herstellung von Ammoniak und Methanol oder als Energieträger beispielsweise im Transportsektor oder in der Stahlindustrie. Hergestellt werden kann Wasserstoff z. B. durch Dampfreformierung aus fossilen Energieträgern („grauer Wasserstoff“) oder durch die Elektrolyse von Wasser mittels Strom. Wird für die Elektrolyse nur Strom aus regenerativen Energieträgern genutzt, spricht man von „grünem Wasserstoff“. Aufgrund der vielseitigen Einsetzbarkeit ermöglicht der großflächige Einsatz von grünem Wasserstoff die Ausschöpfung sektorübergreifender Dekarbonisierungspotenziale. Derzeit sind allerdings 99 % des weltweit erzeugten Wasserstoffs „grau“, da diese Art der Herstellung die günstigste ist. Um den Anteil grünen Wasserstoffs zu erhöhen, müssen daher sowohl die Erzeugungskapazitäten als auch steuernde politische Rahmenbedingungen, zum Beispiel in Form eines höheren CO₂-Preises, geschaffen werden. Ein erster Schritt in diese Richtung ist die Nationale Wasserstoffstrategie, in der für 2030 ein Wasserstoffbedarf in Höhe von mindestens 90 TWh prognostiziert wird. Um diesen Bedarf zu decken, sollen bis dahin nationale Erzeugungskapazitäten zur Herstellung von 14 TWh grünem Wasserstoff pro Jahr aufgebaut werden. Die entstehende Angebotslücke von 76 TWh soll durch Importe von grünem Wasserstoff gedeckt werden. Zu diesem Zweck werden Energiepartnerschaften mit sonnenreichen Ländern geschlossen, wodurch zwei Problemfelder entstehen, die gelöst werden müssen. Zum einen ist das für die Wasserstoffherstellung benötigte Trinkwasser in diesen Ländern eine begrenzte Ressource, weshalb derzeit die Nutzung von Meerwasser erforscht wird. Zum anderen ist es die Wasserstofflogistik über große Distanzen. Da selbst verflüssigter Wasserstoff noch eine geringe Dichte hat, entsteht ein riesiges Transportvolumen je Energieeinheit: So enthält ein Kubikmeter Rohöl die vierfache Menge an Energie eines Kubikmeters Flüssigwasserstoff. Das bedeutet, dass die Angebotslücke von 76 TWh circa 25.000 Ladungen des derzeit größten verfügbaren Flüssigwasserstofftankers oder etwa 6.000 Ladungen eines Rohöltankers mit demselben Tankvolumen entspricht. Da bei einer langen Seereise immer ein Teil der Ladung verdampft, ist der Transport von reinem Wasserstoff mit einem Schiff derzeit nur über kurze Strecken sinnvoll, um die Verluste gering zu halten. Alternativ können auch Pipelines eingesetzt werden, wenn die geographischen Begebenheiten geeignet sind. Pipelines sind aber vor allem über weite Strecken kostenintensiv. Eine effiziente Lösung für den Transport über weite Seestrecken sind sogenannte E-Fuels. Um diese herzustellen, wird grüner Wasserstoff durch unterschiedliche Prozesse z. B. in synthetisches Rohöl oder in Methanol umgewandelt. Für den Transport von E-Fuels werden herkömmliche Transportmittel eingesetzt, die gleichzeitig mit E-Fuels klimaneutral betrieben werden können. Zwar gehen mit der Nutzung von E-Fuels Umwandlungsverluste einher, allerdings ermöglichen sie eine kurzfristige Umstellung von Logistik und Verkehr auf erneuerbare Energien durch die Nutzung vorhandener Infrastruktur. Eine Möglichkeit, die Umwandlungsverluste im stationären, industriellen Einsatz von Wasserstoff zu reduzieren, ist die lokale Erzeugung von grünem Wasserstoff. Voraussetzung dafür ist ein deutlich größerer Anteil erneuerbarer Energien am Strommix. Im mobilen Einsatz, zum Beispiel bei LKW, wo Batterien aufgrund ihres Gewichts keine einsetzbare Option sind, bietet die Direktnutzung von Wasserstoff mit Brennstoffzellen ein deutlich höheres Entwicklungspotenzial. Durch Brennstoffzellen können langfristig die Umwandlungsverluste bei der Herstellung von E-Fuels vermieden werden. Voraussetzung dafür sind ein höherer technologischer Reifegrad von Brennstoffzellen und ein gut ausgebautes Wasserstofftankstellennetzwerk. Letztendlich werden unterschiedliche Technologien verschiedene Nischen ausfüllen, so dass Batterie- und Brennstoffzellentechnik gleichwertig neben E-Fuels koexistieren werden.

1 H für Wasserstoff

H für Hydrogenium (Wasserstoff) – das am häufigsten im Universum vorkommende Element. H für die Hoffnung – auf das Erreichen der Klimaziele und eine erfolgreiche Energiewende. H für die Herausforderungen – für die Herstellung, den Transport, die Speicherung und die Nutzung von Wasserstoff. H für den hohen Forschungsbedarf – den die im Juni 2020 verabschiedete Nationale Wasserstoffstrategie erfordert.

Wasserstoff kommt auf der Erde nur selten in reiner Form vor und muss deswegen mithilfe unterschiedlicher Verfahren aus organischen Verbindungen gewonnen werden. Die Anwendungsmöglichkeiten für den erzeugten Wasserstoff sind vielfältig. Auf die zwei häufigsten Verwendungsweisen heruntergebrochen wird Wasserstoff als Rohstoff oder als Energieträger genutzt. Aktuell wird der größte Teil des weltweit erzeugten Wasserstoffs als Rohstoff in verschiedenen industriellen Prozessen, zum Beispiel bei der Herstellung von Ammoniak für die Produktion von Düngemitteln, verwendet. Neben der Nutzung als Rohstoff kann Wasserstoff als Energieträger genutzt werden – auch wenn dies aktuell nur ein verschwindend geringer Anteil am gesamten erzeugten Wasserstoff ist. In der Logistik werden Einsatzpotenziale von Wasserstoff und Wasserstoffprodukten als Kraftstoff in der See- und Luftfahrt, aber auch beim Schienentransport und auf der Straße sowohl im Güterbereich als auch bei der Personenbeförderung erprobt und evaluiert. Als Energieträger können Wasserstoff und Wasserstoffprodukte auch stationär in kleinem Maßstab in Wohngebieten oder in großem Maßstab bei Industrieverbrauchern genutzt werden. In beiden Beispielen kann Wasserstoff einen wichtigen Beitrag für die Elektrizitäts- und Wärmeversorgung leisten [1], [2].

Wasserstoff ist also ein Element, das äußerst flexibel in den unterschiedlichsten Szenarien eingesetzt werden kann und teilweise bereits eingesetzt wird. An dieser Stelle kommt ein bedeutender Aspekt ins Spiel: die Gewinnung von Wasserstoff. Zwar wird heute der Großteil des weltweit erzeugten Wasserstoffs fossil erzeugt, es besteht aber die Möglichkeit, sogenannten grünen Wasserstoff durch die Nutzung erneuerbarer Energien und damit CO₂-frei herzustellen. Das heißt, **grüner Wasserstoff ermöglicht es, fossile Energieträger in allen wichtigen Industrien und der Logistik durch eine nachhaltige Alternative zu ersetzen und ist damit die Voraussetzung für eine sektorübergreifende Dekarbonisierung**. Um diese Dekarbonisierungs-Optionen durch Wasserstoff zu nutzen, wurde durch das Bundeskabinett am 10. Juni 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie, ein 38 Maßnahmen umfassendes Reformpaket, verabschiedet. Die Nationale Wasserstoffstrategie soll Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit in Einklang bringen. Mit vergleichbaren Zielen auf europäischer Ebene floss die europäische Wasserstoffstrategie in den sogenannten „Green Deal“ ein. In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird erwartet, dass nur ein kleiner Teil der Wasserstoffnachfrage durch die Produktion im Inland gedeckt werden kann. Ein weiterer Teil des Wasserstoffbedarfs soll aus Energiepartnerschaften mit EU-Mitgliedsstaaten insbesondere Anrainern an Nord- und Ostsee gedeckt werden. Ein großer Teil des Wasserstoffbedarfs soll durch Importe aus Nicht-EU-Staaten gedeckt werden [1], [3], [4].

Die wissenschaftliche Betrachtung von Wasserstoff konzentriert sich derzeit nahezu ausschließlich auf die Optimierung der Erzeugung, Weiterverarbeitung und Nutzung von Wasserstoff. Ohne Zweifel ist dies die wesentliche Grundlage für eine Wasserstoffgesellschaft. Aber selbst mit den effizientesten Herstellungs- und Nutzungsprozessen wird Deutschland auf den Import großer Mengen grünen Wasserstoffs angewiesen sein. Das heißt, große Mengen Wasserstoff werden transportiert, umgeschlagen und gelagert. Um diese Herausforderung sowohl global als auch innerhalb Deutschlands effizient zu bewältigen, werden ganzheitliche logistische Konzepte benötigt, die erarbeitet und verifiziert werden

müssen. Klar ist damit: **Die Untersuchung der Wasserstofflogistik ist Schlüssel zum Erfolg der Nationalen Wasserstoffstrategie.**

2 Wasserstoff ermöglicht Diversifizierung der Energieerzeugung

Entsprechend des Verfahrens, mit dem der Wasserstoff hergestellt wird, wird er differenziert in grauen, blauen und grünen Wasserstoff. Dieser Farbfächer wird bei Bedarf zum Beispiel um gelben, braunen oder türkisen Wasserstoff erweitert. Bei diesen zusätzlichen Herstellungsverfahren handelt es sich in der Regel um hybride Verfahren oder feinere Unterteilungen, die alle den Hauptkategorien zugeordnet werden können [5], [6].

Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Energieträgern wie Erdgas oder Kohle gewonnen. Angewendete Verfahren sind die Dampfreformierung oder die Kohlevergasung. Derzeit werden 99 % der jährlich weltweit erzeugten Menge von circa 74 Mio. Tonnen Wasserstoff aus fossilen Energieträgern gewonnen. Abhängig vom verwendeten Ausgangsrohstoff entstehen dadurch je Tonne grauem Wasserstoff zwischen 10 und 19 Tonnen CO₂, die in die Atmosphäre gelangen – eine katastrophale Bilanz [6, pp. 18, 34, 37], [7].

99 % der jährlich weltweit erzeugten Menge von circa 74 Mio. Tonnen Wasserstoff werden aus fossilen Energieträgern gewonnen.



Wenn während der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern die CO₂-Emissionen durch technische Maßnahmen reduziert werden, wird dieser Wasserstoff als blauer Wasserstoff bezeichnet. Durch unterschiedliche sogenannte *Carbon Capture and Storage (CCS)*-Verfahren können über 90 % des bei der Herstellung anfallenden CO₂ abgeschieden und gespeichert werden. CO₂ kann beispielsweise im Meeresboden gespeichert werden, wobei allerdings stets das Risiko besteht, dass das gespeicherte CO₂ wieder austritt und in die Atmosphäre gelangt. Im Fokus der Forschung stehen derzeit Verfahren zur Einlagerung von CO₂ in Gestein. CO₂ wird bei diesem Verfahren dauerhaft fixiert und das Risiko, dass es in die Atmosphäre gelangt, wird vernachlässigbar minimiert [8]. Für grünen Wasserstoff wird bei der Herstellung vollständig aus regenerativen Energiequellen stammende Energie genutzt. Das gängigste Verfahren ist die Elektrolyse, bei der mit speziellen Maschinen, sogenannten Elektrolyseuren, Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten wird. Während der Produktion entsteht kein CO₂, es wird lediglich Sauerstoff in die Atmosphäre emittiert [6, pp. 34, 39], [7], [9].

Zurzeit werden nur 0,7 % des weltweit erzeugten Wasserstoffs als blauer oder grüner Wasserstoff klassifiziert. Der Grund dafür ist, dass die Produktionskosten für grauen Wasserstoff vor allem aufgrund der fehlenden Bepreisung von CO₂-Emissionen deutlich geringer sind, weshalb er von der Industrie bevorzugt wird. Durch geringere Kosten für Strom aus regenerativen Energien würde der Kostennachteil des grünen Wasserstoffs verringert und die Wettbewerbsfähigkeit ausgebaut. Um die Nationale Wasserstoffstrategie zum Erfolg zu führen und grünen Wasserstoff zu etablieren, sind auch in Deutschland Anpassungen der Abgabenstruktur notwendig [10], [11]. Eine erste positive Steuerungswirkung versprechen ein geringerer Preis für Strom aus erneuerbaren Energien und die Anhebung des CO₂-Preises auf 25 € pro Tonne, der ab 2021 auch die Sektoren Gebäude und Verkehr einschließt [12], [13].

Grüner Wasserstoff kann aus einer Vielzahl an unterschiedlichen regenerativen Energiequellen produziert werden und ermöglicht so eine diversifizierte Energieerzeugung. Mit grünem Wasserstoff können Sektoren dekarbonisiert werden, in denen sonst keine Dekarbonisierungspotenziale ausschöpfbar sind. Eine wichtige Rolle auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft wird blauem Wasserstoff zugeschrieben. Dessen Rolle ist die Durchdringung und die Diversifikation des bereits bestehenden Wasserstoffmarktes, um die Verfügbarkeit benötigter Infrastruktur und die industrielle Fertigung benötigter Elektrolyseure auszubauen und einer Umstellung auf grünen Wasserstoff den Weg zu bereiten [14], [15]. Das bei der Produktion von blauem Wasserstoff abgeschiedene CO₂ wird gelagert, wenn es nicht industriell genutzt wird. Ein geringer Teil CO₂ gelangt trotz der Abscheidung in die Atmosphäre. Letztlich wird blauer Wasserstoff als sehr kritisch betrachtet, da er weiterhin eine Nutzung fossiler Energieträger bedeutet, die mit zusätzlichem Energieaufwand umgewandelt werden wobei weiterhin zusätzliches CO₂ freigesetzt wird. **Blauer Wasserstoff kann deshalb höchstens als Brückentechnologie auf dem Weg zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft angesehen werden** [16], [17].

3 Die nationale Wasserstoff-Strategie erfordert erheblichen Ausbau regenerativer Energien

Für das Jahr 2030 wird in Deutschland ein jährlicher Bedarf an grünem Wasserstoff mit einem kumulierten Energiegehalt von 90 bis 110 TWh erwartet. Das entspricht einer Menge von 2,7 bis 3,3 Mio. Tonnen [3]. Bis 2050 soll sich dieser Bedarf in Deutschland auf bis zu 21 Mio. Tonnen mit einem Energiegehalt von 700 TWh pro Jahr vergrößern. Um diese Zahlen in ein Verhältnis zu setzen: 2019 wurden in Deutschland 2.825 TWh fossile Energieträger aufgewendet. Das heißt, 110 TWh grüner Wasserstoff würden 2030 nur 3,9 % und 700 TWh würden 2050 nur 24,9 % der 2019 verwendeten fossilen Energieträger ersetzen [18]. Die größten Anteile an der Nachfrage entstehen in den Sektoren Industrie und Verkehr [19]. Ein Teil des Wasserstoffbedarfs soll durch Erzeugungskapazitäten in Deutschland gedeckt werden. In der Nationalen Wasserstoffstrategie ist dafür vorgesehen, Gesamterzeugungskapazitäten von 5 GW bis 2030 und von 10 GW bis spätestens 2040 zu errichten. Eine Erzeugungskapazität von 5 GW ermöglicht die Produktion einer Wasserstoffmenge mit einem Energiegehalt von insgesamt 14 TWh pro Jahr. Für die Herstellung dieser Menge Wasserstoff werden 20 TWh elektrischer Energie¹ benötigt [3]. Das bedeutet, dass mit den geplanten Erzeugungskapazitäten 2030 eine Angebotslücke von 76 bis 96 TWh entsteht, die durch Importe von 2,3 bis 2,9 Mio. Tonnen Wasserstoff gedeckt werden muss. Die NOW GmbH, die Förderprogramme für verschiedene Bundesressorts koordiniert, hat in einer Studie unterschiedliche Szenarien für den Bedarf an Erzeugungskapazitäten von grünem Wasserstoff in Deutschland simuliert und prognostiziert für 2050 einen Bedarf an Erzeugungskapazitäten zwischen 137 und 275 GW. Dadurch kann Wasserstoff mit einem kumulierten Energiegehalt zwischen 384 und 770 TWh pro Jahr² erzeugt werden.



Die für 2050 antizipierte Nachfrage nach grünem Wasserstoff mit einem Energiegehalt von insgesamt 700 TWh würde im optimistischsten Szenario überbefriedigt, im pessimistischsten entstünde eine Angebotslücke von 316 TWh, die durch Importe von circa 9,4 Mio. Tonnen Wasserstoff geschlossen werden müsste.

¹ Annahmen: Betrieb über 4.000 Volllaststunden, Wirkungsgrad der Elektrolyse: 70 % [3]

² Annahmen: s.o.

Die für 2050 antizipierte Nachfrage nach grünem Wasserstoff mit einem Energiegehalt von insgesamt 700 TWh würde im optimistischsten Szenario überbefriedigt, im pessimistischsten entstünde eine Angebotslücke von 316 TWh, die durch Importe von circa 9,4 Mio. Tonnen Wasserstoff geschlossen werden müsste [20, pp. 67–76].

Für die Erzeugung dieser Mengen grünen Wasserstoffs werden große Mengen Strom aus erneuerbaren Energien benötigt. Aus erneuerbaren Energien wurden 2019 in Deutschland 240 TWh Strom gewonnen. Das entspricht einem Anteil von circa 46 % an der deutschen Nettostromerzeugung, der Rest entstammt fossilen oder nuklearen Quellen [21]. Da bei der Herstellung von Wasserstoff ein Teil der aufgewendeten Energie für die Herstellung selbst benötigt wird, ist die am Ende in Wasserstoff gebundene Energie geringer als die Eingangsenergie. Wie hoch diese sogenannten Umwandlungsverluste sind, ist vom Wirkungsgrad des Elektrolyseurs abhängig. Bei einem Wirkungsgrad der Elektrolyseure von 70 % werden 1.000 TWh Strom aus erneuerbaren Quellen benötigt, um den für 2050 prognostizierten Bedarf an grünem Wasserstoff mit einem gesamten Energiegehalt von 700 TWh zu decken. Es wird 2050 also mindestens die vierfache Menge an erneuerbarem Strom alleine für die Produktion von grünem Wasserstoff benötigt, als sie heute in Deutschland verfügbar ist. **Das bedeutet, dass die Nationale Wasserstoffstrategie ohne einen drastischen, beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien zum Scheitern verurteilt ist.**

Neben der Dekarbonisierung von Sektoren, wie beispielsweise dem Transportsektor, die anderweitig nicht dekarbonisierbar sind, bietet Wasserstoff auch die Möglichkeit, durch Rückverstromung die Stromversorgung über Dunkelflauten, also den Zustand, das Windenergie- und Photovoltaikanlagen aufgrund von gleichzeitigem Schwachwind und Dunkelheit nur geringe Mengen elektrischer Energie produzieren können, zu sichern. Die Sicherung der Stromversorgung über Dunkelflauten ist allerdings eher ein zusätzlicher Effekt; das bedeutendere Potenzial von Wasserstoff ist die sektorübergreifende Dekarbonisierung. An dieser Stelle kommt der Begriff „Primärenergieverbrauch“ ins Spiel. In einer Volkswirtschaft wird nicht nur Energie in Form von Strom, sondern auch in Form vieler anderer Energieträger wie Kohle, Erdöl oder auch Raffinerieprodukte genutzt. Der Ausdruck der Primärenergie summiert die Menge der Energie, die in einem Zeitraum, beispielsweise in einem Jahr, in der Volkswirtschaft aufgewendeten Primärenergieträgern steckt. Es sind also nicht nur die für die Stromerzeugung genutzten Primärenergieträger eingeschlossen, sondern auch Primärenergieträger, die zum Beispiel direkt in Verbrennungsmotoren oder Kraftwerken eingesetzt werden. Obwohl 46 % des Nettostroms in Deutschland aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden, ist der Anteil erneuerbarer Energien an der Primärenergie deutlich kleiner, da Strom nur einen kleinen Teil der genutzten Gesamtenergiemenge ausmacht. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Primärenergie in Deutschland betrug 2019 15 %³, der Rest entstammt fossilen oder nuklearen Quellen [22, p. 2]. Insgesamt werden 72 % des Primärenergiebedarfs in Deutschland durch den Import fossiler Rohstoffe gedeckt [23]. Deutschland wird auch 2050 nicht energieautark sein und den Großteil seiner Energie aus dem Ausland beziehen [24]. Der Unterschied zu heute wird sein, dass 2050 grüner Wasserstoff ein bedeutender Energieträger ist und dadurch der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieanteil deutlich höher ausfallen wird. **Entscheidend für den Erfolg der Nationalen Wasserstoffstrategie sind daher auch massive Importe von grünem Wasserstoff.**

³ Anteile am Primärenergieverbrauch 2019: Fossil 78 %, Erneuerbar 15 %, Nuklear 6 %, Sonstige 1 % [22]

Zur Sicherung von Importen sollen strategische Wasserstoff-Partnerschaften mit Staaten auf europäischer und internationaler Ebene geschaffen werden [24]. Konkrete Pläne für Wasserstoff-Partnerschaften bestehen mit Staaten in West- und in Südafrika, in denen grüner Wasserstoff ebenfalls ein aktiv verfolgtes Ziel ist. Aufgrund nahezu konstant verfügbarer Solar- und Windenergie sind die Bedingungen für die Erzeugung erneuerbaren Stroms hier besonders günstig. Im Rahmen von Entwicklungsprojekten sollen der Energiebedarf vor Ort und die Exportnachfrage gedeckt werden. Die Energie soll in Form von Wasserstoff oder anderen wasserstoffbasierten Energieträgern exportiert werden. Eine Schwierigkeit bei der Herstellung von elektrolytischem Wasserstoff in diesen Regionen ist, dass das für die Elektrolyse benötigte Trinkwasser eine knappe Ressource ist. Um in diesen Regionen dennoch Wasserstoff nachhaltig herstellen zu können, wird aktuell daran geforscht, Meerwasser für die Elektrolyse nutzbar zu machen [25]–[30].

4 Der Weg zur Wasserstoffgesellschaft

E-Fuels transportieren grüne Energie mit vorhandener Infrastruktur

Wasserstoff kann auf unterschiedliche Weisen transportiert werden; als reiner Wasserstoff, chemisch an einen anderen Stoff gebunden oder umgewandelt in einen synthetischen Energieträger.

Wasserstoff kann entweder unter Druck oder verflüssigt transportiert werden. Unter Druck kann Wasserstoff in Pipelines und in Druckbehältern transportiert werden. Der heute übliche Druck in Pipelines dafür liegt zwischen 30 und 80 bar. Pipelines sind eine sehr effiziente Möglichkeit, große Mengen Gas zu transportieren, sie sind aber vor allem über lange Strecken kostenintensiv im Bau. In Druckbehältern kann der Druck mit über 500 bar deutlich höher liegen. Der Transport in Druckbehältern hat den Vorteil, dass die Behälter mit vorhandener Infrastruktur auf LKW, Zügen oder Containerschiffen transportiert werden können. Voraussetzung dafür ist eine entsprechende Dimensionierung und Zulassung solcher Druckbehälter. Beispielsweise ist die Entwicklung speziell für den Transport von Wasserstoff umgerüsteter 40-Fuß-Container abgeschlossen, es wird allerdings noch eine Zulassung für den Einsatz benötigt [31, pp. 16–17]. Großvolumige Wasserstoff-Druckbehälter eignen sich vor allem für die Lagerung zum Beispiel auf Firmengeländen, wo genügend freie Fläche vorhanden ist [32]. Auch natürliche Kavernen können zur Lagerung von Wasserstoff eingesetzt werden. Eine sinnvolle Nutzung natürlicher Kavernen zur Wasserstoffspeicherung setzt allerdings voraus, dass diese geographisch entsprechend gelegen sind [33]. Wasserstoff kann auch durch Herabkühlung auf -253 °C als Flüssigwasserstoff⁴ in speziellen Tanks transportiert werden.



1 Kubikmeter Flüssigwasserstoff wiegt 70,8 kg.

Durch den Wechsel des Aggregatzustandes kann bei gleichem Volumen eine größere Masse Wasserstoff und damit eine größere Menge Energie gespeichert werden. Durch das Erwärmen der Ladung beispielsweise während einer langen Schiffsreise verdampft allerdings immer ein Teil der Ladung. Dieses sogenannte Boil-off-Gas kann zu einem Druckanstieg führen und die Integrität des Tanks bedrohen.

⁴ Zum Vergleich: Verflüssigtes Erdgas (LNG) wird bei Temperaturen um -160 °C transportiert

Ein erster Flüssigwasserstofftanker⁵, der fossilen Flüssigwasserstoff seit 2020 von Australien nach Japan transportiert, verbrennt dieses Boil-off-Gas [34].

Neben dem Transport von Wasserstoff in Reinform kann dieser auch angebunden an ein anderes Medium, zum Beispiel in flüssigen organischen Stoffen (*Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC)), transportiert werden. Durch eine chemische Reaktion wird Wasserstoff für den Transport an solche LOHC gebunden und zur Nutzung wieder getrennt. Sowohl bei der Bindung als auch bei der Trennung wird, aufgrund der benötigten hohen Drücke von bis zu 50 bar und Temperaturen von bis zu 400 °C, viel Energie benötigt [35]. Weniger Energie wird benötigt, wenn Wasserstoff anstatt an LOHC in einem Metallhydrid gebunden wird. Aufgrund des Gewichts solcher Metallhydridspeicher eignet sich diese Art der Speicherung allerdings eher für stationäre Verwendungszwecke. Zudem sind Metallhydridspeicher aufgrund hoher Materialkosten vergleichsweise teuer [36], [37].

Eine weitere Möglichkeit des Transports ist die Umwandlung von Wasserstoff in einen synthetischen Energieträger. Diese Verfahren werden als Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid (PtL) bezeichnet und unter dem Begriff Power-to-X (PtX) zusammengefasst. Durch die PtG-Verfahren werden zum Beispiel Methan oder Ammoniak synthetisiert. Auf diese Weise hergestelltes Methan wird auch als *Synthetic Natural Gas* (SNG) bezeichnet, das verflüssigt (SLNG) oder komprimiert (SCNG) werden kann. Die PtL-Verfahren ermöglichen beispielsweise die Herstellung von Methanol oder sogenanntem E-Crude. E-Crude ist ein synthetischer Erdöl-Ersatz, der unter anderem durch die sogenannte Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt wird. Durch das anschließende Verfahren des Hydrocracking kann der Stoff weiter raffiniert werden, um synthetisches Naphtha, Diesel, Kerosin oder Benzin zu erhalten. Synthetische Kraftstoffe, die in strombasierten PtX-Verfahren erzeugt werden, werden als E-Fuels bezeichnet [38], [39]. E-Fuels können genauso gelagert, transportiert und genutzt werden wie die herkömmlichen fossilen Kraftstoffe, da sie die gleichen Eigenschaften besitzen [40]. Das heißt, **E-Fuels bieten die Möglichkeit, mit vorhandener Infrastruktur und herkömmlichen Logistikkonzepten große Mengen grüner Energie zu speichern, zu transportieren und zu nutzen.**

Wirtschaftlicher Import von Wasserstoff über lange Strecken derzeit nur mit E-Fuels

Wasserstoff hat mit 33,33 kWh/kg eine hohe gravimetrische Energiedichte. Allerdings ist die volumenbezogene Energiedichte, bedingt durch die niedrige Dichte von Wasserstoff, selbst bei Verflüssigung, sehr gering. Beim Transport von reinem Wasserstoff in komprimierter oder verflüssigter Form werden daher große Tankvolumen und aufwändige Vorkehrungen zur Minimierung oder Rückverflüssigung von Boil-off-Gas benötigt, um vergleichsweise geringe Mengen Energie zu transportieren. E-Fuels haben zwar eine deutlich geringere gravimetrische Energiedichte, allerdings ist das erzielbare Verhältnis von Volumen zu Energiegehalt aufgrund der viel höheren Dichte deutlich besser.

In Tabelle 1 sind die für die Logistik relevantesten Eigenschaften von Flüssigwasserstoff und einigen E-Fuels aufgeführt. Pro Energieträger wird hier dargestellt, wieviel Energie mit einer Schiffsladung transportiert werden kann. Hierfür wurden real existierende und gängige Schiffstypen genutzt.

⁵ L H₂-Carrier Suiso Frontier transportiert 1.250 m³ Wasserstoff. Bei – 253 °C entspricht das etwa 88,75 t Flüssigwasserstoff

Tabelle 1: Logistik von Wasserstoff und Wasserstoffprodukten

		L H ₂	SLNG	Ammoniak	Methanol	E-Crude	E-Diesel
Stoffliche Eigenschaften	Dichte [kg/m ³]	70,8	450,0	600,0	792,0	870,0	845,0
	Energiedichte [kWh/kg]	33,3	13,9	5,2	5,5	11,6	11,9
	Energiedichte [kWh/m ³]	2.359	6.251	3.120	4.332	10.092	10.056
Potenzielle Transportmittel	Schiffsname	Suiso Frontier	Mozah	Yara Kara	Taranaki Sun	FSO Asia	LR2 Eternity
	Schiffstyp	L H ₂ -Carrier	LNG-Carrier	LPG Tanker	LPG Tanker	Ultra Large Crude Carrier	Product Tanker
	Tankvolumen [m ³]	1.250	266.000	20.600	55.330	513.683	115.572
	Transportierte Stoffmenge [t] ⁶	84	113.715	11.742	41.630	424.559	87.835
	Transportierte Energie [GWh]	3	1.629	63	235	5.080	1.139

In der vorstehenden Tabelle wird verdeutlicht, dass **ein großskalierter Import von reinem Wasserstoff über lange Strecken ohne Umwandlung in E-Fuels aktuell nicht effizient durchführbar ist**, da bei dem Import von reinem Wasserstoff nur geringe Energiemengen transportiert werden können. Selbst unter der Annahme, dass L H₂-Carrier, also Schiffe für den Transport von Flüssigwasserstoff, weiterentwickelt werden und irgendwann größere Mengen reinen Wasserstoffs transportieren können, ermöglicht der Transport von E-Fuels immer den Transport von mehr Energie bei gleichem Tankvolumen ohne das neue Infrastruktur entwickelt werden muss. Für den Import bedeutet dies, dass die in Kapitel 3 dargestellte Angebotslücke von mindestens 2,3 Mio. Tonnen grünem Wasserstoff mit einem Energiegehalt von 76 TWh im Jahr 2030 durch über 25.000 jährliche Wasserstoffimporte mit L H₂-Carriern in der Größe einer Suiso Frontier oder durch 15 jährliche E-Crude-Importe mit ULCC in der Größe einer FSO Asia gedeckt werden könnte.

1 ULCC transportiert die Energiemenge von 1.758 kleinen L H₂-Carriern.



Wasserstoffprodukte versprechen schnell messbare Erfolge

Nachhaltig produzierte E-Fuels ermöglichen durch Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur kurzfristig eine Umstellung der Logistik und des Verkehrs auf grüne Energien und eine Vermeidung neuer CO₂-Emissionen.

⁶ Annahme: Tanks sind zu 98 % gefüllt, um Boil-Off-Gas zu berücksichtigen

Beispielsweise gibt es Pläne, aus Solarenergie Wasserstoff herzustellen [40]. In einem Gedankenexperiment könnte der in einem sonnenreichen Land mit erneuerbaren Energiequellen nachhaltig hergestellte Wasserstoff für den Transport vor Ort in einen flüssigen Energieträger wie E-Crude umgewandelt werden. Um das E-Crude nach Europa zu transportieren, wird ein herkömmlicher Tanker ohne zusätzliche Umrüstungen eingesetzt. In Europa wird das E-Crude in einer herkömmlichen Raffinerie zu E-Fuels raffiniert und mit konventionellen Tanklastwagen zu Tankstellen transportiert, wo der Endverbraucher sein Diesel- oder Benzinfahrzeug mit dem entsprechenden E-Fuel klimaneutral betanken kann. Durch den Einsatz von E-Crude und E-Fuels kann also die gesamte Lieferkette von der Produktion bis zum Endverbraucher mit erneuerbaren Energien betrieben werden. E-Fuels sind kurz- und mittelfristig eine wichtige Brückentechnologie, um Bestandsfahrzeuge in Transport und Logistik klimaneutral zu betreiben. Langfristig ist damit zu rechnen, dass in diesen Bereichen noch effizientere batterie- oder brennstoffzellenelektrische Antriebe zum Einsatz kommen, wenn diese verfügbar sind. In der Logistik werden E-Fuels langfristig dort eine Lücke ausfüllen, wo batterie- oder brennstoffzellenelektrische Konzepte zum Beispiel aus Gewichts- oder Platzgründen nicht einsetzbar sind [41], [42].

Eine zeitnahe Markteinführung von E-Fuels wird durch die vergleichsweise hohen Herstellungs- und Transportkosten pro Energieeinheit des raffinierten Produkts behindert. In einer aktuellen Studie werden für 2050 mittlere Kosten von 29 EUR/MWh⁷ für fossiles LNG, von 39 EUR/MWh für fossiles VLSFO/MGO, 123 EUR/MWh für grünen Wasserstoff, und von 162 EUR/MWh für synthetischen Diesel angesetzt. Eine weitere Studie erwartet für 2050 für Herstellung und Transport Kosten in Höhe von 73 EUR/MWh für herkömmliche Kraftstoffe und je nach Szenario zwischen 80 und 140 EUR/MWh für E-Fuels [41], [43]. Das Industriekonsortium Norsk e-Fuel plant, in Norwegen eine Anlage zur Erzeugung von synthetischem Kerosin aus erneuerbaren Energien zu errichten. Ab 2023 sollen jährlich 10.000 m³ Kerosin⁸ erzeugt werden, ab 2026 soll die Anlage auf die Produktion von 100.000 m³ pro Jahr ausgebaut werden. Norsk e-Fuel erwartet für 2023 einen Abgabepreis von 3,5 € pro Liter, der sich langfristig auf 1,2 € pro Liter reduzieren soll. Das entspricht 369 €/MWh in 2023 und perspektivisch 126 €/MWh. Das synthetische Kerosin ist also auch langfristig deutlich teurer als fossiles Kerosin, dessen Abgabepreis im Januar 2020 bei circa 45 €/MWh lag [44], [45].

Fast in jedem Szenario sind E-Fuels also deutlich teurer als die fossilen Pendanten. Eine frühere Kostenführerschaft für E-Fuels kann nur durch eine deutliche Anhebung des CO₂-Preises auf über 200 € pro Tonne und eine Anpassung sonstiger Abgaben erzielt werden [10], [46], [47].

Ein weiterer langfristiger zukünftiger Markt für E-Crude ist der Teil der petrochemischen Industrie, der Kunststoffe und Polymere herstellt. Grundstoff für die Kunststoffherstellung sind zum Großteil fossiles Naphtha und Erdgas, die beide in der Zukunft auch von den jeweiligen nachhaltigen synthetischen Alternativen ersetzt werden könnten. Große Ölproduzenten erwarten ab 2035 aufgrund effizienterer Motoren und alternativer Kraftstoffe zwar eine Stagnation der Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen; sie erwarten allerdings auch, dass die weltweite Nachfrage nach Kunststoffen und Polymeren und damit auch die Nachfrage der petrochemischen Industrie nach Kunststoff-Grundstoffen weiter steigen wird [48]–[50]. Unter der Annahme, dass grüner Wasserstoff in ausreichendem Umfang hergestellt werden kann, besteht die Möglichkeit, auch diesen Sektor durch die Nutzung synthetischer, wasserstoffbasierter Grundstoffe zu dekarbonisieren.

⁷ Umrechnungskurs 25.09.2020: 1 USD ≈ 0,86 EUR

⁸ Das Tankvolumen eines Airbus A350 fasst bis zu 150 m³. Mit 10.000 m³ Kerosin könnten die Tanks dieses Flugzeugtyps circa 65 Mal befüllt werden.

Direktnutzung von reinem Wasserstoff bietet großes Entwicklungspotenzial

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, dass der Betrieb herkömmlicher Bestandsfahrzeuge mit Wasserstoffprodukten wie E-Fuels kurz- und mittelfristig eine Dekarbonisierung vieler Bereiche ermöglicht. In diesem Fall sind durch die Nutzung bereits vorhandener Fahrzeuge und bestehender Infrastruktur bereits jetzt mehr Abnehmer verfügbar, als durch die derzeit existierenden Erzeugungskapazitäten gedeckt werden kann. Ein weiterer Ausbau der Erzeugungskapazitäten für Wasserstoff und Wasserstoffprodukte trifft folglich auf eine gesicherte Nachfrage, so dass die sukzessive Umstellung entsprechender Bereiche auf klimaneutrale Antriebe mittels E-Fuels kurz- und mittelfristig plausibel erscheint.

Parallel wird im Bereich brennstoffzellenbasierter Antriebe die technische Entwicklung vorangetrieben. **Langfristig besteht daher in der Direktnutzung von Wasserstoff mit Hilfe von Brennstoffzellen ein deutlich größeres Entwicklungspotenzial.** In Fahrzeugen, die für die Beförderung sowohl von Personen als auch von Gütern eingesetzt werden, können Verbrennungsmotoren langfristig durch Brennstoffzellen und Elektromotoren ersetzt werden. Reagiert Wasserstoff in einer Brennstoffzelle mit Sauerstoff, wird lediglich Wasser emittiert. Bei dem Prozess entsteht elektrische Energie, die über einen Batteriepuffer einen Elektromotor antreibt. Voraussetzung für den Betrieb von Fahrzeugen mit Wasserstoff ist eine ausreichende Tankstelleninfrastruktur [51]. Brennstoffzellen können nicht nur in Fahrzeugen verwendet werden, sondern überall dort, wo Strom benötigt wird. Vor allem stationäre Anlagen können deutlich größer als mobile Anlagen skaliert werden, da der Wasserstofftank nicht durch die Abmessungen eines Fahrzeugs limitiert ist. So gelten Brennstoffzellen als eine Lösung, um Dunkelflauten zu überbrücken, wenn sie in neuartigen Kraftwerken eingesetzt werden. Voraussetzung dafür ist, dass ausreichende Mengen Wasserstoff als entsprechende Reserve gespeichert werden können [52, p. 30].

5%

Ungefähr 5 % der in Deutschland ausgestoßenen Menge an CO₂ lässt sich auf die Stahlindustrie zurückführen.

Weitere Möglichkeiten für die Direktnutzung von Wasserstoff bietet die verarbeitende Industrie. Ungefähr 5 % der in Deutschland ausgestoßenen Menge an CO₂ lässt sich derzeit auf die Stahlindustrie zurückführen [53], [54]. Durch den Einsatz von reinem Wasserstoff als Reduktionsmittel kann dieser Anteil deutlich verringert werden. In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird bis 2050 eine Nachfrage nach einer Wasserstoffmenge mit einem gesamten Energiegehalt von 80 TWh, also 2,4 Mio. Tonnen aus der Stahlindustrie erwartet [3].

Im Laufe dieses Kapitels wurden die unterschiedlichen Möglichkeiten, Wasserstoff zu transportieren dargestellt. Es wurde auch darauf eingegangen, dass durch jeden Transformationsprozess ein Teil der Energie für die Prozesse benötigt wird, es also immer einen Umwandlungsverlust gibt. Diese Umwandlungsverluste können nur ausgeschlossen werden, wenn Wasserstoff in reiner Form und über möglichst kurze Strecken transportiert wird. **Deshalb eröffnet die lokale Erzeugung von Wasserstoff direkt beim jeweiligen Verbraucher das effizienteste Nutzungspotenzial** [55]. Dadurch werden Transport und Umwandlungsverluste minimiert. Die Voraussetzung für die lokale Erzeugung und den lokalen Verbrauch von Wasserstoff ist allerdings ein deutlich größerer Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung [12].

Die Koexistenz von Wasserstoff-Technologien

Während im Bereich der Industrie die Einsatzmöglichkeiten von grünem Wasserstoff offensichtlich sind und zu erwarten ist, dass sich die Direktnutzung von Wasserstoff als effizienteste Möglichkeit durchsetzen wird, tun sich in anderen Bereichen, wie etwa Verkehr, Transport und Logistik, eine Vielzahl weiterer Optionen, wie die Nutzung von Wasserstoffprodukten, auf.

In der Schifffahrt könnten beispielsweise im Hafenbereich kleinere Arbeitsboote batterieelektrisch versorgt werden, da die Einsatzzeiten kurz sind, der Energiebedarf gering, der Einsatzbereich begrenzt ist und das Boot an einer Ladestation an seinem Liegeplatz geladen werden kann [56]. Ein batterieelektrisches Binnenschiff ist wiederum nicht so einfach realisierbar. Zwar ist der Energiebedarf von einem Binnenschiff vergleichsweise gering, dafür sind die Einsatzzeiten deutlich länger und das Einsatzgebiet deutlich größer. Auf einem Binnenschiff könnte daher ein brennstoffzellelektrischer Antrieb sinnvoll eingesetzt werden. Entsprechende Projekte, etwa zur Realisierung eines Schubbootes, sind derzeit in der Umsetzung [57]. Beide Antriebsarten wiederum sind bei einem Seeschiff derzeit nicht umsetzbar. Zwar gibt es Kreuzfahrtschiffe, die während der Manöverfahrt batterieelektrisch betrieben werden können; das große Gewicht der notwendigen Batterien schließt einen längeren Einsatz allerdings aus. Auch der brennstoffzellelektrische Betrieb eines Seeschiffs ist derzeit nicht realisierbar. Der Grund dafür ist die geringe volumetrische Energiedichte von Flüssigwasserstoff. Um dieselbe Menge an Energie mitzuführen, wie es Bunkeröl ermöglicht, würde etwa das fünffache Tankvolumen und im Vergleich zu LNG immer noch ein dreifach größeres Tankvolumen benötigt. Um Seeschiffe mit grüner Energie zu betreiben, werden daher zunächst nachhaltig hergestellte E-Fuels benötigt [58]–[60]. Ein Betrieb mit Brennstoffzellen könnte langfristig eine Option werden, wenn die Effizienz und die Technologien sowohl des Antriebsstrangs als auch der Tanks ausgereifter und besser erforscht sind. Konkrete Absichtserklärungen und Kooperationsvorhaben zur Entwicklung der erforderlichen Brennstoffzellensysteme wurden unterzeichnet [61].

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass nicht eine einzelne technische Lösung alle Anforderungen erfüllt, sondern dass unterschiedliche technische Möglichkeiten in verschiedenen Nischen und Einsatzgebieten sinnvoll eingesetzt werden müssen. Ein ähnliches Bild wie in der Schifffahrt wird sich im Straßenverkehr bei der Beförderung von Personen und Gütern, in der Luftfahrt und im Schienenverkehr ergeben [51], [62], [63]. Insbesondere für den Schienenverkehr ist dieses Konzept nur anwendbar auf nicht-elektrifizierbaren Strecken und beim Rangierverkehr [64], [65]. Fest steht, dass sich nicht eine einzelne Technologie, Wasserstoff zu nutzen, durchsetzen wird, **sondern dass unterschiedliche Technologien mittelfristig gleichwertig nebeneinander koexistieren werden.**

5 Fazit

Die im Juni 2020 verabschiedete Nationale Wasserstoffstrategie legt einen Rahmen fest, in dem sich Deutschland zu einer Wasserstoffgesellschaft entwickeln kann. Neben den verschiedenen Möglichkeiten der Dekarbonisierung vieler Sektoren durch grünen Wasserstoff ist ein wichtiger Bestandteil der Strategie die Förderung von Industrie und Forschung.

Um den langfristig wachsenden Bedarf an grünem Wasserstoff zu decken, sollen umfangreiche inländische Erzeugungskapazitäten aufgebaut werden. Damit grüner Wasserstoff in nennenswerten Mengen in Deutschland produziert werden kann, ist es notwendig, dass erneuerbare Energien massiv ausgebaut werden. Allerdings müssen selbst mit einer drastisch erhöhten Erzeugungskapazität noch große Mengen an Energieträgern auch in Form von Wasserstoff und Wasserstoffprodukten aus dem Ausland

importiert werden. Es wurde abgeschätzt, dass 2030 mindestens 2,3 Mio. Tonnen an grünem Wasserstoff mit einem kumulierten Energiegehalt von 76 TWh nach Deutschland importiert werden müssen. Diese Energiemenge entspricht einem rechnerischen Jahresstromverbrauch von 19 Mio. 4-Personen-Haushalten⁹.

Um diese Menge an Energieträgern zu importieren und in Deutschland zu verteilen, müssen neue logistische Konzepte zum Transport, zur Lagerung und zum Umschlag konzipiert und evaluiert werden, die derzeit noch nicht vorhanden sind. Dazu müssen die jeweiligen Mengengerüste der Wasserstoffbedarfe aller Sektoren untersucht und hinsichtlich Transport- und Lagermöglichkeiten überprüft werden.



2030 werden voraussichtlich 76 TWh grünen Wasserstoffs nach Deutschland importiert. Das entspricht dem durchschnittlichen Jahresstromverbrauch von 19 Mio. 4-Personen-Haushalten.

Für die Einfuhr großer Energiemengen ist der Import reinen Wasserstoffs aufgrund der aktuell verfügbaren Möglichkeiten derzeit ineffizient. Effizienter ist der Import von Wasserstoffprodukten wie E-Crude, synthetischem Erdgas oder Ammoniak unter Nutzung bestehender Verkehrsträger und existierender Infrastruktur.

Validiert werden müssen auch die Potenziale für den Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffprodukten bei den verschiedenen Endverbrauchern. Zwar ermöglichen Wasserstoffprodukte wie E-Fuels die schnelle Reduzierung neuer CO₂-Ausstöße, langfristig könnten je nach Verbraucher allerdings auch andere Konzepte effizienter und ökologischer sein. Zum einen ist das der Betrieb mit neuen, synthetischen Kraftstoffen wie Ammoniak oder Methanol. Andererseits haben auch der batterieelektrische oder der brennstoffzellenelektrische Betrieb in vielen Gebieten ein großes Potenzial. Diese Potenziale müssen im Einzelnen untersucht und durch Life Cycle Assessments belegt werden.

In der Nationalen Wasserstoffstrategie verspricht die erfolgreiche Energiewende die Vereinbarung von Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit. Um die Umweltverträglichkeit zu gewährleisten, ist ein massiver Ausbau erneuerbarer Energien im Inland und in Exportländern Voraussetzung. Versorgungssicherheit wird durch die Entwicklung extensiver Erzeugungskapazitäten für grünen Wasserstoff und den Abschluss neuer Energiepartnerschaften generiert. Damit neue regenerative Alternativen im Vergleich bezahlbar sind, muss das Abgabensystem um eine CO₂-Bepreisung herum restrukturiert werden. All dies ist möglich und erfordert die eingehende Untersuchung der unterschiedlichen Sektoren sowie die Erarbeitung entsprechender Logistikkonzepte. Die Logistik ist der Schlüssel zum Erfolg.

⁹ Jahresstromverbrauch eines durchschnittlichen 4-Personenhaushalts im Einfamilienhaus ohne elektrische Warmwasserbereitung: 4.000 kWh/Jahr [66]

6 Literatur

- [1] J. Nitsch, "Potenziale der Wasserstoffwirtschaft." 2002.
- [2] Hydrogen Europe, "Hydrogen applications." 2017, Accessed: Sep. 08, 2020. [Online]. Available: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-applications>.
- [3] BMWi, "Die Nationale Wasserstoffstrategie," *Energiewende*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, Jun. 2020.
- [4] E. Kommission, "Green Deal: Kommission legt Strategien für das Energiesystem der Zukunft und sauberen Wasserstoff vor." 2020, Accessed: Sep. 30, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/germany/news/20200708-wasserstoffstrategie_de.
- [5] A. Velazquez Abad, P. E. Dodds, A. V. Abad, and P. E. Dodds, "Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges," *Energy Policy*, vol. 138, p. 111300, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111300.
- [6] T. Gül and D. Turk, "The Future of Hydrogen." International Energy Agency, 2019.
- [7] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597–611, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [8] G. H., "CO₂-Speicherung durch Mineralkarbonisierung." 2020, Accessed: Oct. 02, 2020. [Online]. Available: <https://www.solarify.eu/2020/03/20/080-co2-speicherung-durch-mineralkarbonisierung/>.
- [9] Y. Yan *et al.*, "Process simulations of blue hydrogen production by upgraded sorption enhanced steam methane reforming (SE-SMR) processes," *Energy Conversion and Management*, vol. 222, p. 113144, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113144.
- [10] Deutsche Presse-Agentur, "Weil wirft Altmaier Schnecken tempo bei Energiewende vor," *Zeit Online*. 2020, Accessed: Sep. 08, 2020. [Online]. Available: <https://www.zeit.de/news/2020-03/06/weil-wirft-altmaier-schnecken-tempo-bei-energiewende-vor>.
- [11] E.-H. Arndt, "Öko-Windstrom ideal für „grünen Wasserstoff“," *Täglicher Hafenbericht*, vol. 163, p. 1, 2020.
- [12] K. Straatmann, "Warum grüner Wasserstoff noch nicht klimaneutral ist," *Handelsblatt*. Handelsblatt Media Group GmbH & Co. KG, 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/energiewende-warum-gruener-wasserstoff-noch-nicht-klimaneutral-ist/26132702.html?share=twitter&ticket=ST-2815588-uPryskbTd3Ys7SsgyJ0D-ap5>.
- [13] epd Medien, "Kabinett beschließt CO₂-Preis von 25 Euro je Tonne," *Süddeutsche Zeitung*. Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH, 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/co2-steuer-deutschland-2021-1.4913406>.
- [14] DNV GL, "Heading for hydrogen." DNV GL, 2020.
- [15] Wissenschaftliche Dienste, "Zu Potentialen der Wasserstoffherstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland." Deutscher Bundestag, 2020.
- [16] R. Dickel, J. Henderson, and M. Lambert, "Blue hydrogen as an enabler of green hydrogen." Oxford institute for Energy Studies, 2020.
- [17] M. Bui *et al.*, "Carbon capture and storage (CCS): the way forward," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 5, pp. 1062–1176, 2018, doi: 10.1039/c7ee02342a.
- [18] A. Breitkopf, "Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Brennstoffen in den Jahren 2018 und 2019." Accessed: Nov. 03, 2020. [Online]. Available:

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/42423/umfrage/primaerenergieverbrauch-von-deutschland-nach-brennstoffen-in-oelaequivalent/>.
- [19] Kobiela, S. Lechtenböhrer, W. W. Schneider, S. Samadi, G. Holtz, and Georg, “Klimaneutrale Industrie.” Agora Energiewende, 2019.
- [20] T. Smolinka *et al.*, “Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland.” Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2018.
- [21] B. Burger and K. Schneider, “Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2019: Mehr erneuerbare als fossile Energieerzeugung.” Feb. 01, 2020, Accessed: Aug. 12, 2020. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/oeffentliche-nettostromerzeugung-in-deutschland-2019.html>.
- [22] H. G. Buttermann and U. Maassen, “Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019.” Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2020.
- [23] H. G. Buttermann and U. Maassen, “Importabhängigkeit der deutschen Energieversorgung 2019.” Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2020.
- [24] BMBF, “Woher soll der Grüne Wasserstoff kommen?” Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2020, Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen-11766.html>.
- [25] M. Jensterle *et al.*, “Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland.” Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
- [26] M. Hohmann, “Deutsche Rohölimporte nach ausgewählten Exportländern in den Jahren 2012 bis 2018.” 2019, Accessed: Aug. 12, 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2473/umfrage/rohoolimport-hauptlieferanten-von-deutschland/>.
- [27] BMBF, “Nationale Wasserstoffstrategie.” Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/de/nationale-wasserstoffstrategie-9916.html>.
- [28] L.-I. Csepei and U. Schließmann, “Fraunhofer research for German-Moroccan hydrogen initiative,” *Fraunhofer IGB*. Jul. 29, 2020, Accessed: Aug. 06, 2020. [Online]. Available: <https://www.igb.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2020/memorandum-of-understanding-for-german-moroccan-hydrogen-initiat.html>.
- [29] W. Tong *et al.*, “Electrolysis of low-grade and saline surface water,” *Nature Energy*, vol. 5, no. 5, pp. 367–377, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0550-8.
- [30] A. M. Ali and D. Bartsch, “Ökologische Folgen und Kosten der Wasserstoffwirtschaft.” Deutscher Bundestag, 2020.
- [31] V. Milella *et al.*, “Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz.” DB Energie GmbH, 2020.
- [32] J. Wolf, “Die neuen Entwicklungen der Technik,” 2003.
- [33] Wissenschaftliche Dienste, “Grenzwerte für Wasserstoff (H₂) in der Erdgasinfrastruktur.” Deutscher Bundestag, 2019.
- [34] T. Jann, “Rolls-Royce setzt auf Forschung,” *Täglicher Hafenbericht*, vol. 165, p. 4, 2020.
- [35] M. Niermann, S. Timmerberg, S. Drünert, and M. Kaltschmitt, “Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110171, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110171.
- [36] L. Röntzsch and F. Heubner, “Hydride zur H₂-Speicherung.” 2020, Accessed: Sep. 16, 2020. [Online]. Available:

- <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Institutsprofil/Standorte/Dresden/Wasserstofftechnologie/hydride/hydride-zur-h2-speicherung.html>.
- [37] TÜV SÜD, "Speicherung von Wasserstoff." 2020, Accessed: Aug. 25, 2020. [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/speicherung-von-wasserstoff>.
- [38] M. Jendrischik, "Blue Crude: Sunfire produziert nachhaltigen Erdölersatz." 2017, Accessed: Sep. 17, 2020. [Online]. Available: <https://www.sunfire.de/de/unternehmen/news/detail/blue-crude-sunfire-produziert-nachhaltigen-erdoelersatz>.
- [39] H. Gruber *et al.*, "Fischer-Tropsch products from biomass-derived syngas and renewable hydrogen," *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jun. 2019, doi: 10.1007/s13399-019-00459-5.
- [40] F. I. Gallardo, A. M. Ferrario, M. Lamagna, E. Bocci, D. A. Garcia, and T. E. Baeza-Jeria, "A Techno-Economic Analysis of solar hydrogen production by electrolysis in the north of Chile and the case of exportation from Atacama Desert to Japan," *International Journal of Hydrogen Energy*, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.050.
- [41] J. Perner, M. Unteutsch, and A. Lövenich, "The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels." Agora Energiewende, 2018.
- [42] C. Piantieri, M. Westbroek, B. Probst, G. Flis, and K. Hunter, "Hydrogen in the Northwest European energy system." Aurora Energy Research, 2020.
- [43] T. Longva, Ø. Endresen, M. S. Eide, and Ø. Sekkesæter, "Maritime Forecast to 2050." DNV GL, 2020.
- [44] M. Jendrischik, "Trotz Wasserstoffstrategie: Große Power-to-X-Anlage von Norsk e-Fuel entsteht in Norwegen," *Cleanthinking.de*. Jendrischik PR, 2020, [Online]. Available: <https://www.cleanthinking.de/wasserstoffstrategie-powertox-norsk-e-fuel-norwegen/>.
- [45] M. Barrientos, "Kerosin monatlicher Preis - Euro pro Gallone," *IndexMundi*. 2020, Accessed: Sep. 28, 2020. [Online]. Available: <https://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=kerosin&monate=60&wahrung=eur>.
- [46] F. Hütten, "„Die Batterie ist kein guter Tank“,“ *Deutsche Verkehrs-Zeitung*, vol. 36, no. 3, 2020.
- [47] J. M. Larocca and R. B. Nielsen, "A proposal for an IMO-led global shipping industry decarbonisation programme." Trafigura, 2020.
- [48] K. Witsch, "Lieber Plastik als Zapfsäule – die Ölmultis ändern ihr Geschäftsmodell," *Handelsblatt*. 2018, Accessed: Sep. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/oelkonzerne-lieber-plastik-als-zapfsaeule-die-oelmultis-aendern-ihr-geschaeftsmodell/22700236.html>.
- [49] H. Buchter, "Plastik statt Benzin," *Zeit Online*. 2020, Accessed: Sep. 21, 2020. [Online]. Available: <https://www.zeit.de/2020/04/oelpreise-golfstaaten-usa-fracking-technologie-exxonmobil-plastikproduktion>.
- [50] P. Baheti, "How Is Plastic Made? A Simple Step-By-Step Explanation." British Plastics Federation, 2019, Accessed: Sep. 21, 2020. [Online]. Available: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/how-is-plastic-made.aspx#3>.
- [51] L. Weber, "Fahren mit Selbstgebranntem," *Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH*, 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/elektromobilitaet/wasserstoffauto-fahren-mit-selbstgebranntem-16958031.html>.
- [52] M. Robinius *et al.*, "Wege für die Energiewende," vol. 499. Forschungszentrum Jülich GmbH, 2020.

- [53] A. Breitkopf, "Höhe der CO₂-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018." 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/>.
- [54] A. Breitkopf, "Treibhausgasemissionen der deutschen Stahlindustrie* nach Gasen im Jahresvergleich 2000 und 2017." 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/477207/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-stahlindustrie-nach-gasen/>.
- [55] K. Straatmann, "Nationale Wasserstoffstrategie: Bundesnetzagentur zögert mit Genehmigung für Modellprojekte," *Handelsblatt*. Handelsblatt Media Group GmbH & Co. KG, 2020, Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/dekarbonisierung-nationale-wasserstoffstrategie-bundesnetzagentur-zoegert-mit-genehmigung-fuer-modellprojekte/26003580.html?nlayer=Themen_11804704&ticket=ST-3135086-NNlvbG2kGtBkD9HTRKUN-ap6.
- [56] T. Schwandt, "E-Antrieb – großes Thema für die kleineren Schiffe," *Täglicher Hafenbericht Sonderbeilage*, vol. No 8, pp. 7–8.
- [57] Gerd Holbach and Klaus-G. Lichtfuß, "Leuchtturmprojekt: ELEKTRA." 2019, Accessed: Oct. 20, 2020. [Online]. Available: <https://www.behala.de/elektra/>.
- [58] G.-M. Wuersig and A. Chiotopoulos, "In Focus - LNG as a Ship Fuel." DNV GL, 2015.
- [59] T. Jann, "Forschung für die Wasserstoff-Zukunft," *Täglicher Hafenbericht*, vol. 171, p. 13, 2020.
- [60] M. Stopford, "Coronavirus, Climate Change & Smart Shipping. Three maritime scenarios 2020 – 2050." Seatrade Maritime News, 2020.
- [61] B. Oldenburg, "ABB setzt auf Brennstoffzellen," *Täglicher Hafenbericht*, vol. No 72, p. 1.
- [62] A.-M. Causer and R. Jeffrey, "Hydrogen trucks to cut CO₂ in Europe," *GreenPort*. 2020, Accessed: Jul. 08, 2020. [Online]. Available: https://www.greenport.com/news101/energy-and-technology/hydrogen-trucks-to-cut-co2-in-europe?mkt_tok=eyJpIjoiTldGbE9HVmxNVGt5TmNMSlInQiOiJcL25lTG1LdmY4MG03ZzhLeUtMVG8rRFdoVHdrNEhydENnSjVMYXZXXC96YWpCbE94XC96R1RSNWJTNHJrSm12U3V3K2RieFf0ZGZUTm12OEJNUDZyaE.
- [63] McKinsey & Company, "Hydrogen-powered aviation." FuelCells and Hydrogen 2 JU, 2020, doi: 10.2843/471510.
- [64] Y. Ruf *et al.*, "Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment." Publications Office of the European Union, 2019, doi: 10.2881/495604.
- [65] Hydrogen Europe, "Position Paper on the Alternative Fuels Infrastructure Directive." Hydrogen Europe, 2020.
- [66] A. Breitkopf, "Jährlicher Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2019." 2020, Accessed: Oct. 02, 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558288/umfrage/stromverbrauch-einen-4-personen-haushalts-in-deutschland/>.



Institut für
Seeverkehrswirtschaft
und Logistik

