

PROJEKT „WASSERSTOFF ALS ALLHEILMITTEL?“

Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen

Jens Clausen



IMPRESSUM

KURZTITEL

Das Wasserstoffdilemma

AUTOR

Jens Clausen (Borderstep Institut)

M clausen@borderstep.de

VERLAG

© Borderstep Institut Juni 2022

VERBUNDKOORDINATION

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Dr. Klaus Fichter

Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)30 306 45 100-0 | www.borderstep.de

PROJEKTPARTNER

Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH | Potsdamer Str. 105 | 10785 Berlin

ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J. (2022). Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen. Berlin: Borderstep Institut.

TITELBILD

© Jens Clausen

FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt Wasserstoff als Allheilmittel? wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Förderprogramm INSIGHT – interdisziplinäre Perspektiven des gesellschaftlichen und technologischen Wandels, FKZ 16INS107A

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Management Summary	1
ANGEBOT UND BEDARF VON WASSERSTOFF	2
WASSERSTOFFPRIORITÄTEN	4
EMPFEHLUNGEN FÜR EINE NACHHALTIGE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT	5
1 Einleitung.....	6
2 Wasserstoff: Herstellung, Folgeprodukte, Klimawirkung, Kosten.....	7
2.1 Technologien für die Produktion von Wasserstoff.....	7
2.2 Wasserstoff, synthetisches Methan und synthetische Treibstoffe	9
2.3 Klimawirkung von Wasserstoff in der Atmosphäre.....	11
2.4 Kosten von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten	12
3 Die Entwicklung der Wasserstoffpolitik.....	16
3.1 Die Wasserstoffstrategie der EU-Kommission	16
3.2 Die Wasserstoffstrategie der großen Koalition 2020	17
3.3 Wasserstoffstrategie im Koalitionsvertrag der Ampel 2021	19
3.4 Die Wasserstoffstrategien der Bundesländer	20
4 Die voraussichtliche Entwicklung der Potenziale und Bedarfe an grünem Wasserstoff. 23	
4.1 Die Wasserstoffwirtschaft heute.....	23
4.2 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff	25
4.2.1 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff weltweit.....	25
4.2.2 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff in Europa	26
4.2.3 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff in Deutschland.....	27
4.3 Bedarfe an Wasserstoff in Europa.....	28
4.4 Bedarfe an Wasserstoff in Deutschland	30
5 Konkurrierende Innovationspfade	32
5.1 PKW: Elektrifizierung versus Wasserstoff	32
5.2 Lieferfahrzeuge, LKWs und Busse: Elektrifizierung versus Wasserstoff.....	38

Das Wasserstoffdilemma

5.3 Eisenbahnen: Elektrifizierung versus Wasserstoff	39
5.4 Wärmeversorgung von Gebäuden: Elektrifizierung versus Wasserstoff oder wasserstoffbasiertes Methan und Biomasse	42
5.5 Schifffahrt: Segeln und Elektrifizierung versus wasserstoffbasierte Flüssigtreibstoffe	47
5.6 Industrielle Prozesswärme: Elektrifizierung versus Biomasse oder Wasserstoff.....	50
5.7 Flugverkehr: Wasserstoff versus Sustainable Air Fuel oder Suffizienz.....	52
5.8 Exkurs: Volkswirtschaftliche Suffizienz.....	53
6 Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Wasserstoffpolitik	55
6.1 Wasserstoff für eine effiziente Energieversorgung.....	55
6.2 Skizzierung einer Wasserstoffwirtschaft	58
6.2.1 Wasserstoffbedarf in den verschiedenen Anwendungsfeldern	58
6.2.2 Anwendungsfelder, die wahrscheinlich mit Wasserstoff versorgt werden.....	60
6.2.3 Anwendungsfelder, in denen die Energieversorgung mit Wasserstoff unsicher ist.....	61
6.3 Überblick über Anwendungsfelder.....	62
Quellen.....	64
Anhang.....	76

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Wasserstoffbedarfe (farbig) und mögliche grüne Wasserstoffproduktion und Import (grau).....	2
Abbildung 2: Sinnvolle, weniger sinnvolle und unsichere Anwendungsfelder von Wasserstoff.....	3
Abbildung 3: Vereinfachter Überblick über ein kohlenstoffarmes Energiesystem.....	10
Abbildung 4: Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten ausgehend von erneuerbar erzeugtem Strom.....	10
Abbildung 5: Einzel- und Gesamtwirkungsgrade unterschiedlicher Heizungssysteme ausgehend von erneuerbar erzeugtem Strom	11
Abbildung 6: Wasserstoff-Produktionskosten in \$/kg	13
Abbildung 7: Annualisierte Investitionskosten (linke Balken) und Brennstoffimportkosten (rechte Balken) in drei Szenarien, 2021-2050, in Mrd. Euro	14
Abbildung 8: Project Pipeline der European Clean Hydrogen Alliance	17
Abbildung 9: Wasserstofferzeugung in der Europäischen Union bis 2030	26
Abbildung 10: Wasserstofferzeugung in der Europäischen Union bis 2050	27
Abbildung 11: Wahrscheinliche Sektoren der Wasserstoffnutzung in der Europäischen Union in 2050	29
Abbildung 12: Spekulative Sektoren der Wasserstoffnutzung in der Europäischen Union bis 2050 ...	30
Abbildung 13: Vergleich der durchschnittlichen Wärmegestehungskosten für die Wärmeversorgung in einem Einfamilienhaus.....	44
Abbildung 14: Nutzung von holzartigen Festbrennstoffen in deutschen Haushalten	46
Abbildung 15: Green Sailer der Hochschule Leer.....	49
Abbildung 16: Leistungsflüsse für die Bereitstellung von Energieträgern im Programm „Renewable Lower Saxony“	56
Abbildung 17: Verluste bei der Umwandlung von Strom in mechanische Energie	57
Abbildung 18: Verluste und Gewinne bei der Umwandlung von Strom in Raumwärme	57
Abbildung 19: Wasserstoffbedarfe (farbig) und mögliche grüne Wasserstoffproduktion und Import (grau).....	59
Abbildung 20: Auf die Anwendungen bezogene Erscheinungsformen von Wasserstoff.....	60
Abbildung 21: Sinnvolle, weniger sinnvolle und unsichere Anwendungsfelder von Wasserstoff.....	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wasserstoff-Bedarfsfelder aufgeführt in den Strategien der Bundesländer	21
Tabelle 2: Determinanten der Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten (Öko-Institut)	30
Tabelle 3: Zulassungszahlen Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle 2015 bis 2021.....	33
Tabelle 4: Fahrzeugzulassungen im Jahr 2021	33
Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Wasserstoffautos.....	35

MANAGEMENT SUMMARY

Heute ist klar, dass die Wasserstoffwirtschaft kommt. Über die beiden geplanten LNG-Terminals an der Nordseeküste, die „Wasserstoff- und Ammonik-ready“ sein werden hinaus, werden LNG- und Wasserstoff-Kooperationen in Katar und Abu Dhabi angebahnt. Seit Jahren wird die Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse in Deutschland gefördert und 32 % der Deutschen wünschen sich noch Anfang 2022 Wasserstoff-Autos, trotz eines fast vollständig fehlenden Angebots. Wasserstoff als reichhaltig vorhandener und sauberer Energieträger der Zukunft hat ohne Zweifel eine erhebliche Strahlkraft. Aber es ist nicht nur Aufgabe der Politik, positive Visionen wie die einer grünen Transformation, sondern auch realistische Transformationspfade mit aller gebotenen Vorsicht und Vorausschau zu entwickeln. Was heißt dies mit Blick auf Wasserstoff?

- (1) Es gibt gegenwärtig ohne Zweifel einen **Wasserstoff-Hype**. Wasserstoff wird von Vielen als Energiequelle der Zukunft gesehen und soll nicht nur in der Industrie und als Energiespeicher, sondern auch im Verkehr und der Wärmeversorgung viele Aufgaben übernehmen, für die bisher fossile Energien wie Erdgas und Öl genutzt wurden. Studien, die die Verfügbarkeit von großen Mengen an Wasserstoff versprechen, befördern diesen Hype.
- (2) Aber es wird dabei oft vergessen, dass Wasserstoff nur ein Energieträger ist. Große Mengen grünem Wasserstoff zu erzeugen erfordert eine noch deutlich größere Menge an regenerativem Strom. Und sowohl der Aufbau der notwendigen regenerativen Stromerzeugung wie auch der Elektrolysekapazitäten wird Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Dabei spielt es nur eine begrenzte Rolle, ob dieser Aufbau in Deutschland oder in anderen Ländern erfolgt, aus denen dann Wasserstoff importiert werden kann. Zahlreiche Studien versuchen, **das zukünftige Angebot an Wasserstoff** zu quantifizieren. Aber da die Entwicklung noch ganz am Anfang steht, unterscheiden sich die Ergebnisse erheblich und es ist heute noch sehr unsicher, wieviel Wasserstoff bis 2030, bis 2040 oder bis 2050 wirklich zur Verfügung stehen wird.
- (3) Eine **Vielzahl von Anwendungsbereichen für Wasserstoff** wurde vorgeschlagen. In einigen dieser Anwendungsbereiche ist der Einsatz von Wasserstoff alternativlos, in anderen steht der Energieträger Wasserstoff im Wettbewerb mit anderen Energieträgern, meist mit dem Einsatz von Strom. Zwischen den konkurrierenden Lösungen gibt es große Unterschiede bei der Effizienz der Nutzung der Primärenergie wie auch bei den Kosten. Auch mit Blick auf die Anwendungsbereiche gibt es zahlreiche Studien, die sehr unterschiedliche Bedarfsmengen vorhersagen.
- (4) Letztlich besteht heute eine große Unsicherheit, ob alle vorgeschlagenen Bedarfe befriedigt werden können (vgl. Abbildung 1). Um auch in der sich entwickelnden Wasserstoffwirtschaft eine **hohe Versorgungssicherheit** und möglichst niedrige Kosten der Endenergie zu erreichen, ist es daher naheliegend, Wasserstoff zunächst dort einzusetzen, wo er unverzichtbar ist oder wo er besonders große ökologische und ökonomische Vorteile verspricht. Solche Anwendungsfälle zeichnen sich bereits ab (vgl. Abbildung 2). In anderen Bereichen ist Wasserstoff dagegen eher eine aufwendige und teure Notlösung. Wasserstoff sollte daher auch aufgrund seines Beitrags zum Treibhauseffekt nur dort eingesetzt werden, wo es keine anderen Lösungen gibt.

Die vorliegende Studie ist Teil des Projektes „Wasserstoff als Allheilmittel? Richtungssicherheit für Schlüsselentscheidungen über alternative Transformationspfade – INSIGHTS für die Politikgestaltung“, welches das Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit und das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung in den Jahren 2022 und 2023 bearbeiten. Dieser erste Bericht des Projek-

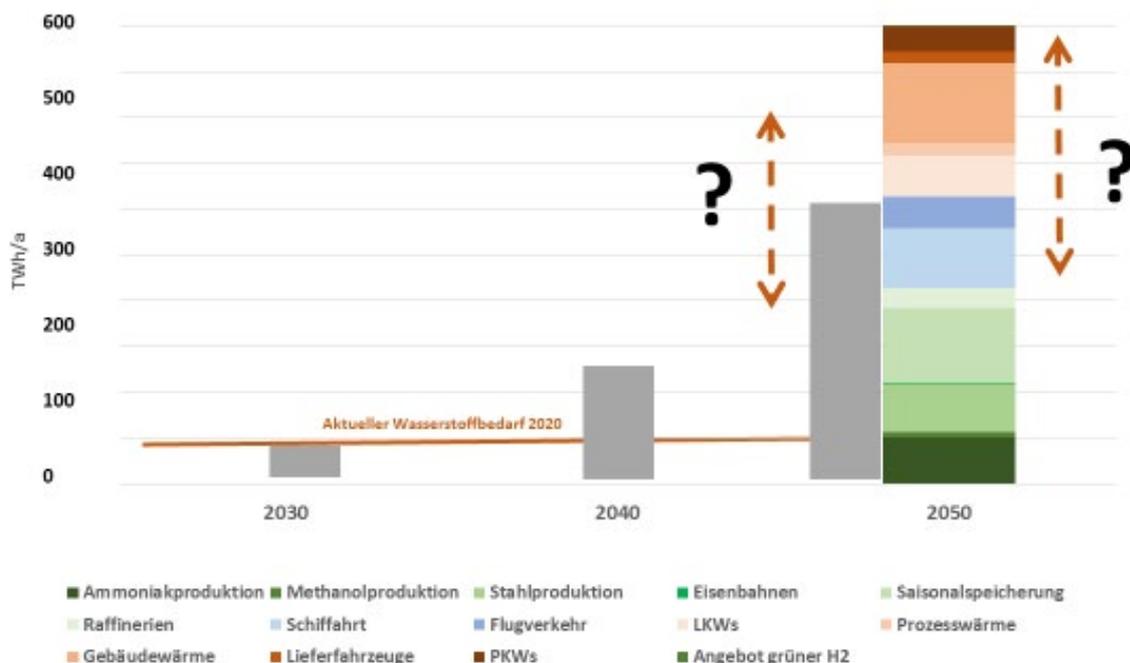
Das Wasserstoffdilemma

tes zielt auf die Beantwortung der ersten Forschungsfrage des Projektes: „In welchem Ausmaß übersteigt die intendierte Nutzung von Wasserstoff in den Anwendungsfeldern Industrie, Wärme, Strom und Verkehr die voraussichtlich mögliche nationale und globale (Importe) Produktion von grünem Wasserstoff im Zeitverlauf?“ Um diese Frage beantworten zu können, ist ein Blick auf die Wasserstoffpolitiken der Europäischen Union und von Deutschland notwendig, da diese die sich entwickelnden Potenziale zur Herstellung von Wasserstoff stark beeinflussen. Auch eine Betrachtung der konkurrierenden Innovationspfade ist notwendig, da nur durch eine systematische Kontextualisierung die Wahrscheinlichkeit des Einsatzes von Wasserstoff in den einzelnen Anwendungsbereichen eingeschätzt werden kann.

ANGEBOT UND BEDARF VON WASSERSTOFF

Um eine richtungssichere Wasserstoffpolitik zu entwickeln, sollte sowohl die mögliche Erzeugung als auch der erwartete Verbrauch von Wasserstoff im Auge behalten werden, um beides aufeinander abzustimmen. Die folgende Abbildung 1 basiert im Kern auf den höheren Abschätzungen der Wasserstoff-Bedarfe nach Zachmann et al. (2021, S. 72). Deutschland wird jeweils 24 % der für Europa geschätzten Mengen zugeschlagen. Zusätzlich ist für 2050 ein Bedarf von Wasserstoff für die Stabilisierung der Stromerzeugung von 400 TWh in Europa (Zachmann et al., 2021, S. 81) berücksichtigt. Das Wasserstoff-Angebot, Produktion und mögliche Importe, folgt den Überlegungen aus einer Studie des Öko-Instituts (2021). Beide Studien sind sorgfältig erstellte und aktuelle Metastudien, die aus unserer Sicht die Frage nach den Mengen und Größenordnungen so gut wie gegenwärtig möglich beantworten.

Abbildung 1: Wasserstoffbedarfe (farbig) und mögliche grüne Wasserstoffproduktion und Import (grau)



Quelle: Borderstep, Gegenüberstellung auf Basis von Zahlen von Zachmann et al. (2021) sowie Öko-Institut (2021) unter Hinweis auf grundsätzliche Unsicherheiten (Fragezeichenbereiche)

Das Wasserstoffdilemma

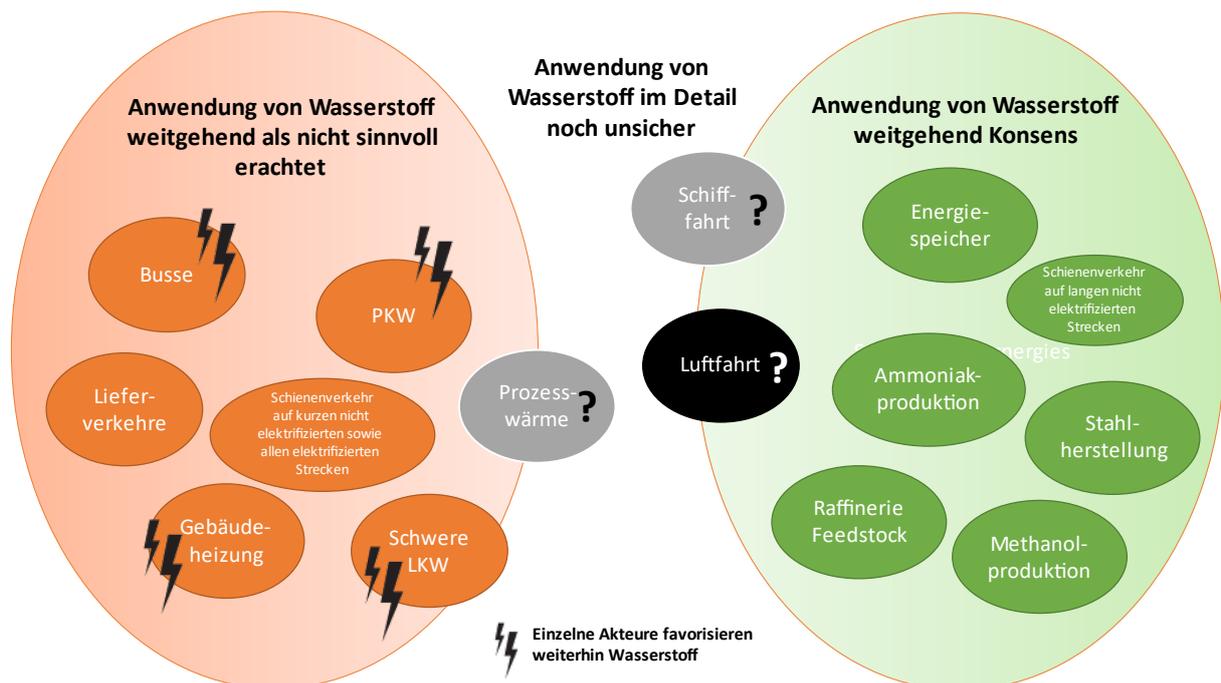
Bezieht man auch den bereits bestehenden Wasserstoffbedarf der Wirtschaft mit ein wird klar, dass kurz- und mittelfristig nur vergleichsweise kleine Mengen an Wasserstoff erzeugt und verbraucht werden können.

Mit Blick auf das in der Umwelt-, Gesundheits- und Sozialpolitik etablierte Vorsorgeprinzip scheint es daher geboten, zunächst vorsichtig eher von einer Knappheit von Wasserstoff auszugehen. Dabei sollte für die zukünftigen Anwendungsbereiche aber nicht nur eine minimale Verbrauchsmenge angenommen werden, so dass die sich in den prioritären Sektoren entwickelnde Wasserstoffwirtschaft darauf bauen kann, dass für die entstehenden Verbraucher auch wirklich Wasserstoff verfügbar sein wird und eine hohe Versorgungssicherheit gegeben ist.

Aus heutiger Sicht können schon einige Anwendungen identifiziert werden, für die die zukünftige Anwendung von Wasserstoff in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft weitgehend Konsens ist (grün hinterlegt in Abbildung 2). In anderen Anwendungen wird die Nutzung von Wasserstoff als kritisch bzw. unwirtschaftlich gesehen, wobei einzelne Akteure weiterhin Wasserstoff favorisieren (rot hinterlegt in Abbildung 2).

Insbesondere für Anwendungen in der industriellen Prozesswärme, in der Schifffahrt und der Luftfahrt ist das Rennen zwischen Wasserstoff und seinen Wettbewerbstechnologien noch offen.

Abbildung 2: Sinnvolle, weniger sinnvolle und unsichere Anwendungsfelder von Wasserstoff



Quelle: Borderstep

Entwickelt sich die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff besser als angenommen, ließen sich Anwendungen, z.B. im Bereich des Verkehrs oder der Wärmeversorgung, später ausweiten. Plant die Wasserstoffpolitik diese Anwendungen aber von vornherein fest ein und erreicht die Wasserstoffverfügbarkeit dann doch nicht das hierfür erforderliche Ausmaß, dann droht der Lock-in in eine dauerhafte Nutzung von fossilen Energien, was aus Gründen der Klimapolitik unbedingt zu vermeiden ist.

WASSERSTOFFPRIORITÄTEN

Die Wasserstoffpolitik setzt in Deutschland von zwei Seiten an. Zum einen postuliert und fördert sie generell eine Wasserstoffwirtschaft, z.B. mit Blick auf Elektrolyse von grünem Wasserstoff sowie im Bereich der Transportinfrastrukturen oder bestimmter Anwendungen, zum anderen setzt die neue Ampelkoalition schon im Koalitionsvertrag besonders dort Grenzen, wo eine effizientere Alternative in Form einer möglichen Elektrifizierung vorhanden ist. Diese Grenzen werden besonders bei Anwendungen wie Wärmeversorgung oder beim Antrieb von Fahrzeugen praktische Auswirkungen haben.

Denn Wasserstoff als Brennstoff kann mit Blick auf die Nutzungseffizienz von Primärenergie (grünem Strom) weder mit der Wärmepumpe beim Heizen noch mit dem Elektromotor beim Antrieb von Fahrzeugen konkurrieren. Selbst bei der Bereitstellung industrieller Prozesswärme sparen direkte elektrische Lösungen bis zu 30 % der nötigen Erzeugung von grünem Strom. Sehr deutlich ist der Unterschied bei der Raumwärme. Um 1 kWh Raumwärme zu erzeugen wird auf dem Umweg über Wasserstoff und eine Wasserstofftherme ca. 1,4 kWh grüner Strom benötigt. Wird zum Heizen dagegen eine Wärmepumpe eingesetzt, benötigt man nur ca. 0,33 kWh grünen Strom für 1 kWh Wärme.

Die Verantwortung der Technologie- und Energiepolitik liegt nun primär darin, Fehlinvestitionen, „sunk cost“ und damit verbundene Pfadabhängigkeiten und „Sackgassen“ zu vermeiden, also Investitionen in Technologien und Infrastrukturen, die sich langfristig nicht als sinnvoll herausstellen. Ein Beispiel einer solchen verlorenen Investition wäre z.B. die Umrüstung des Erdgas-Verteilnetzes auf Wasserstoff, nur um hinterher festzustellen, dass die Menschen die letztlich gegenüber Strom 4-mal so große und teure (Primär-)Energienmenge in Form von Wasserstoff aufgrund des Preises doch nicht kaufen und sich für eine strombasierte Heizung mit Wärmepumpe entscheiden. Im PKW-Segment ist die Lage einfacher: Mit Ausnahme von Toyota haben alle PKW-Hersteller die Entwicklung der Brennstoffzelle für den PKW bereits eingestellt oder sind dabei, dies zu tun. Ähnlich ist die Lage bei Bussen und Lieferfahrzeugen, bei denen die Wasserstofftechnologie schon heute fast nur noch in Presseartikeln eine Rolle spielt, aber nicht in den Zulassungszahlen.

Die zweite Dimension der Verantwortung der Technologie- und Energiepolitik liegt darin, angesichts der Aussicht auf reichlich grünen Wasserstoff ein „crowding-out“ der Entwicklung alternativer Technologien zu vermeiden. Diese Gefahr scheint gegenwärtig beim Segelantrieb von Seeschiffen wie auch bei der Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung zu bestehen.

Der Blick auf die Wasserstoffpolitik der Europäischen Union lässt erkennen, dass die zentralen Aufgaben rund um Wasserstoffproduktion, Transport und industrielle Anwendungen sowie zur Stabilisierung der Stromversorgung im Mittelpunkt stehen. Auch die neue deutsche Bundesregierung setzt mit ihrer Priorität für die Elektrifizierung klare Zeichen auf eine ähnliche Priorisierung der verbleibenden Anwendungen für Wasserstoff.

Letztlich aber ist die Debatte um die Nützlichkeit von Wasserstoff für jeden Anwendungsfall einzeln zu führen und kritisch zu beleuchten. Prozesswärme, Schifffahrt, Eisenbahnen, LKW und Flugzeuge: Überall sind die Herausforderungen unterschiedlich. Die Politik sollte aber auch erkennen, wo aus technischen, naturwissenschaftlichen oder ökonomischen Gründen sich eine Lösung für oder gegen den Wasserstoff abzeichnet und vermeiden, selbst der Illusion von Wasserstoff als Universalenergie zu erliegen.

EMPFEHLUNGEN FÜR EINE NACHHALTIGE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Eine Reihe von Fakten, die die Studie identifiziert, wirft Fragen auf, die uns für eine richtungssichere Technologie- und Energiepolitik von Bedeutung erscheinen:

- (1.) Eine nicht unerhebliche Treibhauswirkung geht vom Gas Wasserstoff selbst aus. Da Wasserstoff das kleinste aller Moleküle ist, sind Leckagen, wie sie auch bei Methan eine bisher unterschätzte Rolle spielen, ein potenziell erhebliches Problem. **Nicht nur aus Gründen der Effizienz, sondern auch aus Gründen des Klimaschutzes sollte daher die Anwendung von elementarem Wasserstoff auf das unbedingt notwendige Minimum reduziert werden.**
- (2.) Für den Flugverkehr ist aus Wasserstoff hergestelltes sogenanntes Sustainable Air Fuel (SAF) nur ein kleiner Lösungsbeitrag, der die Treibhauswirkung des Luftverkehrs nur um ca. ein Drittel reduziert. Die Vorstellung, die Luftfahrt auch zukünftig durch Verbrennungsmotoren in großer Höhe anzutreiben, ist klimawissenschaftlich zweifelhaft. Denn das Problem ist nur zu einem Drittel die Treibstoffherstellung, zu zwei Dritteln liegt es darin, dass Abgase aus der Verbrennung in großer Höhe in der Stratosphäre weit schädlicher sind als am Boden. Dies gilt in der Stratosphäre im Übrigen auch für Wasser als „Abgas“ der Wasserstoff-Brennstoffzelle. Auch Wasseremissionen würden in großer Höhe erheblich zum Treibhauseffekt beitragen. **Eine richtungssichere, auf Klimaschutz orientierte Technologiepolitik rund um die Luftfahrt sollte daher auf die Verbrennung von Flugzeugtreibstoffen so weit wie möglich verzichten und stattdessen andere Möglichkeiten zum klimaneutralen Fliegen erkunden – oder das Fliegen insgesamt reduzieren.**
- (3.) Von Jahr zu Jahr deutet mehr darauf hin, dass sich die effiziente Elektrifizierung des Straßenverkehrs deutlich schneller und dynamischer entwickelt als die Umstellung auf die Wasserstoff-Brennstoffzelle. Die Nützlichkeit des Aufbaus eines Wasserstoff-Tankstellennetzes wird damit zweifelhaft. **Durch eine klare Entscheidung für die Elektrifizierung und gegen den weiteren Ausbau des Wasserstoffantriebs mit Brennstoffzellen sollten Staat und Wirtschaft hohe und vielleicht letztlich wenig nützliche Fehlinvestitionen erspart werden.**
- (4.) Ähnlich könnte eine richtungssichere Politik Klarheit in Bezug auf die langfristige Stilllegung des Erdgasverteilnetzes schaffen. Die einschlägigen wissenschaftlichen Studien favorisieren in seltener Einmütigkeit mit Blick auf die künftige Raumwärmeversorgung die Elektrifizierung. Ausnahmen gibt es primär in Form von Studien, die durch die Erdgasbranche beauftragt wurden. Die Bundespolitik setzt in Form der Priorisierung der Elektrifizierung und der geplanten Aktivitäten zur Förderung der Wärmepumpe bereits Akzente. **Durch eine systematische Exnovationspolitik, die auf das Ende von Gas- und Ölheizungen gerichtet ist (wie sie sich seit März 2022 abzeichnen beginnt) sollte die Wärmewende nochmals beschleunigt werden.**
- (5.) Weiter fehlt eine Politik der wirtschaftspolitischen Suffizienz. Es ist beispielhaft zu konstatieren, dass ein technologisches Konzept für einen klimawissenschaftlich tolerierbaren Luftverkehr fehlt. Die einzige klimawissenschaftlich logische politische Reaktion darauf wäre, den Luftverkehr systematisch so weit als möglich zu reduzieren. Und auch die Frage, ob es klimapolitisch und technologisch sinnvoll ist, den Personen- und Güterverkehr insgesamt weiter ungebremst wachsen zu lassen oder aber systematisch auf dessen Reduktion hinzuwirken, ist offen. Auch im Feld der Wärmewende fehlt die systematische Infragestellung der Notwendigkeit einer immer weiterwachsenden Wohnfläche pro Person. **Durch das Konzept der wirtschaftspolitischen Suffizienz sollten die die Strategien der Effizienz und der Konsistenz wirksam ergänzt werden.**

Die Frage, wie der sozioökonomische Strukturwandel in eine aus Sicht des Klimaschutzes vernünftige Richtung gelenkt werden kann, ist damit in vielen Feldern eine Herausforderung für die Wasserstoffpolitik.

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist Teil des Projektes „Wasserstoff als Allheilmittel? Richtungssicherheit für Schlüsselentscheidungen über alternative Transformationspfade – INSIGHTS für die Politikgestaltung“, welches das Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit und das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung in den Jahren 2022 und 2023 bearbeiten.

Das Projekt „Wasserstoff als Allheilmittel?“ zielt darauf zu ermitteln, in welchen Anwendungsbereichen Wasserstoff zur Erreichung der Klimaziele sinnvoll erscheint und in welchen Anwendungsbereichen eine Fokussierung auf Wasserstoff ein Crowding-out alternativer und effizienterer Technologien befürchten lässt. Ergänzend stellt sich die Frage, in welchen Anwendungsbereichen möglicherweise vergebliche Investitionen zu befürchten sind, die sich langfristig als wenig nützlich herausstellen könnten.

So könnte z.B. die Aussicht auf Wasserstoff und seine Folgeprodukte (Methanol, Methan, Sustainable Air Fuel usw.) dazu führen, dass in der Schifffahrt mit Blick auf den Antrieb durch große Verbrennungsmotoren ein „weiter so“ den Pfad bestimmt und eine konsequente Entwicklung von möglichen Segelantrieben überhaupt nicht erfolgt (Crowding-out). Und genauso wäre es möglich, dass hohe Summen in den Ausbau eines Wasserstoff-Tankstellenetzes investiert werden, welches später dann kaum genutzt wird und so zu verlorenen Investitionen führt (sunk investments).

Das vorliegende Arbeitspapier zielt auf die Beantwortung der ersten Forschungsfrage des Projektes: „In welchem Ausmaß übersteigt die intendierte Nutzung von Wasserstoff in den Anwendungsfeldern Industrie, Wärme, Strom und Verkehr die voraussichtlich mögliche nationale und globale (Importe) Produktion von grünem Wasserstoff im Zeitverlauf?“

Um diese Frage zu beantworten sind eine Reihe von Themen zu behandeln:

- ▶ In Kapitel 2 werden zunächst die verschiedenen Technologien zur Herstellung von Wasserstoff auf Basis fossiler und regenerativer Energien vorgestellt. Weiter wird ein Überblick über die in der Wasserstoffwirtschaft wichtigen Folgeprodukte, die Klimawirkung von Wasserstoff sowie die Kosten gegeben.
- ▶ Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Wasserstoffpolitik in Europa, Deutschland und seinen Bundesländern.
- ▶ Kapitel 4 stellt die Pläne und Perspektiven für die Produktion von grünem Wasserstoff weltweit, in Europa und in Deutschland dar.
- ▶ Konkurrierende Innovationspfade sind Gegenstand der Analysen in Kapitel 5.
- ▶ Kapitel 6 fasst die Erkenntnisse in Form von Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Wasserstoffpolitik zusammen.

2 Wasserstoff: Herstellung, Folgeprodukte, Klimawirkung, Kosten

Dieses Kapitel stellt die verschiedenen Technologien zur Herstellung von Wasserstoff auf Basis fossiler und regenerativer Energien vor. Weiter wird ein Überblick über die in der Wasserstoffwirtschaft wichtigen Folgeprodukte, die Klimawirkung von Wasserstoff sowie die in Zukunft zu erwartenden Preise und Kosten von Wasserstoff gegeben.

2.1 Technologien für die Produktion von Wasserstoff

Wasserstoff kommt als energetisch nutzbares Gas (H₂) kaum natürlich auf der Welt vor, sondern muss künstlich hergestellt werden. Bis in die Gegenwart erfolgte die Wasserstoffproduktion aus fossilen Rohstoffen, z.B. durch Dampfreformation von Erdgas oder aus Kohle. Bei dieser Art der Herstellung entsteht sogenannter grauer Wasserstoff. Die Wasserstoffstrategie definiert im Glossar vier Farben von Wasserstoff (BMW, 2020, S. 29):

Grauer Wasserstoff: Grauer Wasserstoff basiert auf dem Einsatz von fossilen Kohlenwasserstoffen. Maßgeblich für die Produktion von grauem Wasserstoff ist die Dampfreformierung von Erdgas. Seine Erzeugung ist – abhängig vom eingesetzten fossilen Ausgangsstoff – mit erheblichen CO₂-Emissionen verbunden.

Blauer Wasserstoff: Als blauer Wasserstoff wird Wasserstoff bezeichnet, dessen Erzeugung mit einem CO₂-Abscheidungs- und -Speicherungsverfahren gekoppelt wird (engl. 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: Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt. Unabhängig von der gewählten Elektrolýsetechnologie erfolgt die Produktion von Wasserstoff CO₂-frei, da der eingesetzte Strom zu 100 Prozent aus erneuerbaren Quellen stammt und damit CO₂-frei ist.

Türkiser Wasserstoff: Als „türkiser Wasserstoff“ wird Wasserstoff bezeichnet, 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 oder CO₂-neutralen Energiequellen sowie die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs.

Als weitere Farben tauchen in der Literatur als Varianten des fossilen grauen Wasserstoffs die Begriffe schwarzer Wasserstoff aus Steinkohle und brauner Wasserstoff aus Braunkohle auf.

Aber die bisherige Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas ist in einer „dekarbonisierten Welt“ kein geeignetes Verfahren mehr. Gegenwärtig wird daher eine Reihe von Verfahren entwickelt und optimiert, bei denen Wasserstoff unter Einsatz von regenerativem Strom und durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt wird. Auch die deutsche Wasserstoffstrategie sieht langfristig ausschließlich die Nutzung grünen Wasserstoffs vor.

Das Wasserstoffdilemma

Hierfür gibt es mehrere grundsätzlich geeignete Typen von Elektrolyseuren (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH, 2018, S. 31ff):

- ▶ Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM),
- ▶ Alkalische Elektrolyse (AEL),
- ▶ Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL).

Die alkalische Elektrolyse ist ein ausgereiftes Verfahren mit einem Technology Readiness Level (TRL) von 9 (Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE, 2019, S. 12). Die PEM-Elektrolyse (TRL 6-8) wurde in den letzten zehn Jahren intensiv weiterentwickelt, da sie als besonders geeignet für die Kopplung mit erneuerbaren Energiequellen gilt (Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE, 2019, S. 13). Die Hochtemperatur-Elektrolyse ist noch nicht serienreif (TRL 4-6) und es liegt noch keine breite Feldtesterfahrung vor. Sie weist im Vergleich zu PEM und AEL einen deutlich besseren elektrischen Wirkungsgrad auf, aber nur, wenn vor Ort Abwärme auf einem Temperaturlevel von 200 °C oder höher verfügbar ist.

PEM und AEL erlauben sehr schnelle An- und Abfahrvorgänge und können so im Stromnetz als flexible Lasten genutzt werden (Fraunhofer ISE, 2020, S. 29). Sie können das Potenzial für die Integration von erneuerbarem Strom in das Energiesystem erhöhen. Aber das An- und Abfahren von Elektrolyseanlagen führt dazu, dass diese nicht durchgängig 24/7 betrieben werden. Sie erzielen damit über einen längeren Zeitraum nicht den maximalen Output, sondern dieser sinkt abhängig von der Zahl real erzielter Betriebsstunden.

Bei allen Elektrolyseuren fällt neben dem Wasserstoff abhängig vom Wirkungsgrad Abwärme an, meist auf einem Temperaturniveau von 55 °C bis 60 °C. Mit Blick auf die zukünftige Wärmeversorgung ohne Erdgas und Heizöl wird es nützlich sein, Elektrolyseure als wichtige Wärmequelle zu betrachten und an geeigneten Orten, an denen eine Wärmenutzung möglich ist, aufzustellen.

Der Zusammenhang von installierter Elektrolyseleistung und Wasserstoff Output wird in der Wasserstoff-Roadmap (Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE, 2019, S. 12) wie folgt charakterisiert:

- ▶ Elektrolyseleistung: 1 GW
- ▶ Stromverbrauch der Elektrolyse: 1 GWh/h bzw. 8.760 GWh/a (24/7)
- ▶ Produktionskapazität: 20 t H₂/h bzw. 175.000 t H₂ p.a. (24/7)
- ▶ Energiegehalt Wasserstoff: 714 MWh/h bzw. 5,83 TWh/a (24/7)
- ▶ Wasserstoff-Wirkungsgrad: 71,4 %

Über die Erzeugung von Wasserstoff hinaus weisen Hanke-Rauschenbach und Peterssen auch auf die Bedeutung der energetischen Nutzung der Abwärme aus der Elektrolyse hin (Hanke-Rauschenbach & Peterssen, 2021, S. 29). Bezogen auf eine Elektrolyseleistung von 1 GW ergibt sich damit für die Abwärmenutzung:

- ▶ Nutzbare Abwärme ca. 20 % der elektrischen Eingangsleistung, also 200 MWh/h bzw. 1,75 TWh/a
- ▶ Abwärme-Wirkungsgrad: 20 %

Wie hoch die Wirkungsgrade der Anlagen zukünftig sein werden, ist noch unklar. Tjarks (2017, S. 27) dokumentiert für aktuelle PEM-Elektrolyseure Wirkungsgrade zwischen 53 % und 71 % und zeigt eine Reihe von Abhängigkeiten z.B. zur Stromdichte, vom Druckniveau oder der Frage, ob der Elektroly-

Das Wasserstoffdilemma

seur oder die Gesamtanlage betrachtet wird, auf, die den Wirkungsgrad im praktischen Betrieb bestimmen (Tjarks, 2017, S. 105). Tjarks (2017, S. 110) weist aber auch auf Widersprüche zwischen dem Ziel eines hohen Wirkungsgrades und dem Ziel der Begrenzung der Investitionskosten hin:

Durch die Druckanhebung zur Reduzierung der Investitionskosten wird der Elektrolyseur nicht mehr im optimalen Bereich betrieben, wodurch die Betriebskosten ansteigen. Durch eine Druckerhöhung vom optimalen Druckniveau auf 30 bar wird der Wirkungsgrad der Gesamtanlage um etwa 3 Prozentpunkte gesenkt. Eine wirtschaftliche Betrachtung kann somit durchaus sinnvoll sein, um ein ökonomisches Optimum definierten zu können.

Diesen Zusammenhang betont auch die NOW (2018, S. 36): „Aktuell befindet sich die PEM-Elektrolyse in einer ökonomischen „Aufholjagd“ gegenüber der alkalische Elektrolyse, so dass im Zweifel zugunsten niedriger CAPEX ein hoher Wirkungsgrad nicht im Fokus steht.“ Die NOW (2018, S. 36) dokumentiert als Stand der Technik Wirkungsgrade von ca. 54 % für die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse und 58 % für die alkalische Elektrolyse. Die noch besseren Werte für die Hochtemperatur-Elektrolyse sind dagegen nicht aussagefähig, da die zusätzlich benötigte 200 °C Wärme nicht quantifiziert und bei der Errechnung des Wirkungsgrades nicht einbezogen wird. Für große Anlagen der 10 bis 100 MW-Klasse erwartet die NOW in 2050 Wirkungsgrade von ca. 60 % für die Bauarten PEM und AEL, bezogen auf den Heizwert.

Zukünftiger Wirkungsgrad der Elektrolyse

Die in verschiedenen Szenarien zu Grunde gelegten hohen Wirkungsgrade der Wasserstoff-Elektrolyse sollten nicht als selbstverständlich angenommen werden. Der Ausbaupfad der notwendigen EE-Energieerzeugung sollte sich eher an konservativen Erwartungen zur Steigerung der Wirkungsgrade orientieren und neben technischen Optima ökonomische Perspektiven einbeziehen.

Die in den letzten Jahren weltweit errichteten Anlagen hatten bis zum Jahr 2019 eine Nennleistung von nur wenigen MW (IEA, 2019, S. 45; IRENA, 2019, S. 13). Die für die frühen zwanziger Jahre geplanten Anlagen werden jedoch deutlich größer sein und ab dem Jahr 2022 eine Nennleistung von über 100 MW erreichen (IRENA, 2019, S. 13).

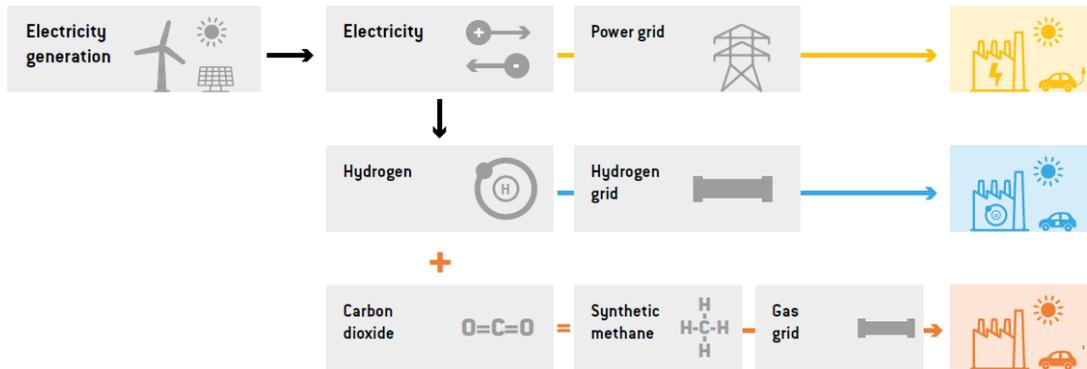
2.2 Wasserstoff, synthetisches Methan und synthetische Treibstoffe

Aus Wasserstoff können Folgeprodukte wie Ammoniak (NH_3), Methanol (CH_3OH) oder Methan (CH_4) hergestellt werden. Der Grund für die Umwandlung von Wasserstoff in diese Produkte ist, dass sie teils in der chemischen Industrie in genau dieser Form benötigt werden (z.B. für Ammoniakdünger) oder, dass sie in dieser Form besser und einfacher zu transportieren sind. Auch als Zwischenprodukte für die Herstellung flüssiger regenerativer Kraftstoffe spielen diese Stoffe eine Rolle. Wenn diese Produkte auf Basis von (erneuerbarem) Strom synthetisch erzeugt werden, wird auch übergreifend von Power-to-X (PtX).

Wasserstoff kann damit als Ausgangsstoff für die Produktion weiterer künstlich hergestellter Brennstoffe dienen. Im Zentrum solcher Brennstoffbedarfe stehen einerseits Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und andererseits künstliches Methan als Brennstoff für die Wärmeversorgung. Zachmann et al. (2022, S. 3) zeigen die so mögliche Verknüpfung der Versorgungssysteme für Strom, brennbare Gase und letztlich über einen weiteren Verarbeitungsschritt auch flüssige Brennstoffe im Überblick.

Das Wasserstoffdilemma

Abbildung 3: Vereinfachter Überblick über ein kohlenstoffarmes Energiesystem

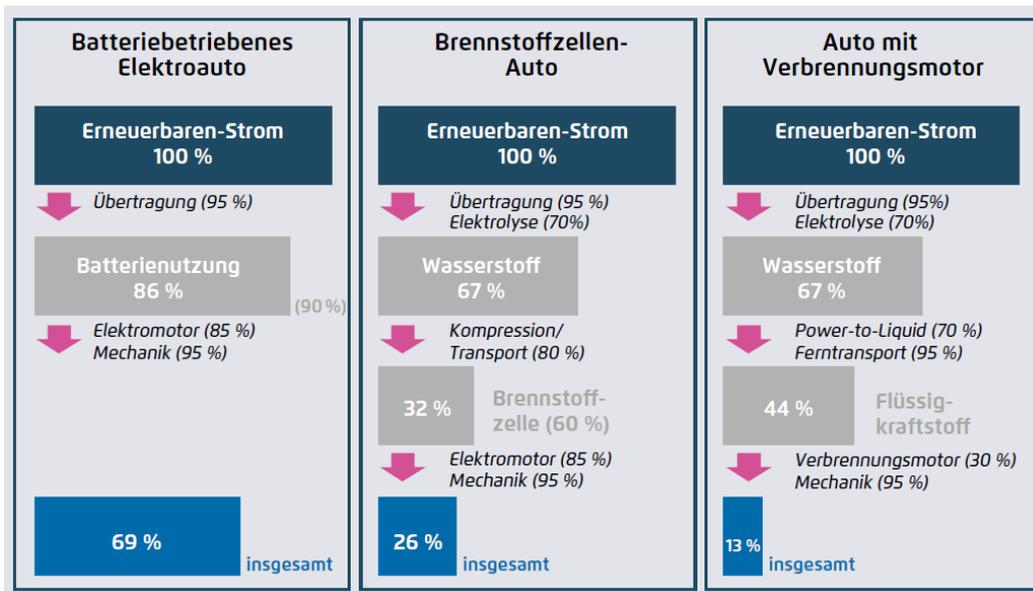


Quelle: Zachmann et al. (2022, S. 3)

Eine zentrale energietechnische Problematik ist, dass nicht nur für jeden Verarbeitungsschritt ein energetischer Aufwand erforderlich ist, sondern dass darüber hinaus die weitere Umwandlung in die letztlich erforderliche (mechanische) Nutzenergie wiederum mit Verlusten einhergeht, die gerade bei Verbrennungsmotoren besonders groß sind.

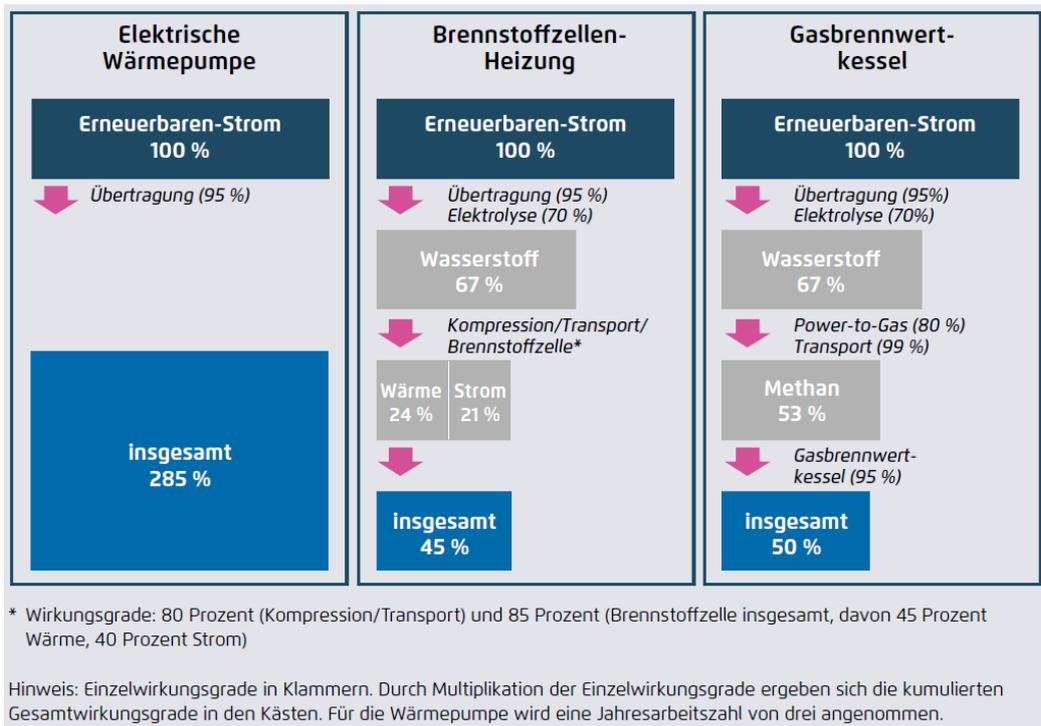
Die folgenden beiden Abbildungen geben daher einen Überblick über die jeweiligen Produktionsschritte und die damit verbundenen Gesamtwirkungsgrade jeweils im Vergleich mit direktelektrischen Lösungen.

Abbildung 4: Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten ausgehend von erneuerbar erzeugtem Strom



Quelle: Penner, Unteutsch und Lövenich (2018, S. 12)

Abbildung 5: Einzel- und Gesamtwirkungsgrade unterschiedlicher Heizungssysteme ausgehend von erneuerbar erzeugtem Strom



Quelle: Penner, Unteutsch und Lövenich (2018, S. 13)

Während es also technisch durchaus möglich ist, Strom für die Herstellung von Wasserstoff einzusetzen und aus Wasserstoff wiederum Methan oder flüssige Kraftstoffe herzustellen, wird die Menge von regenerativ erzeugtem Strom für die Realisierung einer bestimmten Dienstleistung mit jedem Umwandlungsschritt größer. Um z.B. eine kWh Antriebsenergie für ein Auto bereitzustellen, müssen bei einem batterieelektrischen Auto ca. 1,44 kWh Strom produziert werden, bei einem mit Synfuels angetriebenen Auto mit Verbrennungsmotor sind dagegen 7,7 kWh notwendig. Zur Bereitstellung einer Kilowattstunde Heizwärme benötigt eine durchschnittliche Wärmepumpe 0,35 kWh Strom, ein mit Methan betriebener Gasbrennwertkessel dagegen 2 kWh. Bei beiden Vergleichen ist die Lösung mit Direktstrom um etwa den Faktor fünf effizienter als der Umweg über künstliche Brennstoffe. Als zusätzliche Eigenschaft der aufwendig realisierten Verbrennung kommt hinzu, dass künstliche Treibstoffe im Verkehr sogar zu einem noch höheren Schadstoffausstoß führen als fossile Kraftstoffe. Untersuchungen von Transport & Environment zeigen, dass neben ebenso hohen NO_x-Emissionen bei Synfuels sogar höhere Kohlenmonoxid- sowie Ammoniak-Emissionen gemessen werden (Krajinska, 2021). Und der hohe Aufwand, der hinter der Erzeugung der brennbaren Stoffe steht, zieht auch hohe Kosten nach sich.

2.3 Klimawirkung von Wasserstoff in der Atmosphäre

Wasserstoff als reaktionsfreudiges Gas kommt in der Atmosphäre kaum vor (~500 ppb), weshalb es selbst keine direkte Treibhauswirkung verursacht. Da es allerdings mit Hydroxylradikalen (OH) reagiert, die ansonsten zur Beseitigung von stark klimaschädlichen Gasen wie Methan oder Ozon beitragen, kann man von einer relativ starken indirekten Treibhauswirkung des Wasserstoffs sprechen.

Das Wasserstoffdilemma

Diese indirekte Treibhausgaswirkung von H₂ über einen Zeitraum von 100 Jahren ist höher als die von CO₂, aber niedriger als die von Methan. 2006 wurde für Wasserstoff ein Global Warming Potential von 5,8 angegeben (Derwent et al., 2006, S. 57)¹. In einer neueren Untersuchung gibt Derwent (2018) eine Schätzung der CO₂-Äquivalenz von Wasserstoff von 4,3 Megatonnen Kohlendioxid pro 1 Megatonne Wasserstoffemissionen über einen Zeithorizont von 100 Jahren an. Er gibt den plausiblen Bereich von 0 - 9,8 mit 95%iger Sicherheit an. Auf dieser Grundlage ist es sehr wahrscheinlich, dass ein erwärmender Einfluss auf das Klima vorhanden ist (Derwent, 2018), der zwar nicht so hoch ist wie bei Methan, aber deutlich höher als bei CO₂.

Die Gründe, warum der Methangehalt gegenwärtig in der Atmosphäre so stark ansteigt, sind nicht genau bekannt, einer der vermuteten Mechanismen ist aber der langsamere Abbau von Methan durch einen Mangel an OH (Seckmeyer, 2022). Auch eine Wasserstoffwirtschaft würde also, ähnlich wie die Methanwirtschaft, durch mögliche Leckagen, die sich gerade bei dem kleinsten aller Moleküle nicht ganz vermeiden lassen, ein Problem für das Klima darstellen.

Ein Problem könnte auch in einem Anstieg der Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre als Folge des Einsatzes von Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff liegen (Vogel, Feck & Grooß, 2011). Da aber der Einsatz von elementarem Wasserstoff in Flugzeugen gegenwärtig weniger wahrscheinlich scheint als der von synthetischem Kerosin, dürften sich die gravierenden Wirkungen des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt durch den Übergang von Kerosin zu synthetischem Kerosin kaum verändern. Bekannt ist, dass der indirekte Effekt bei Kerosinverbrennung bei Flugzeugen, den direkten CO₂-Effekt weit übersteigt. Lee et al. (2021) zeigen, dass die Klimawirkung der Verbrennung von Kerosin in großer Höhe etwa 3-mal so hoch ist, wie die Klimawirkung bei bodennaher Verbrennung wäre. Wird fossiles Kerosin durch Wasserstoff oder durch synthetisches Kerosin ersetzt, wird Fliegen also mitnichten klimaneutral, denn der indirekte Anteil der Treibhausgaswirkungen bleibt erhalten. Der von Lee et al. (2021) genannte Faktor führt zu der Erkenntnis, dass eine vollständige Produktion des Kerosins auf Basis regenerativer Energien einen Flug um ca. 33 % weniger klimaschädlich machen würde. Die anderen 67 % ließen sich nur erschließen, wenn das Flugzeug nicht in große Höhen aufsteigen würde. Dennoch verkauft uns die Luftfahrtbranche den „Traum vom klimaneutralen Fliegen“ (Bottler, 2021) unter Verweis auf die Aussicht auf Sustainable Aviation Fuel (SAF) aus Wasserstoff. Lufthansa verwendet dabei allerdings den Begriff CO₂-neutral (Lufthansa, 2019) und umschiffet so das Problem mit der nur geringen Reduzierung des Treibhauseffekts durch SAF.

2.4 Kosten von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten

Der Blick auf die Kosten der verschiedenen Optionen ist von hoher Bedeutung, da die Kosten für die verschiedenen Optionen letztlich Politik, Wirtschaft und Verbraucherinnen und Verbraucher beeinflussen. Wenn es möglich ist, ein Automobil bei Betriebskosten (OPEX) für Strom von 30 Cent/kWh und einem Verbrauch von 15 kWh/100 km zu Treibstoffkosten von 4,5 €/100 km in Bewegung zu bringen, dann dürfte sich das langfristig auf die Bereitschaft auswirken, stattdessen für 7 l Synfuel/100 km jeweils 3 €, also ca. 21 €/100 km Treibstoffkosten zu bezahlen. Eine solche Entscheidung würde häufig nur dann fallen, wenn hohen OPEX deutlich niedrigere Kapitalkosten (CAPEX) gegenüberstehen würden.

¹ Dies könnte daran liegen, dass alle ein- oder zweiatomigen Gase (O₂, N₂, ...) in der Atmosphäre eine eher geringe Treibhausgaswirkung haben, weil sie im Gegensatz zu mehratomigen Molekülen (CO₂, Methan, Fluorkohlenwasserstoffe, ...) im Infraroten nicht zu sehr vielfältigen Schwingungen angeregt werden können und daher die Infrarotstrahlung der Erde fast ungehindert in den Weltraum passieren lassen (Seckmeyer, 2022).

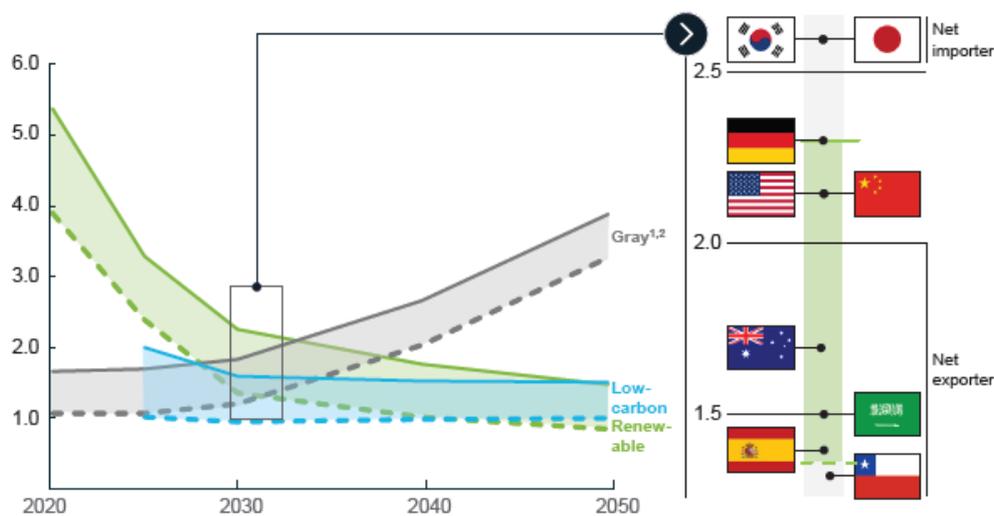
Das Wasserstoffdilemma

Einen Ausgangspunkt zu den zukünftigen Kosten von grünem Wasserstoff stellen in vielen Dokumenten die gegenwärtigen Kosten der Produktion von grauem Wasserstoff aus Erdgas (vgl. Abschnitt 2.1) dar. Die IEA (2019, S. 42) gibt als Produktionskosten ohne CCS ca. 1 \$/kWh in den USA, Russland und dem mittleren Osten an, in Europa und China ca. 1,5 \$/kWh.

Mit CCS hergestellter „blauer Wasserstoff“ wird mit einem um ca. 50 % höheren Preis kalkuliert. Die Möglichkeit zur Herstellung von blauem Wasserstoff hängt aber von der großtechnischen Verfügbarkeit von CCS ab. Nach einem ersten Hype um das Jahr 2010 herum ging jedoch die Kapazität der projektierten Anlagen wieder deutlich zurück. Letztlich ist zwischen 2011 und 2020 nur eine Verdoppelung der weltweiten CCS-Kapazitäten von 20 auf 40 Mio. t jährlich zu beobachten und seit ca. 2013 gab es bis 2020 keinen Baubeginn einer CCS-Anlage mehr (Global CCS Institute, 2021, S. 17). Zwischen 2017 und 2020 stieg die Kapazität der projektierten Anlagen wieder von 20 auf 70 Mio. t, was angesichts weltweiter CO₂-Emissionen von mehr als 30 Mrd. t dennoch nur geringe Bedeutung hat. Mit Blick auf die langsamen Fortschritte geben Zachmann et al. (2021, S. 47) zu bedenken: „*We argue that the use of natural gas in combination with carbon capture and storage (CCS) is unlikely because of the virtually non-existent progress in R&D on the CCS value chain.*“ Die Möglichkeit, blauen Wasserstoff herzustellen, ist insoweit noch nicht abgesichert.

Alle gesichteten Publikationen sind sich darin einig, dass durch tendenziell sinkende Preise für erneuerbaren Strom wie auch durch Skalierung und Kostensenkung in der Herstellung von Elektrolyseuren in Zukunft die Preise für Wasserstoff fallen werden. So dokumentiert z.B. die IRENA Gestehungskosten für Wind- und PV-Strom knapp unter 5 Cent/kWh (IRENA, 2019, S. 26). Mögliche weitere Strompreiskomponenten wie Netz-/Durchleitungskosten von der EE-Anlage zum Elektrolyseur und Energiesteuern werden nicht angesprochen. Die IEA geht davon aus, dass die Stromkosten in Abhängigkeiten von den jährlichen Volllaststunden zunächst fallen (IEA, 2019, S. 48) und im Bereich sehr hoher Volllaststunden wieder ansteigen. In Berücksichtigung der Betriebs- wie der Investitionskosten identifiziert sie einen Bereich von 2.500 bis 6.000 Volllaststunden jährlich als Bereich der niedrigsten Wasserstoffkosten. Das Hydrogen Council (2021, S. 13) erwartet folgende Entwicklung (Abbildung 6).

Abbildung 6: Wasserstoff-Produktionskosten in \$/kg



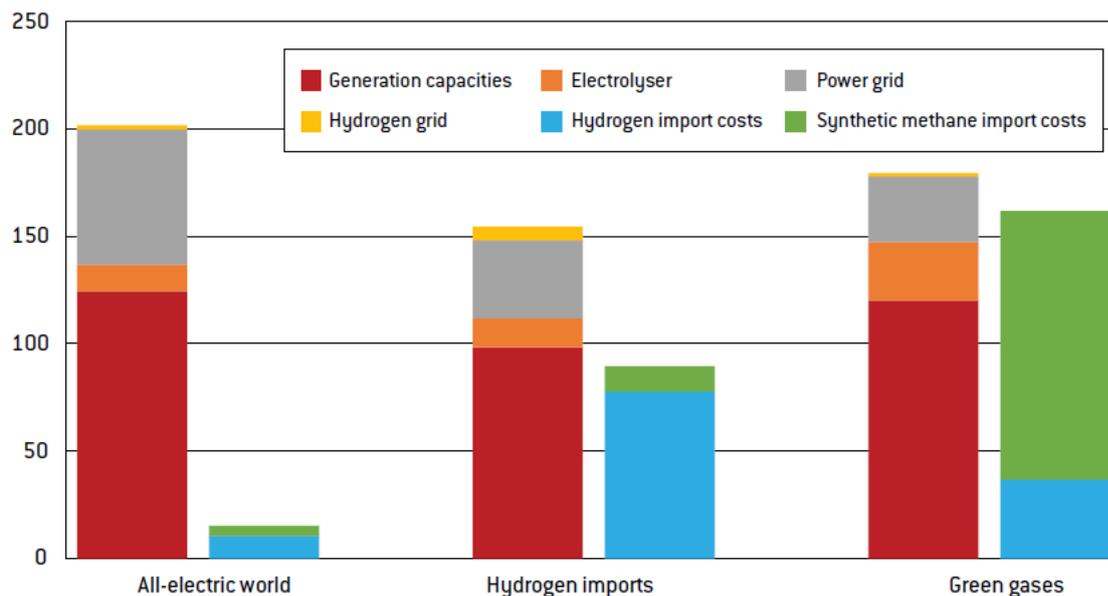
Quelle: Hydrogen Council (2021, S. 13), Hauptannahmen: Gaspreis zwischen 0,87 Cent/kWh und 2,28 Cent/kWh, CO₂-Preis zwischen 26 €/tCO₂ (2020), 44 (2030), 132 (2040) und 264 (2050), Levelized Cost of Energy (LCOE) 22 – 64 €/MWh (2020), 11,4 – 32,6 (2030) und 6,2-22 (2050), gestrichelte Linie: optimaler Standort, durchgezogene Linie: durchschnittlicher Standort

Das Wasserstoffdilemma

Grundsätzlich wurde bisher ein bis 2030 rasches Sinken der Wasserstoffkosten erwartet, so dass um 2030 herum ein Markt existieren könnte, in dem in einigen Ländern die Kosten für grünen Wasserstoff schon preiswerter sind als die Kosten von grauem Wasserstoff. Aber schon im Frühjahr 2022 berichtet das Handelsblatt (Witsch, 2022) bereits darüber, dass grüner Wasserstoff preiswerter ist als grauer. Der Grund dafür liegt an den seit Herbst 2021 massiv steigenden Erdgaspreisen, die den Preis für grauen Wasserstoff auf knapp 7 €/kg getrieben haben (Witsch, 2022). Dauerhaft forciert werden soll der Wettbewerbsvorteil von grünem Wasserstoff durch einen hohen CO₂-Preis. So entspricht beispielsweise ein Kohlenstoffpreis von 100 €/t CO₂ einer Kostensteigerung von 1,02 €/kg H₂ für die erdgasbasierte Produktion (IEA, 2021a, S. 113). Gegenwärtig wird dieser Zustand durch den hohen Erdgaspreis hergestellt, ohne dass aber die zukünftige Entwicklung deutlich wäre.

Über die Kosten des Wasserstoffs hinaus sind aber weitere Fragen zu stellen: Wieviel wird synthetisches Methan kosten? Wieviel werden künstliche flüssige Treibstoffe kosten? Und wie hoch werden die Kosten der alternativen Versorgungssysteme mit den Schwerpunkten auf Strom, auf Wasserstoff und auf synthetischem Methan liegen? Die letzte dieser Fragen ist Gegenstand der Untersuchung von Zachmann et al. (2022, S. 6), welche die „all electric world“ als insgesamt günstigste ermitteln.

Abbildung 7: Annualisierte Investitionskosten (linke Balken) und Brennstoffimportkosten (rechte Balken) in drei Szenarien, 2021-2050, in Mrd. Euro



Quelle: Zachmann et al. (2022, S. 6), der linke Balken gibt jeweils die durchschnittlichen jährlichen Investitionskosten und der rechte Balken die jährlichen Brennstoffimportkosten für die Europäische Union an.

Gemeinsam sind allen drei Szenarien erhebliche Kosten für die Investitionen in Anlagen zur Erzeugung von erneuerbarem Strom, primär also PV und Windkraft. Die „all electric world“ ist wenig überraschend mit den höchsten Investitionen in das Stromnetz verbunden. Diese fallen in den Szenarien, die auf der Nutzung von Wasserstoff und „grünem Methan“ aufbauen, niedriger aus. Stattdessen steigen in diesen Szenarien die Importkosten für Brennstoffe auf ein hohes Niveau, im Fall des „grünen Methans“ fast auf das Niveau der annualisierten Investitionskosten.

Das Wasserstoffdilemma

Zumindest für den „Treibstoff“ Wasserstoff existieren nicht nur Prognosen, sondern auch ein Marktpreis. Dieser liegt gegenwärtig bei 9,5 €/kg (Clever Tanken, 2022), der allerdings nicht zu den Prognosen passen will. Diese werden von Jovan und Dolanc (2020, S. 3) dokumentiert und starten 2014 bei ca. 10 €/kg um dann bis 2022 auf 5 €/kg bis 6 €/kg zu fallen. Die Prognosen für 2030 weisen eine Spannweite von 4,5 €/kg bis 7,7 €/kg aus. Auch bei dem gegenwärtigen Preis von 9,5 €/kg fährt man aber mit dem einzigen gegenwärtig verfügbaren Wasserstoffauto Toyota Mirai bei einem Verbrauch von 1,06 kg/100 km (Spritmonitor, 2022) vergleichsweise günstig zu Spritkosten von ca. 10 €/100 km, was nur knapp doppelt so hoch ist wie die Stromkosten eines durchschnittlichen Tesla 3 Elektro mit privater Wallbox.

Die an den Technologiekosten sowie im Fall des grünen Wasserstoffs an den zu erwartenden Stromkosten orientierten Bemühungen, die zukünftigen Kosten von Wasserstoff zu ermitteln, bleiben notwendigerweise unsicher. Die zukünftige Dynamik wird darüber hinaus zusätzlich durch den Markt verändert werden, auf den wiederum verschiedene Faktoren einwirken können:

- ▶ die Geschwindigkeit der weiteren Erhitzung des Weltklimas mit ihren indirekten Auswirkungen auf CO₂-Preise etc.,
- ▶ die Maßnahmen zur Emissionssenkung in den Ländern weltweit mit ihren Auswirkungen auf die H₂-Nachfrage,
- ▶ die Nachfrage aus potenziellen Importländern mit ihren Auswirkungen auf die Zahlungsbereitschaft,
- ▶ die Kostensenkungen für Elektrolyseure incl. der Unsicherheiten aus hoher Zahlungsbereitschaft aufgrund von Knappheiten in der Lieferkette,
- ▶ die Gewinnerwartungen der Lieferländer (Konzessionsabgaben etc.) sowie der den Wasserstoff letztlich produzierenden Unternehmen und ihrer Gewinnansprüche.

Beeinflusst durch all diese Unsicherheiten wird sich der Preis letztendlich am Markt entwickeln, d.h. alle diese Faktoren komplizieren die Voraussagen über Kosten und Wirtschaftlichkeit, weil ja nicht die Produktionskosten, sondern die internationalen Marktpreise relevant sind.

Dennoch müssen angesichts aller Unsicherheiten Entscheidungen über politische und technologische Richtungen in Politik und Wirtschaft getroffen werden. Weiter werden solche Kostenschätzungen aber auch von interessierten Akteuren genutzt werden, um damit bestimmte Zukünfte attraktiv (niedrige Kostenschätzungen) oder unattraktiv (hohe Kostenschätzungen) erscheinen zu lassen.

3 Die Entwicklung der Wasserstoffpolitik

Die Wasserstoffwirtschaft ist eine politisch gewollte Entwicklung. Weder die Produktionsinfrastrukturen noch die für die Nutzung des Energieträgers Wasserstoff wesentlichen Technologien würden ohne diesen politischen Willen entstehen. Um in Kapitel 4 die voraussichtliche Entwicklung der Produktionsmengen abschätzen zu können, ist daher zunächst eine knappe Darstellung des politischen Rahmens erforderlich. Für Deutschland sind die Wasserstoffstrategien der Bundesregierung wie auch der Europäischen Union von Bedeutung. Darüber hinaus gibt es gegenwärtig Wasserstoffstrategien von fast allen Bundesländern.

3.1 Die Wasserstoffstrategie der EU-Kommission

Die EU-Kommission beschloss 2020 die „Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa“ (EU Commission, 2020). Die Strategie entwickelt einen Ausbau der Wasserstoffproduktion in mehreren Phasen. In der ersten Phase, von 2020 bis 2024, strebt die EU an, mindestens 6 GW an Elektrolyseuren für erneuerbaren Wasserstoff zu installieren und bis zu 1 Mio. t erneuerbaren Wasserstoff zu produzieren (EU Commission, 2020, S. 5). In der zweiten Phase bis 2030 soll die Leistung der Elektrolyseure auf mindestens 40 GW gesteigert und bis zu 10 Mio. t erneuerbarer Wasserstoff produziert werden. In einer dritten Phase bis 2050 sollten Technologien für erneuerbaren Wasserstoff ausgereift sein und in großem Maßstab eingesetzt werden, um alle schwer zu dekarbonisierenden Sektoren zu erreichen, in denen andere Alternativen möglicherweise nicht machbar sind oder höhere Kosten verursachen (EU Commission, 2020, S. 7).

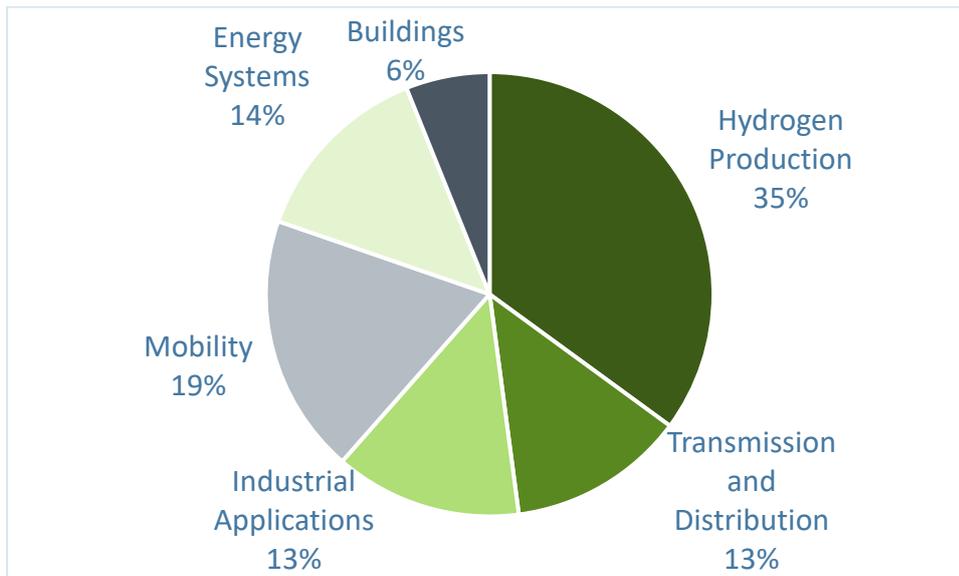
An erster Stelle nennt die Strategie Anwendungen in der Industrie, wie z.B. den Einsatz von grünem statt grauem Wasserstoff in Raffinerien, bei der Herstellung von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff und neuen Formen der Methanolproduktion sowie den Ersatz fossiler Brennstoffe bei der Stahlherstellung (EU Commission, 2020, S. 10).

Im Bereich der Fahrzeugantriebe führt die Strategie die frühe Einführung von Wasserstoff für den Eigenbedarf auf, z. B. für lokale Stadtbusse, kommerzielle Flotten (z. B. Taxis) oder bestimmte Teile des Schienennetzes, wo eine Elektrifizierung nicht möglich ist. Der Bau von Wasserstofftankstellen müsse auf einer Analyse der zukünftigen Flottengröße und den Anforderungen für leichte und schwere Nutzfahrzeuge aufbauen (EU Commission, 2020, S. 10). Darüber hinaus sei der Antrieb durch Wasserstoff-Brennstoffzellen bei schweren Straßenfahrzeugen einschließlich Reisebussen, Sonderfahrzeugen und dem Güterfernverkehr förderungswürdig.

Als weitere Anwendungsbereiche erwähnt die Strategie Wasserstoffzüge, Binnen- und Küstenschifffahrt, Hochseeschifffahrt sowie den Luftverkehr.

Mit der European Clean Hydrogen Alliance will die Europäische Union die Wasserstoffwirtschaft entwickeln. Über 1.200 Projekte listet die Project Pipeline der European Clean Hydrogen Alliance auf (siehe Abbildung 8).

Abbildung 8: Project Pipeline der European Clean Hydrogen Alliance



Quelle: European Clean Hydrogen Alliance (2022), grün: wahrscheinliche Anwendungen nach Zachmann (2021), grau spekulative Anwendungen nach Zachmann (2021)

Mit nur 19 % der Projekte im Sektor Mobilität und 6 % rund um die Gebäudewärme setzt die European Clean Hydrogen Alliance zu 75 % überraschend stark auf die Anwendungen, die Zachmann et al (2021) als wahrscheinliche Anwendungsfälle priorisieren.

Wasserstoff wird durch die EU-Kommission auch im Kontext der umstrittenen Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten mitgedacht. Der Entwurf der Bestimmungen verpflichtet den Betreiber von neuen Gaskraftwerken, wenn sie von der Taxonomie profitieren sollen, dazu, folgende Anforderung zu erfüllen (EU Commission, 2022, S. 17):

The facility is designed and constructed to use renewable and/or low-carbon gaseous fuels and the switch to full use of renewable and/or low-carbon gaseous fuels takes place by 31 December 2035, with a commitment and verifiable plan approved by the management body of the undertaking.

Als erneuerbarer gasförmiger Brennstoff ist kaum etwas anderes denkbar als Wasserstoff. Vom 1. Januar 2036 ab müssten, um dieses Kriterium zu erfüllen, alle in diesem Rahmen neu errichteten Gaskraftwerke ausschließlich Wasserstoff einsetzen. Die Gasbranche sieht die insgesamt sieben Kriterien der Taxonomie für nachhaltige Gaskraftwerke als praktisch unerfüllbar an (Magenheim-Hörmann, 2022). Der Vorstand des Gasverbands Zukunft Gas, Timm Kehler, sieht in der Verpflichtung zur Beimischung von Wasserstoff beim Betrieb neuer Gaskraftwerke ein „Killerkriterium“ (Magenheim-Hörmann, 2022).

3.2 Die Wasserstoffstrategie der großen Koalition 2020

Die Wasserstoffstrategie der letzten Bundesregierung will Wasserstoff durch eine Kostendegression bei der Wasserstoffherstellung wettbewerbsfähig machen (BMW, 2020, S. 6). Eine unterstützende Wirkung von CO₂-Abgaben auf fossile Brennstoffe erwähnt die noch vom Altmaier-Ministerium in 2020 erstellte Strategie nicht.

Das Wasserstoffdilemma

Zu Bedarf und Angebot führt die Strategie aus (BMW, 2020, S. 6):

Die Bundesregierung sieht bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von ca. 90 bis 110 TWh. Um einen Teil dieses Bedarfs zu decken, sollen bis zum Jahr 2030 in Deutschland Erzeugungsanlagen von bis zu 5 GW Gesamtleistung einschließlich der dafür erforderlichen Offshore- und Onshore-Energiegewinnung entstehen. Dies entspricht einer grünen Wasserstoffproduktion von bis zu 14 TWh² und einer benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 20 TWh. Für den Zeitraum bis 2035 werden nach Möglichkeit weitere 5 GW zugebaut, spätestens bis 2040.

Der von der Bundesregierung angenommene Bedarf liegt damit deutlich über den wissenschaftlichen Prognosen, die für das Jahr 2030 eine eher niedrige Nachfrage zwischen ca. 10 TWh und 63 TWh erwarten und mehrheitlich davon ausgehen, dass der bisher fossil produzierte Wasserstoff auch weiter fossil produziert werden wird (Öko-Institut e.V., 2021, S. 24). Die Wasserstoffstrategie berücksichtigt aber, dass schon aktuell in Deutschland über ca. 55 TWh/a fossiler Wasserstoff genutzt werden, primär zur Herstellung von Düngemitteln und zum Cracken von Erdöl bei der Herstellung fossiler Treibstoffe. Auch dieser Wasserstoff soll soweit möglich in eine auf grünem Wasserstoff basierende Produktion umgestellt werden (BMW, 2020, S. 7), wodurch sich die höheren Ziel der Strategie erklären könnten. Als Prognose des Bedarfs in 2050 zitiert die Strategie die BDI-Klimapfade (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) und nennt eine Zahl von 380 TWh/a.

Schwerpunkt der Anwendung von Wasserstoff sah das Altmaier-Ministerium „etwa zur Vermeidung von Prozessemissionen in der Stahl- und Chemieindustrie oder in bestimmten Bereichen des Verkehrs. Aber wir haben längerfristig auch Teile des Wärmemarkts im Blick“ (BMW, 2020, S. 6). Damit bezieht die Wasserstoffstrategie der großen Koalition auch Bereiche der von Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72) als spekulativ bezeichneten Anwendungen mit ein.

Weiter setzt die Wasserstoffstrategie den (Aus-)Bau einer Transport- und Verteilinfrastruktur für Wasserstoff, die einschlägige Wissenschaft sowie die Ausbildung von Fachkräften auf die Agenda. Auch internationale Märkte und Kooperationen für Wasserstoff sind zu etablieren, um in der Zukunft die Möglichkeit zum Import von Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen zu schaffen.

Um die Entwicklung zu steuern wird ein Ausschuss der Staatssekretärinnen und Staatssekretäre für Wasserstoff der betroffenen Ressorts gebildet und ein Nationaler Wasserstoffrat durch die Bundesregierung berufen (Nationaler Wasserstoffrat, 2022). Dieser setzt sich aus sieben Vertreterinnen und Vertretern von Wissenschaftsinstitutionen sowie zwei Vertreterinnen von Umweltverbänden zusammen, denen 15 Vertreterinnen und Vertreter der Wirtschaft gegenüber stehen: Vier Vertretern von Unternehmen des Motoren- und Fahrzeugbaus, vier Vertreterinnen und Vertretern von Unternehmen, die Erdgas- und Stromnetze betreiben, einer Vertreterin eines Stadtentwässerungsunternehmens sowie vier Vertretern von Unternehmen des Anlagenbaus sowie jeweils einem Vertreter der Stahlbranche, der Heizungsindustrie und der Gewerkschaften (IGBCE) zusammen. Auch hier sind mit Vertretern des Fahrzeugbaus und der Heizungsindustrie Vertreter der von Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72) als spekulativ bezeichneten Anwendungen vertreten.

² Annahmen der Bundesregierung: 4.000 Volllaststunden und ein durchschnittlicher Wirkungsgrad der Elektrolyseanlagen von 70 Prozent.

Das Wasserstoffdilemma

Die Ausrichtung auf spekulative Anwendungen wird auch im Maßnahmenplan der Wasserstoffstrategie deutlich (BMW, 2020, S. 17ff). Vier Maßnahmen mit dem Ziel der Steigerung der Erzeugung sowie acht mit dem Fokus auf industrielle Anwendungen und drei mit Fokus auf Sektorkopplung in den Energienetzen stehen nicht weniger als 12 Maßnahmen mit Blick auf Fahrzeuge und Verkehr und zwei im Kontext der Gebäudewärme gegenüber. Hinzu kommen Maßnahmen zur Förderung von Forschung und Innovation sowie auf die europäische Zusammenarbeit gerichtete Maßnahmen.

3.3 Wasserstoffstrategie im Koalitionsvertrag der Ampel 2021

Im Koalitionsvertrag der Ampelregierung wurden einige Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft verändert. Neu ist, dass zwar einerseits der „Einsatz von Wasserstoff nicht auf bestimmte Anwendungsfelder“ begrenzt werden soll, aber dort ausgeschlossen wird, wo „Verfahren und Prozesse durch eine direkte Elektrifizierung auf Treibhausgasneutralität“ umgestellt werden können (SPD, Bündnis 90/Die Grünen & FDP, 2021, S. 21):

Wir setzen uns für die Gründung einer Europäischen Union für grünen Wasserstoff ein. Dazu wollen wir das IPCEI³ Wasserstoff schnell umsetzen und Investitionen in den Aufbau einer Wasserstoffnetzinfrastruktur finanziell fördern. So wollen wir bis 2030 Leitmarkt für Wasserstofftechnologien werden und dafür ein ambitioniertes Update der nationalen Wasserstoffstrategie erarbeiten. ...

Neben dem Ausbau der Infrastruktur werden wir die Ziele zur Elektrolyseleistung deutlich erhöhen, europäische und internationale Klima- und Energiepartnerschaften für klimaneutralen Wasserstoff und seine Derivate auf Augenhöhe vorantreiben und Quoten für grünen Wasserstoff in der öffentlichen Beschaffung einführen, um Leitmärkte zu schaffen. Wir fördern in Deutschland die Produktion von grünem Wasserstoff. Im Interesse eines zügigen Markthochlaufs fördern wir zukunftsfähige Technologien auch dann, wenn die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff noch nicht ausreichend sichergestellt ist. Wir wollen den Einsatz von Wasserstoff nicht auf bestimmte Anwendungsfelder begrenzen. Grüner Wasserstoff sollte vorrangig in den Wirtschaftssektoren genutzt werden, in denen es nicht möglich ist, Verfahren und Prozesse durch eine direkte Elektrifizierung auf Treibhausgasneutralität umzustellen.

Einiges deutet darauf hin, dass Wasserstoff auch als Energiespeicher für die Stromerzeugung eine Rolle spielen wird und hierfür Änderungen am KWK-Gesetz (Wasserstoff-Ready) geplant sein könnten. Eine Fortschreibung der Wasserstoffstrategie mit dem Ziel eines schnelleren Markthochlaufs durch die Ampel-Regierung ist für die zweite Jahreshälfte angekündigt (Die Bundesregierung, 2022, S. 8).

Für Wasserstoffanwendungen im Verkehr kündigt der „Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie“ an, dass die Bundesregierung sich darauf beschränken wird, ein Grundnetz für die Betankung von Wasserstoff-LKW auf der Langstrecke zu errichten. Ein Wasserstoff-Tankstellennetz für PKW und Nahverkehr ist nicht mehr geplant. Darüber hinaus werden Betankungsmöglichkeiten auf Betriebshöfen von Flottenbetreibern gefördert (Die Bundesregierung, 2022, S. 5f).

³ Important Project of Common European Interest

3.4 Die Wasserstoffstrategien der Bundesländer

Fast jedes Bundesland hat in den letzten zwei Jahren eine Wasserstoffstrategie erarbeitet. Die erste Wasserstoffstrategie legten schon im Jahr 2019 die fünf norddeutschen Küstenländer Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen gemeinsam vor (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, 2019). In 2020 folgten dann Wasserstoffstrategien der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt (Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, 2020; Bayerische Staatsregierung, 2020; Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020; Sachsen-Anhalt Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie, 2020) und in 2021 folgten Brandenburg, Hessen, das Saarland, Sachsen und Thüringen (Freistaat Sachsen, 2021; Freistaat Thüringen Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, 2021; Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, 2021; Land Brandenburg Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie, 2021; Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr Saarland, 2021). Nur für Berlin und Rheinland-Pfalz fand sich kein solches Dokument, aber in beiden Ländern wird an einer Wasserstoffstrategie gearbeitet.

Insgesamt sind sich die Strategien recht ähnlich. Wasserstoff wird grundsätzlich als wichtiger Baustein der Energiewende gesehen. So heißt es in der Wasserstoff Roadmap von NRW beispielhaft: *„Richtig und konsequent eingesetzt, können wir damit in Zukunft ein Viertel unserer heutigen CO₂-Emissionen einsparen“* (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020, S. 3).

Als Mittel dazu werden in allen Strategien die Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff geplant und dessen Nutzung in den Sektoren Industrie und Verkehr, aber auch Gebäude und Energiewirtschaft als Chance gesehen. Nutzung und Verteilung sind dabei häufiger Thema als Herstellung und Import. Diese Themen werden am deutlichsten in der gemeinsamen Wasserstoffstrategie der norddeutschen Küstenländer in den Mittelpunkt gerückt:

„Norddeutschland verfügt im Vergleich zu anderen Regionen über einzigartige Standortvorteile zum Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft:

- ▶ hohe Erzeugungskapazitäten für On- und Offshore-Windstrom mit weiterem Ausbaupotenzial,
- ▶ unterirdische Formationen zur Speicherung von Wasserstoff,
- ▶ Seehäfen, die als Logistik- und Wirtschaftszentren mit ihren Importterminals künftig eine wesentliche Rolle bei Import und Verteilung von grünem Wasserstoff und synthetischen Energieträgern, bei der Nutzung von Wasserstoff sowie beim Export von Wasserstofftechnologien und -komponenten spielen werden,
- ▶ maritime Unternehmen und wissenschaftliche Expertise sowie
- ▶ Industriezweige mit erheblichen Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff; weiteres Know-how wird in den sechs norddeutschen „Reallaboren der Energiewende“ aufgebaut“ (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, 2019, S. 1).

Bayern hingegen macht mit Blick auf die 10H-Regelung zu Mindestabständen von Windenergieanlagen zu Siedlungen schon einmal klar, dass die Bürde der Herstellung von Wasserstoff eher auf den anderen Bundesländern oder dem Ausland liegen wird: *„Allerdings wird der zur Herstellung von grünem Wasserstoff benötigte Strom aus erneuerbaren Energien nicht allein in Bayern erzeugt werden können. Aufgrund der natürlichen Rahmenbedingungen haben andere Regionen in Deutschland und*

Das Wasserstoffdilemma

in der Welt hier günstigere Ausgangsbedingungen, etwa durch das Aufstellen von Offshore-Windparks in Küstengewässern oder den Bau großflächiger Photovoltaikanlagen in sonnenstarken und dünn besiedelten Regionen“ (Bayerische Staatsregierung, 2020, S. 3). Die Nutzung in Industrie und Verkehr soll hingegen schon vorbereitet werden. „Als Basisinfrastruktur sollen bayernweit 100 Wasserstofftankstellen bis 2023 errichtet werden“ (Bayerische Staatsregierung, 2020, S. 22).

Hervorgehoben wird vielfach auch das Potenzial des Wasserstoffs für die Wirtschaft. So führt die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg aus: „Gerade für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg bietet Wasserstoff große wirtschaftliche Potenziale: Die Anlagen und Technologien für Wasserstoff können hier entwickelt und produziert werden. Wir gehen davon aus, dass in Baden-Württemberg so bis zu 16.000 neue Arbeitsplätze und neun Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2030 entstehen können“ (Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, 2020, S. 3).

Nordrhein-Westfalen setzt sich hohe Ziele in der Mobilität. Bis 2030 sollen dort 11.000 Brennstoffzellen-Lkw über 20 Tonnen fahren und sich an 200 Tankstellen für Lkw und Pkw versorgen. Weiter fahren dort dann 1.000 Brennstoffzellen-Abfallsammelfahrzeuge und 3.800 Brennstoffzellen-Busse für den ÖPNV (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020, S. 9). Alle diese Ziele sind aber wohl mit hohen Unsicherheiten verbunden. Die Stadt Montpellier in Frankreich hat z.B. die bereits geordneten 51 Wasserstoffbusse Anfang 2022 wieder abbestellt und setzt stattdessen auf Elektrobusse, deren Betriebskosten bei einem Sechstel liegen sollen (Stahl, 2022a).

Tabelle 1: Wasserstoff-Bedarfsfelder aufgeführt in den Strategien der Bundesländer

	Industrie	H2 als Speichermedium für Strom- und Wärmenetze	Raffinerien	Eisenbahn	Schifffahrt	Luftverkehr	LKWs	Busse	Prozesswärme	Gebäudeheizung	Brennstoffzellen-PKW	Synfuel für KFZ
Norddeutsche Länder (21ff)	X	X	X	X	X	X	X	X			X	
Baden-Württemberg (12ff, 25f)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bayern (12ff)	X			X	X	X	X	X		X	X	
Brandenburg (20ff)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Hessen (25ff)	X					X	X	X		X		X
NRW (39ff)	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
Saarland (15ff)	X			X			X	X		X		X
Sachsen (34ff)	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Sachsen Anhalt (26ff)	X					X	X	X	X			
Thüringen (37ff)	X	X	X	X	X	X	X	X	X			

Quelle: Borderstep

Nicht alle Bundesländer haben die Breite der möglichen Einsatzfelder von Wasserstoff vor Augen, z.B. im Fall des Einsatzes als Energiespeichermedium in Strom- und Wärmenetzen oder in der Prozesswärme. Bayern schließt Anwendung als Speicher in Energienetzen sogar explizit mit dem Verweis auf das europäische Verbundnetz als unnötig aus. Und Raffinerien, die es nicht in jedem Bundesland

Das Wasserstoffdilemma

gibt, werden nicht in allen Strategien erwähnt. Ebenso spielt der Schiffs- und Luftverkehr nicht in allen Ländern eine so bedeutende Rolle, dass er in den Strategien erwähnt wird.

Anders ist es mit den Anwendungsfeldern Gebäudeheizung, bei denen sich die Strategien aus Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und dem Saarland auf Wärmeerzeugung mit Brennstoffzellen-KWK beschränken.

Eine zukünftige Bedeutung von Brennstoffzellen-PKW wird in einigen Strategien explizit bezweifelt, andere sehen sie als förderungswürdig. Baden-Württemberg, das Saarland und Sachsen erwähnen sogar explizit die Perspektive von auf Basis von Wasserstoff hergestellten synthetischen Treibstoffen für Verbrennungsmotoren.

Insgesamt spiegeln fast alle Strategien einen breiten Blick auf mögliche Wasserstoff-Anwendungen. Nicht alle von der Wissenschaft für wahrscheinlich gehaltenen Anwendungen werden aber in allen Strategien für erforderlich gehalten und insbesondere in der Mobilität führen fast alle Strategien eine Zahl von Anwendungen auf, die wissenschaftliche Quellen für spekulativ halten.

4 Die voraussichtliche Entwicklung der Potenziale und Bedarfe an grünem Wasserstoff

Die Frage, in welchen Anwendungen sich ab wann wieviel Wasserstoff einsetzen lässt, erfordert zumindest grobe Vorstellungen davon, wie sich das Angebot an Wasserstoff entwickeln wird. Das folgende Kapitel wird daher versuchen, einige Fragen zu beantworten:

- ▶ Welchen Umfang hat die Wasserstoffwirtschaft heute?
- ▶ Wie groß ist das Potenzial an erneuerbarem Strom, aus dem grüner Wasserstoff hergestellt werden kann?
- ▶ Wie schnell können die zur Deckung des Bedarfs theoretisch erforderlichen notwendigen Kraftwerke und Elektrolyseure errichtet werden?
- ▶ Wie könnte das Potenzial – beispielhaft – auf die verschiedenen Bedarfe verteilt werden?

Mit Blick auf die teils erheblichen Unterschiede der Zahlenangaben sowie die eher innovationspolitische Fragestellung der vorliegenden Studie ist aber von geringer Bedeutung, die „besten Zahlen“ zu ermitteln und im Detail zu belegen. Das Ziel dieser Studie ist eher, die Spannweite der Zahlen in den verschiedenen Studien auszuleuchten.

4.1 Die Wasserstoffwirtschaft heute

Wasserstoff kann aus fossilen Brennstoffen, Biomasse oder aus Wasser (oder Wasserdampf) gewonnen werden. Für die Herstellung von Wasserstoff werden heute rund 3.200 TWh Energie eingesetzt

Gegenwärtige Produktion von Wasserstoff

Die gegenwärtige Produktion von fossilem Wasserstoff liegt bei ca. 70 Mio. t H₂. Ein erster Schritt für klimaneutralen Wasserstoff besteht darin, diese Produktion auf grünen Wasserstoff umzustellen. Erst danach können neue Anwendungen versorgt werden.

(2 % des globalen Gesamtprimärenergiebedarfs) (IEA, 2019, S. 38; IRENA, 2019, S. 9). Erdgas ist derzeit die wichtigste Quelle für die Wasserstoffherzeugung und Methandampfreformer, die Erdgas verwenden, sind das Arbeitspferd der Wasserstoffproduktion in der Ammoniak- und Methanolindustrie sowie in Raffinerien. Allein für die Wasserstoffproduktion aus Erdgas werden jährlich etwa 205 Milliarden Kubikmeter Erdgas eingesetzt, etwa 6 % des weltweiten Erdgasver-

brauchs (IEA, 2019, S. 38). Aus Erdgas werden etwa 75 % des Wasserstoffs (**grauer Wasserstoff**) hergestellt. An zweiter Stelle mit 23 % steht die besonders in China bedeutende Kohle, aus der **schwarzer Wasserstoff** hergestellt wird. Hierfür werden 2 % des weltweiten Kohleverbrauchs eingesetzt (IEA, 2019, S. 38). In kleinem Umfang wird auch Wasserstoff aus Öl und aus Wasser (mit Elektrizität/Elektrolyse) hergestellt.

Insgesamt werden jährlich weltweit ca. 70 Mio. t Wasserstoff industriell hergestellt (IEA, 2019, S. 38). Bei einem Energiegehalt des Wasserstoffs von 33,33 kWh/kg (IEA, 2019, S. 35) entsprechen 70 Mio. t Wasserstoff 2.333 TWh und bezogen auf den Energieaufwand der Herstellung von 3.200 TWh ergibt sich ein Wirkungsgrad von ca. 73 %. Sogenannter **grüner Wasserstoff** aus erneuerbaren Energien spielt dabei nur eine Nebenrolle. Der Verbrauch der Länder der europäischen Union liegt bei ca. 10 Mio. t H₂, davon Deutschland ca. 1,6 Mio. t H₂ (World Energy Council Europe, 2021, S. 14). Ende

Das Wasserstoffdilemma

2021 dokumentiert die IEA sogar bereits die Herstellung von 90 Mio. t H₂ (IEA, 2021a, S. 108), von denen 21 % als Nebenprodukt z.B. der Chlorherstellung anfallen. Die dedizierte industrielle Herstellung von Wasserstoff umfasst damit wiederum ca. 70 Mio. t.

Als weitere Wasserstoffvarianten (World Energy Council Europe, 2021, S. 9) werden **blauer Wasserstoff** (aus Erdgas mit CCS) sowie **violetter Wasserstoff**, der unter Einsatz von Kernenergie produziert wird, und **brauner Wasserstoff** auf Basis von Energie aus Braunkohle erwähnt. Würde die gesamte derzeitige Wasserstoffproduktion durch Wasserelektrolyse (unter Verwendung von Wasser und Elektrizität zur Erzeugung von Wasserstoff) erfolgen, würde dies zu einem jährlichen Strombedarf von 3 600 TWh führen (IEA, 2019, S. 37), was etwa dem sechsfachen Strombedarf von Deutschland entsprechen würde.

Ein großer Teil des heute hergestellten Wasserstoffs findet Verwendung in der Herstellung von Ammoniak, der als Stickstoffdünger und für die Herstellung von Kunstdünger und anderer Chemikalien verwendet wird, sowie in der Erdölraffination, in der Wasserstoff für das Cracken von Schweröl bei der Herstellung von Kraftstoffen benötigt wird. Besonders die Anwendung in der Kraftstoffherstellung ist in den letzten Jahrzehnten zusammen mit dem weltweiten Autoverkehr deutlich gestiegen. Auf diese Verwendungszwecke entfallen etwa zwei Drittel des Wasserstoffverbrauchs (IRENA, 2019, S. 10). Nur ca. 10.000 t H₂ wurden noch 2019 direkt als H₂ über Tankstellen in der Transportbranche abgesetzt (IEA, 2019, S. 32).

SGH2Energy (2022) dokumentiert aktuelle Vergleichspreise von 2 bis 3 \$/kgH₂ für **braunen Wasserstoff** aus Kohlevergasung, 2 bis 6 \$/kgH₂ für **grauen Wasserstoff** aus Erdgas, 6 bis 10 \$/kgH₂ für **blauen Wasserstoff** aus Erdgas mit CCS bis hin zu 10 bis 13 \$/kgH₂ für **grünen Wasserstoff** aus Elektrolyse angetrieben mit regenerativem Strom. Mit Blick auf die Preise, ist daher nicht zu erwarten, dass der Wasserstoffmarkt kurzfristig aufgrund ökonomischer Eigendynamiken „grün“ wird. Um den Wandel zu grünem Wasserstoff dennoch zu bewältigen, haben 49 Länder, die 80 % des globalen Bruttosozialproduktes repräsentieren, Mechanismen zur CO₂-Bepreisung in Kraft gesetzt, und 31 Länder, die 73 % des globalen Bruttosozialproduktes repräsentieren, haben Wasserstoffstrategien erarbeitet (Hydrogen Council, 2021, S. 8).

Der Wasserstoffbedarf für heute dominierende Anwendungen wird wohl sinken

Die heute üblichen Anwendungen von Wasserstoff werden im Zuge der anstehenden Transformation zur Klimaneutralität ganz oder teilweise entfallen. Nach dem Verschwinden des Verbrennungsmotors werden kaum noch Kraftstoffe benötigt werden und mit der Konversion der Landwirtschaft zum ökologischen Landbau mit geschlossenen Stoffkreisläufen wird der Bedarf an Ammoniakdünger deutlich sinken.

Erste Schritte zur grünen Wasserstoffwirtschaft sind jetzt eingeleitet. Über die beiden geplanten LNG-Terminals an der Nordseeküste, die „Wasserstoff- und Ammoniak-ready“ sein werden hinaus (Tix, 2022), werden LNG- und Wasserstoff-Kooperationen in Katar und Abu Dhabi angebahnt (Tageschau, 2022). Durch Politiken und Förderprogramme (vgl. Kapitel 3) wird auch die Produktion von grünem Wasserstoff hierzulande in Gang gesetzt.

4.2 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff

4.2.1 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff weltweit

Wenn unabhängig von konkreten Projektplanungen ein Blick auf die Potenziale geworfen wird, stellen sich diese zunächst einmal als sehr groß dar. Heuser et al. (2020) haben dazu eine erhebliche Anzahl Länder mit hoher Sonneneinstrahlung bzw. hohem Windaufkommen analysiert. Sie finden in der Mongolei, Chile, Kanada, Island, Norwegen, dem Vereinigten Königreich und Irland zusammen Windenergiepotenziale, die zur Produktion von 485 Millionen t H₂ ausreichen (Heuser et al., 2020, S. 14f). In Ländern mit günstigen Bedingungen für Photovoltaik, namentlich Saudi-Arabien, Oman, Algerien, Libyen, Chile, Australien, Ägypten, China, Namibia und Südafrika identifizieren sie genügend Solarenergie, um weitere 1.105 Mio. t H₂ herstellen zu können. Nur mit dem Blick auf PV und Wind ermitteln sie so ein Gesamtpotenzial von 1.590 Mio. t H₂ (Heuser et al., 2020, S. 16) und damit das 250-fache der vom Hydrogen Council (2021) erwarteten Verbräuche. Wie schon früher Studien ermittelt haben, steht also grundsätzlich genügend regenerative Energie für die Wirtschaft der Menschen auf der Erde zur Verfügung. Wie diese genau gewonnen wird, ist an dieser Stelle zunächst sekundär und letztlich Gegenstand einer Optimierung von Kosten unter Beachtung der Verfügbarkeit der nötigen Rohstoffe. Mit Blick auf die Solarenergie ist z.B. anzunehmen, dass eine 24/7 Auslastung der Elektrolyseure wünschenswert wäre. Damit wäre es notwendig, Tag-Nacht-Energiespeicher zu installieren. In Verbindung mit Photovoltaik müssten dies Batteriespeicher sein und es ergäbe sich ein System mit einem sehr hohen Verbrauch seltener Rohstoffe. In Verbindung mit der Gewinnung von Solarwärme dagegen, könnte der Tag-Nach-Energiespeicher als Warmwasserspeicher ausgeführt werden, der Bedarf seltener Rohstoffe wäre geringer.

Die Schwierigkeit für die Weltwirtschaft liegt darin, die vorhandenen Potenziale durch den Bau geeigneter technischer Anlagen auch zu erschließen. Und in der Tat werden seit einigen Jahren Anlagen zur Herstellung von blauem und grünem Wasserstoff geplant. In 2019 waren weltweit Anlagen für eine Produktionsmenge von 2,3 Mio. t blauem und grünem Wasserstoff in Planung, die bis 2030 in Betrieb sein sollten. 2020 waren es mit dem Zeithorizont 2030 schon Pläne für 6,7 Mio. t, davon etwa 60 % grüner Wasserstoff (Hydrogen Council, 2021, S. 9). Noch etwas höhere Zahlen dokumentiert die IEA (2021a), die 350 Projekte der elektrolytischen Wasserstoffproduktion mit einer Kapazität von 5 Mio. t H₂/a und 56 Projekte für fossile Brennstoffe mit CCUS mit einer Kapazität von 9 Mio. t H₂ einschließlich 16 bestehender Anlagen aufführt (IEA, 2021a, S. 110). Weitere 40 der IEA bekannte Projekte sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Insgesamt könnte die elektrolytische Wasserstoffproduktion bis 2030 dann 8 Mio. t H₂ erreichen (IEA, 2021a, S. 110).

In einem Szenario „Angekündigte Zusagen“ berücksichtigt die IEA darüber hinaus alle nationalen Pläne, die die Regierungen bisher angekündigt haben, und geht davon aus, dass sie vollständig und fristgerecht umgesetzt werden (IEA, 2021a, S. 111). Bis 2050 müsste die weltweite Wasserstoffproduktion im Szenario „Angekündigte Zusagen“ 250 Mio. t H₂ erreichen, wobei 51 % dieser Menge durch Elektrolyse bereitgestellt würden, 15 % durch fossile Brennstoffe mit CCS und der Rest – also 34 % oder 85 Mio. t H₂, durch fossile Brennstoffe ohne CCS. Dies entspricht einer weltweiten Elektrolyseurkapazität von 1.350 GW und der Abscheidung von 400 Mio. t CO₂ pro Jahr (IEA, 2021a, S. 111). Der dauerhafte Weiterbetrieb der schon heute existierenden fossilen Wasserstoff-Gewinnungsanlagen würde allerdings dauerhaft zu erheblichen Emissionen von Treibhausgasen führen. Bei Emissionen von 11 kg CO₂ pro kg H₂ bei Reformierung des EU-Erdgasmix (DIHK, 2020, S. 8; Shell Deutschland Oil GmbH, 2017, S. 18) führt der dauerhafte Weiterbetrieb dieser Anlagen zu 935 Mio. t CO₂-Emissio

Das Wasserstoffdilemma

nen p.a. Würden die restlichen Wasserstoffmengen komplett klimaneutral hergestellt, ergäbe sich noch 2050 ein Mittelwert der CO₂-Emissionen für die gesamte Weltproduktion von Wasserstoff in der Höhe von etwa 233 gCO₂/kWh. Jede Aussage, es würde sich bei Wasserstoff um einen klimaneutralen Energieträger halten, sollte angesichts dieser Pläne kritisch hinterfragt werden.

Letztlich gibt es Aussichten, dass bis 2030 ca. 10 % des gegenwärtigen Wasserstoffbedarfs der Welt als grüner und blauer Wasserstoff produziert werden. Damit ist allerdings noch kein einziges kg Wasserstoff produziert, welches für neue Anwendungen zusätzlich zur Verfügung stehen würde. Dies könnte nur dann geschehen, wenn entweder die Ammoniakverwendung für die Düngerproduktion oder der Wasserstoffeinsatz in Raffinerien aufgrund sinkender Treibstoffproduktion deutlich zurückginge.

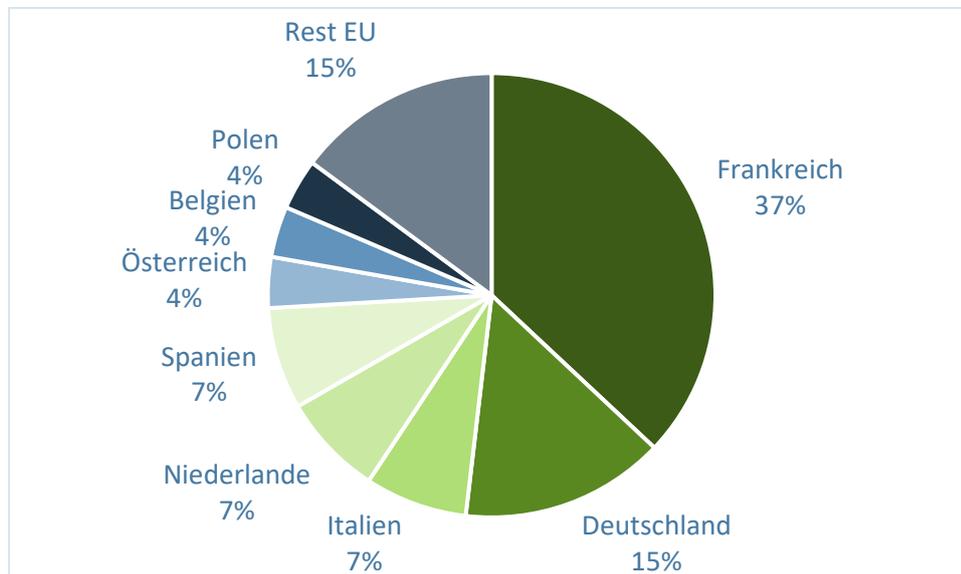
Was ist „Netzwasserstoff“?

Analog zum „Netzstrom“ sollte u.U. auch der Begriff „Netzwasserstoff“ eingeführt werden. Durch Bilanzierung der eingespeisten Mengen an grünem, blauem, grauem und andersfarbigem Wasserstoff würde sich ein Wert für die durchschnittlichen CO₂-Emissionen pro kWh Netzwasserstoff errechnen lassen.

4.2.2 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff in Europa

Die Europäische Union strebt an, bis zum Jahr 2030 in Europa Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von 40 GW zu installieren (World Energy Council Europe, 2021, S. 11), ein Zwischenziel sind 6 GW in 2024. Bis 2050 werden 500 GW für möglich gehalten.

Abbildung 9: Wasserstoffherzeugung in der Europäischen Union bis 2030



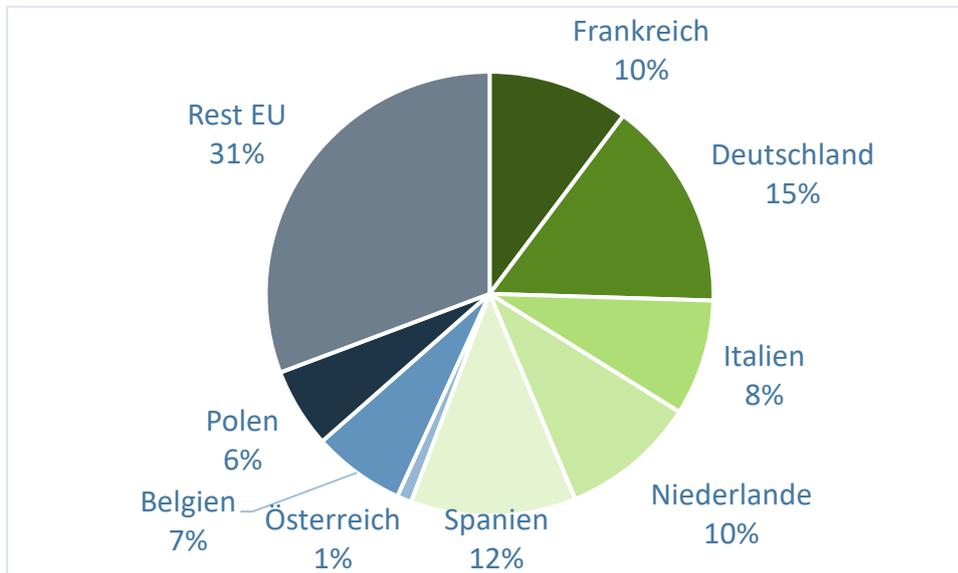
Quelle: (World Energy Council Europe (2021, S. 14), Gesamtmenge 2,6 Mio. Tonnen Wasserstoff

Für die Produktion dieser Gesamtmenge von 2,6 Mio. t Wasserstoff sollen insgesamt Elektrolyseanlagen mit einer Leistung von 40 GW (World Energy Council Europe, 2021, S. 11) installiert werden (Aufteilung nach Mitgliedstaaten Abbildung 9). Mit einer solchen Gesamtleistung ist es unter Annahme eines zunächst noch niedrigen Wirkungsgrades der Elektrolyseanlagen von 56 % theoretisch sogar

Das Wasserstoffdilemma

möglich, jährlich eine Menge von 5,5 Mio. t Wasserstoff zu produzieren. Bis 2050 soll die Produktion dann gegenüber 2030 mehr als verzehnfacht werden (Aufteilung nach Mitgliedstaaten siehe Abbildung 10).

Abbildung 10: Wasserstofferzeugung in der Europäischen Union bis 2050



Quelle: World Energy Council Europe (2021, S. 14), Gesamtmenge 28,5 Mio. t Wasserstoff

Die insgesamt benötigte Menge an Wasserstoff im Jahr 2050 ist allerdings noch recht unklar. In einem Projekt der europäischen Union liegen die Annahmen der Bedarfe für das Jahr 2030 durchweg unterhalb von einer Mio. t H₂/a und schwanken die Annahmen der Bedarfe für das Jahr 2030 zwischen fast Null und 17 Mio. t H₂/a (Fraunhofer ISI, TU Wien & Comllias, 2019, S. 17).

Die EU hält bis 2050 den Aufbau einer Erzeugungskapazität von 500 GW für möglich, mit der die avisierten Produktionsmengen theoretisch deutlich übertroffen oder auch mit deutlich weniger Volllaststunden als 24/7 erreicht werden könnte laut World Energy Council Europe (2021, S. 14).

4.2.3 Potenzial zur Herstellung von grünem Wasserstoff in Deutschland

Das bisher in Deutschland verfügbare Zahl an Elektrolyseuren für die Produktion von Wasserstoff ist gemessen an dem mittelfristigen Bedarf der Energieversorgung minimal. Mit einer Kapazität der deutschen Elektrolyseanlagen von ca. 100 MW (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH, 2018) können theoretisch ca. 530 GWh/a grüner Wasserstoff hergestellt werden⁴. In der Größenordnung von 100 MW/a bewegen sich auch die gegenwärtig jährlich realisierten Projekte zum Aufbau von Elektrolysekapazität (IRENA, 2019, S. 13)

Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie erwartet, dass diese Produktion bis 2025 auf ca. 8 TWh/a gesteigert werden kann, was einem jährlichen Wachstum von 72 % entspricht (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH,

⁴ Hierbei wird davon ausgegangen, dass auf Basis einer elektrischen Anschlussleistung von 1 kW ein Wasserstoffoutput von ca. 0,67 kW erreicht wird und die Anlagen ca. 8.000 Stunden pro Jahr in Betrieb sind.

Das Wasserstoffdilemma

2018, S. 6). Bis 2030 wäre eine Produktion von ca. 50 TWh/a realisierbar bei einem auf ca. 44 % fallenden Wachstum (a.a.O. S. 6). Diese optimistische Sicht wird vom World Energy Council nicht geteilt, das für 2030 einen Ausbau auf 5 GW Produktionsleistung mit einem Output von ca. 0,4 Mio. t H₂ (entsprechend ca. 13 TWh H₂) erwartet und den Output der heimischen Produktion bis 2050 auf 3,2 bis 5,5 Mio. t H₂ (106 bis 183 TWh) steigen sieht (World Energy Council Europe, 2021, S. 14).

In ähnlichen Größenordnungen bewegen sich auch die Zahlen in weiteren Studien (Dambeck et al., 2021; Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISE, & Fraunhofer ISI, 2021; Fraunhofer ISE, 2020; Öko-Institut e.V., 2021; Robinius, Markewitz, Lopion, Kullmann & Heuser, 2020). Die Metastudie des Öko-Instituts (Öko-Institut e.V., 2021, S. 68) weist Mittelwerte für die Wasserstoffproduktion in Deutschland von ca. 5 GW_{el} in 2030, 25 GW_{el} in 2040 und 50 GW_{el} in 2050 aus. Diesen Elektrolysekapazitäten wären bei ca. 3.000 Vollaststunden (Öko-Institut e.V., 2021, S. 69; Robinius et al., 2020, S. 37) Produktionsmengen von ca. 15 TWh/a in 2030, 75 TWh/a in 2040 und 150 TWh/a in 2050 zuzuordnen.

Hinzu kommen mögliche Mengen aus dem Import von Wasserstoff und daraus hergestellten Folgeprodukten wie Ammoniak oder Methan aus anderen Ländern. Das Öko-Institut (2021, S. 69ff) berücksichtigt bei der Abschätzung möglicher Importmengen die mehr oder weniger risikoreichen Investitionsbedingungen in den verschiedenen Ländern, die Schaffung der infrastrukturellen Voraussetzungen für den Import, die notwendigen Nachhaltigkeitsstandards für grünen Wasserstoff, mögliche Entwicklungen (politischer) Wasserstoffstrategien der Wasserstoffexporteure, den zu erwartenden zeitlichen Hochlauf von Wasserstoff-Produktionsanlagen in Exportländern wie auch die Entwicklung des kurzfristig (bis 2030) verfügbaren Exportpotenzials in EU-Nachbarländern. Das erwartbare Importaufkommen schätzt die Studie in den Phasen bis 2030 auf weniger als eine TWh ein, die auf Pilotprojekte zurückgeht. Zwischen 2030 und 2035 wachsen die Mengen zwar auf 20 bis 30 TWh/a, sind aber weiter mit hohen Unsicherheiten bzgl. des zeitlichen Rahmens, der Import- und Anlandungsinfrastrukturen verbunden (Öko-Institut e.V., 2021, S. 82). Ab 2035 hält die Studie aus dem Europäischen Wirtschaftsraum zzgl. UK den Import von zunächst 30-40 TWh/ zzgl. geringer, aber im Zeitverlauf zunehmender Mengen aus außereuropäischen Ländern für möglich. Für die Zeit ab 2040 macht die Studie mit Blick auf zahlreiche Unsicherheiten keine Aussage.

In Summe weist dies auf eine langfristig stark begrenzte Wasserstoff-Verfügbarkeit von 15 bis 16 TWh im Jahr 2030, 75 TWh bis 85 TWh in 2035 und bei weiter steigendem Import vielleicht 150 TWh in 2040 und 300 bis 400 TWh in 2050 hin.

Wofür aber soll der grüne Wasserstoff eingesetzt werden? Es läge nahe, zunächst den im Wirtschaftssystem etablierten „grauen“ Wasserstoff zu ersetzen und so Treibhausgasemissionen aus der Erzeugung von eben diesem grauen Wasserstoff zu vermeiden. Unter Beachtung der Tatsache, dass Deutschland im Jahr 2020 bereits ca. 1,6 Mio. t H₂ (ca. 50 TWh) verbraucht hat (World Energy Council Europe, 2021, S. 14), wäre also im Rahmen des Aufbaus einer grünen Wasserstoffwirtschaft bestenfalls ab 2035 mit einem Überschuss zu rechnen, der für andere als die bereits im Wirtschaftssystem etablierten Zwecke eingesetzt werden kann.

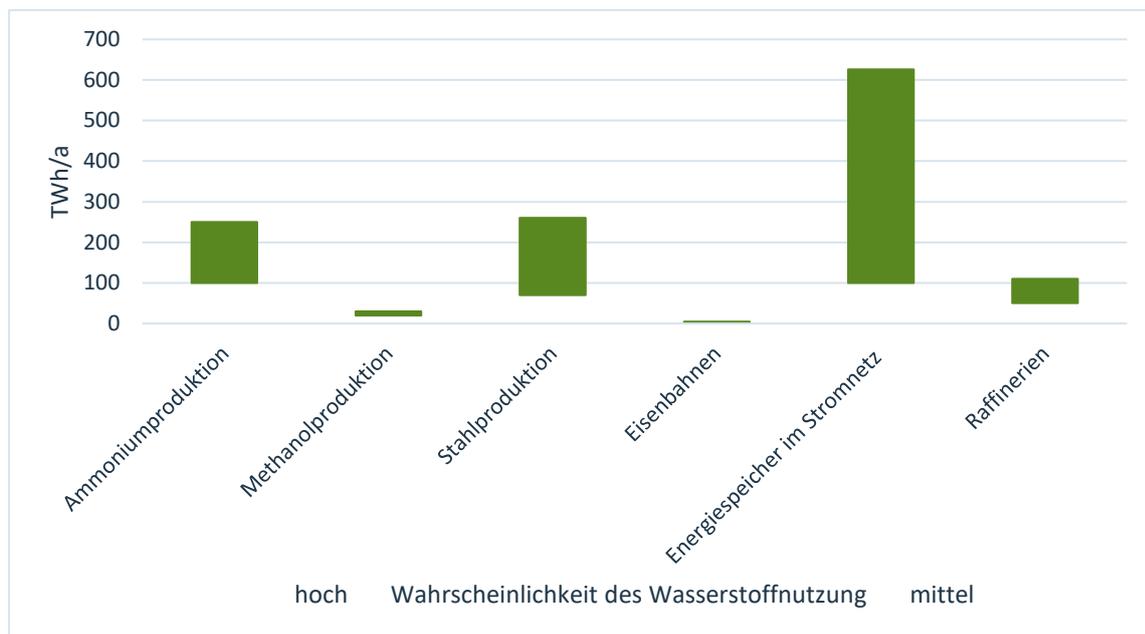
4.3 Bedarfe an Wasserstoff in Europa

Es gibt zahlreiche Studien, in denen Wasserstoffbedarfe für die Zukunft abgeschätzt werden (beispielhaft DIHK, 2020; IEA, 2019, 2021a; Lechtenböhmer, Samadi, Leipprand & Schneider, 2019; World Energy Council Europe, 2021). Mit Blick auf die teils erheblichen Unterschiede der Zahlenangaben

Das Wasserstoffdilemma

sowie die eher innovationspolitische Fragestellung der vorliegenden Studie ist aber von geringer Bedeutung, die „besten Zahlen“ zu ermitteln und im Detail zu belegen. Das Ziel dieser Studie ist eher, die Spannweite der Zahlen in den verschiedenen Studien auszuleuchten. Zur Beleuchtung der relativen Bedeutung der Bedarfe in einzelnen Sektoren greifen wir im Folgenden auf die im November 2021 publizierte Metastudie von Zachmann, Holz, Roth et al. (2021) sowie von Zachmann et al. (2022) zurück, die ihrerseits die Größenordnungen des Bedarfs in verschiedenen Sektoren abgeschätzt und bewertet haben. Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72) identifizieren Schlüsselsektoren, in denen Wasserstoff nachgefragt werden könnte, wobei sie die „wahrscheinliche“ und die „spekulative“ Nachfrage unterscheiden. Der wahrscheinlichen Nachfrage ordnen Zachmann et al. (2021, S. 71) Sektoren zu, die entweder bereits Wasserstoff verbrauchen oder in denen die Entwicklung in Industrie und Politik bereits heute stark auf eine aufkommende Nachfrage hindeuten. Die spekulative Nachfrage bezieht sich auf Sektoren, in denen Wasserstoff technisch gesehen eine wichtige Rolle spielen könnte, deren Wirtschaftlichkeit aber noch sehr unsicher ist. Innerhalb beider Bereiche sind die Sektoren nach abnehmender Wahrscheinlichkeit geordnet, dass Wasserstoff in Zukunft eine bedeutende Rolle in der Endnachfrage spielt. Die Grafik zeigt die Bandbreite des Endenergieverbrauchs für die Sektoren, die in einem Netto-Null-Szenario 2050 in der EU27 durch Wasserstoff gedeckt werden könnte. Die Zahlen sind das Ergebnis einer von einzelnen Sektoren ausgehenden Bottom-up-Analyse.

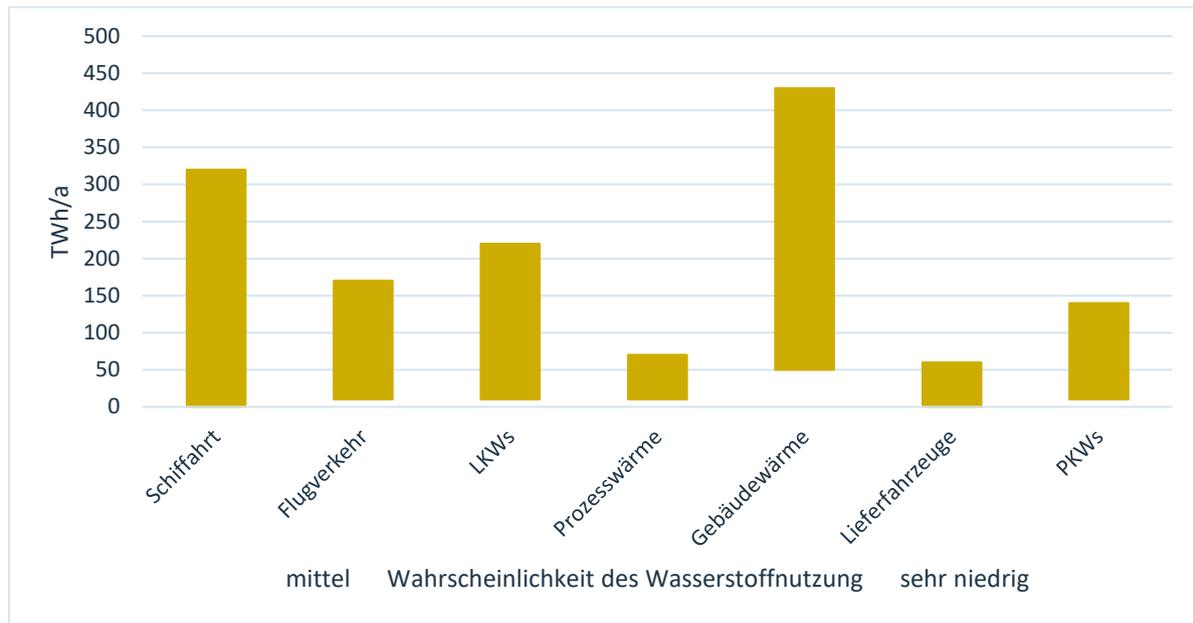
Abbildung 11: Wahrscheinliche Sektoren der Wasserstoffnutzung in der Europäischen Union in 2050



Quelle: Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72), Einsatz in der Saisonspeicherung für die Energienetze nach European Hydrogen Backbone & Gas for Climate (2021, S. 40)

Die wahrscheinlichen Bedarfe dieser Sektoren in Europa schätzen Zachmann et al. auf eine Spannweite von 241 bis 655 TWh H₂ pro Jahr.

Abbildung 12: Spekulative Sektoren der Wasserstoffnutzung in der Europäischen Union bis 2050



Quelle: Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72)

Die spekulativen Bedarfe dieser Sektoren in Europa schätzen Zachmann et al. (2021) auf eine Spannweite von 90 bis 1.410 TWh H₂ pro Jahr.

4.4 Bedarfe an Wasserstoff in Deutschland

Zahlreiche Studien haben versucht, den Wasserstoffbedarf in Deutschland für die nahe Zukunft bis 2050 zu ermitteln. Die Ergebnisse sind allerdings ausgesprochen unterschiedlich und umfassen nach Lechtenbömer (2019, S. 12) mindestens ein Spektrum von ca. 170 TWh/a bis zu 660 TWh/a, Petersen et al. (2022) veranschlagen die Menge sogar auf 1.000 TWh/a an Wasserstoff. Der Deutsche Verein für das Gas- und Wasserfach geht von einem Wasserstoffbedarf von 44 bis 84 TWh in 2030 und von 292 bis 754 TWh in 2045 aus (Gatzen & Reger, 2022). Das Öko-Institut (2021, S. 23) erklärt zumindest einige der Determinanten einer höheren oder niedrigeren Wasserstoffnachfrage in den Szenarien.

Tabelle 2: Determinanten der Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten (Öko-Institut)

Determinanten	Effekt	Erläuterung
Ambitionsniveau THG-Minderung	Je höher das Ambitionsniveau, desto größer die Nachfrage.	Für die langfristige Perspektive (2050) erreichen alle hier berücksichtigten Projektionen eine Emissionsminderung von mindestens 95 %. Der zeitliche Verlauf des Bedarfs ändert sich jedoch auch mit den unterschiedlichen Emissionsminderungstrajektorien.
Effizienz- und Suffizienzambitionen	Hohe Ambitionen führen zu geringen Wasserstoffbedarfen.	Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen geringerer Energienachfrage und der Nachfrage nach Brennstoffen.

Das Wasserstoffdilemma

Elektrifizierungsgrad	Hoher Elektrifizierungsgrad führt zu geringeren Wasserstoffbedarfen.	Der Grad der Elektrifizierung wird besonders durch die Elektrifizierung in der Wärmebereitstellung und im Verkehrsbereich bestimmt. Hier konkurrieren elektrische und wasserstoffbasierte Technologien direkt miteinander.
Einsatz von CCS	Einsatz von CCS führt zu geringeren Wasserstoffbedarfen.	Carbon Capture and Storage (CCS) ist ein relativ teures THG-Vermeidungsinstrument. Es setzt an CO ₂ -Punktemissionen an und steht damit z.B. in direkter Konkurrenz zum Einsatz von Wasserstoff in der Industrie.
Einsatz von Biomasse	Signifikanter Einsatz von Biomasse führt zu geringeren Wasserstoffbedarfen.	Brennstoffe, die auf Biomasse basieren, können direkt mit dem Einsatz von Wasserstoff konkurrieren.
Systemgrenzen	Betrachtung aller Sektoren führt zu höheren Wasserstoffbedarfen.	Insbesondere die Betrachtung der stofflichen Nachfrage in Industrie und Raffinerien ist nicht in allen Szenarien berücksichtigt. Hier wird Wasserstoff nicht als Energieträger, sondern als Stoff eingesetzt, z.B. um aus Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak (NH ₃) herzustellen.

Quelle: auf Basis von Öko-Institut (2021, S. 23)

Es scheinen aber darüber hinaus weitere Determinanten zu existieren.

- ▶ Die Dena-Leitstudie (2018) plant im Szenario TM 95 synthetische Energieträger, nämlich **synthetische Gase und Treibstoffe**, ein, für deren Produktion weitere Mengen an Wasserstoff produziert werden müssten. Damit wäre auch das Mengenverhältnis von Wasserstoff zu anderen synthetischen Brennstoffen eine Determinante, die in Konsequenz zu höheren oder niedrigeren Wasserstoffbedarfen führt. Im Elektrifizierungsszenario der Dena-Leitstudie (2018) fällt die Menge an sonstigen synthetischen Brennstoffen in 2050 deutlich niedriger aus, worin sich die vom Öko-Institut benannte Determinante „Elektrifizierung“ auswirkt.
- ▶ Eine weitere Determinante ist quasi die inverse zu den Effizienz- und Suffizienzambitionen und besteht in **Wachstumsannahmen**. Ein Beispiel findet sich im „Bericht zum Forschungsprojekt Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen (SiKuWa)“. Hier heißt es z.B. zum Flugverkehr: „*Abweichend von niedersächsischen Umweltministerium (NMU, 2016) nehmen wir allerdings eine sich in der Zukunft verändernde Nachfrage im Flugverkehr an, die sich an der vorhergesagten Zunahme für Personen-Flugverkehr (in Pkm) nach dem Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI, 2016) orientiert, den wir bis 2050 extrapolieren. Dieser sieht einen Zuwachs um 64,8 % zwischen 2010 und 2030 vor, was einem jährlichen Zuwachs von 2,52 % und damit einem Zuwachs zwischen 2018 und 2050 auf 222 % entsprechen würde*“ (Institut für Solarenergieforschung Hameln & Leibniz-Universität Hannover, 2020, S. 48f). Die kaum reflektierte Annahme eines weiteren 30 Jahre lang ungebremsen Wachstum führt wenig überraschend zu hohen Verbrauchsannahmen.

In kaum einem Szenario mitgedacht wird die Möglichkeit, den Energiebedarf durch suffizienteres Verhalten zu senken. Mit Blick auf einen sich zuspitzenden Klimawandel bei gleichzeitig zu langsamen Fortschritten im Ausbau der Energiebereitstellung durch erneuerbaren Strom und erneuerbaren Wasserstoff scheint es zumindest aus Sicht der Wissenschaft geboten, eine noch zu entwickelnde Politik der volkswirtschaftlichen Suffizienz ins Gespräch zu bringen. Die Vermeidung des Gebrauchs energie- und materialintensiver Produkte und Dienstleistungen wäre besonders dort zu empfehlen, wo deren messbarer Beitrag zu Wohlstand und Wohlbefinden nur niedrig ist.

5 Konkurrierende Innovationspfade

Nicht in allen Anwendungsbereichen von Wasserstoff gibt es konkurrierende Innovationspfade. In einigen Anwendungen geht es „nur“ darum, dass sich grüner Wasserstoff gegen alte und fossile Energien durchsetzt. Da diese Studie auf eine richtungssichere Politik zielt, die unter mehreren Alternativen die zukunftsfähigste und nachhaltigste entwickelt und fördert, spielen die Anwendungen, die nur mit fossilen Energien konkurrieren, hier keine Rolle. Bezogen auf die in Abbildung 11 und Abbildung 12 aufgeführten Sektoren gilt diese Situation für die **Ammoniak- und die Methanolproduktion**, die **Stahlproduktion**, den Einsatz in **Raffinerien** und auch für die Verwendung als **Energiespeicher im Stromnetz**⁵, für die gegenwärtig kaum serienreife Alternativen für die Langzeitspeicherung von Strom zur Verfügung stehen.

Einen Sonderfall stellt der **Flugverkehr** dar. Es ist für das Betreiben von Flugzeugen auf der Langstrecke kaum eine andere machbare Alternative zu fossilem Kerosin als synthetisches Flugbenzin bekannt, aber auch die Verwendung von synthetischem Flugbenzin führt nur zu kleinen Klimaschutzeffekten in Höhe von 33 % der Treibhausgasemissionen. Es wird daher kaum ein Weg daran vorbeiführen, den Flugverkehr radikal einzuschränken oder zu elektrifizieren. Im Fall des Flugverkehrs erscheint daher die Richtungsunsicherheit besonders groß.

Für die Analyse konkurrierender Innovationspfade verbleiben:

- ▶ **PKWs**, bei denen neben dem Antrieb mit Wasserstoff der Elektroantrieb auf der Agenda steht, sowie **Lieferfahrzeuge**, **LKWs** und **Busse** sowie **Eisenbahnen**, bei denen sich dies ähnlich darstellt,
- ▶ die **Gebäudewärme**, bei deren Erzeugung die Elektrifizierung mit der Wärmepumpe und die Verwendung großer Mengen Biomasse konkurrieren,
- ▶ die **Schifffahrt**, bei der sich das Problem der Speicherung großer Energiemengen für lange Non-Stop-Fahrten stellt und der Antrieb mit Wasserstoff mit dem Segelantrieb konkurriert,
- ▶ sowie die **industrielle Prozesswärme**, bei der die BDI-Studie zu Klimapfaden (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) auf den Einsatz riesiger Mengen Biomasse und eine Studie des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (Madeddu et al., 2020) auf eine fast vollständige Elektrifizierung setzt.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über diese Anwendungsbereiche und schildern Vor- und Nachteile der jeweils konkurrierenden Alternativen. Ergänzend wird die Perspektive der **volkswirtschaftlichen Suffizienz** beleuchtet, die durch eine Politik der Reduktion von Energie- oder Materialverbrauch wie auch der Mobilität problemfeldübergreifend das Nicht-Verbrauchen als Alternative des Verbrauchens ins Spiel bringen könnte.

5.1 PKW: Elektrifizierung versus Wasserstoff

Für den Antrieb von Fahrzeugen mit erneuerbaren Energien existiert eine Reihe konkurrierender Konzepte. Neben dem direkten Einsatz von Strom in batteriebetriebenen Fahrzeugen sind dies die

⁵ Während es zahlreiche Technologien für die Energiespeicherung über Minuten, Stunden oder Tage gibt, ist die Energiespeicherung für mehrere Wochen oder Monate zur Absicherung der Strom- Wärmeversorgung im Winter nur über sensible Wärmespeicher (z.B. Erdbeckenspeicher oder geothermische Speicher) sowie über Speicherung in Form chemisch gebundener Energie (Wasserstoff, synthetisches Methan, Methanol oder Ammoniak) möglich (Bundesamt für Energie, 2021).

Das Wasserstoffdilemma

Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff und dessen Rückumwandlung in Strom sowie der Einsatz von aus Wasserstoff hergestellten flüssigen oder gasförmigen Treibstoffen in Verbrennungsmotoren. Wie Abbildung 4 zeigt, ist die Herstellung von Wasserstoff und dessen Re-Elektrifizierung in einer Brennstoffzelle mit erheblichen Verlusten verbunden. Noch deutlich größer sind die Verluste, wenn zunächst aufwendig flüssige oder gasförmige Treibstoffe hergestellt und diese anschließend in Verbrennungsmotoren in mechanische Energie verwandelt werden. Die Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Brennstoffzelle dümpeln seit Jahren dahin:

Tabelle 3: Zulassungszahlen Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle 2015 bis 2021

Fahrzeugklasse	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Krafträder	-	-	-	-	-	-	-
Personenkraftwagen	74	49	120	151	208	308	461
Kraftomnibusse	-	-	-	-	11	25	11
Lastkraftwagen	-	-	-	-	-	-	5
Zugmaschinen	-	-	1	-	-	-	-
Sonstige Kfz	-	-	-	-	-	8	19
Insgesamt	74	49	121	151	219	341	496

Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt (2022a)

Gegenüber dem Weg über synthetische Treibstoffe ist der batterieelektrische Antrieb 5 bis 6-mal effizienter, gegenüber der Brennstoffzelle 2,5 bis 3-mal. Es ist daher kein Wunder, wenn z.B. die Wasserstoffstrategie von Thüringen feststellt: „Im Individualverkehr, speziell beim PKW, dürften jedoch, insbesondere aufgrund des höheren Wirkungsgrades, auf absehbare Zeit überwiegend batteriebetriebene Fahrzeuge zum Einsatz kommen“ (Freistaat Thüringen Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, 2021, S. 7f). Auch der von Zachmann et al. (2022, S. 6) durchgeführte und in Abbildung 7 dargestellte Vergleich der Systemkosten zeigt eindeutig erhebliche Kostennachteile bei aus Wasserstoff hergestellten Brennstoffen gegenüber dem direkten Einsatz von Strom. Die Stadt Montpellier in Frankreich hat Anfang 2022 aus diesem Grunde 51 bereits geordnete Wasserstoffbusse wieder abbestellt und wird stattdessen Elektrobusse einsetzen, deren Betriebskosten um über 80 % niedriger liegen sollen (Stahl, 2022a). Auch die Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen in Deutschland weisen darauf hin, dass mit Wasserstoff betriebene Straßenfahrzeuge bisher kaum als gute und wettbewerbsfähige Wahl empfunden werden.

Tabelle 4: Fahrzeugzulassungen im Jahr 2021

	KraftfahrzeugeInsgesamt	davon Elektro (BEV)	davon Brennstoffzelle (Wasserstoff)	davon Wasserstoff
Krafträder	200.231	4.096	-	1
Personenkraftwagen	2.622.132	355.961	461	-
Kraftomnibusse	6.474	590	11	7
Lastkraftwagen	293.359	13.247	5	-
Zugmaschinen	90.039	85	-	-
Sonstige Kfz	21.656	170	19	-
Summe	3.263.589	374.153	496	8

Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt (2022b), FCEV PKW korrigiert um - 3 Honda E

Das Wasserstoffdilemma

Nicht nur die Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen waren höher, auch das Angebot war differenzierter. Während das KBA (2022c) die Zulassung von 75 verschiedenen batterieelektrischen Modellen dokumentiert, wurden nur zwei verschiedene Modelle mit Wasserstoffantrieb zugelassen: Vom 2014 erstmals verkauften Toyota Mirai wurden 308 Stück zugelassen, vom 2018 eingeführten Hyundai Nexo 152 Stück und nach Angabe des KBA auch drei Honda E (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d), der aber als Wasserstoffmodell überhaupt nicht verfügbar ist. Bezogen auf die verkauften batterieelektrischen PKW liegt der Absatz von Wasserstoff-PKW bei ca. 1,3 Promille. Mercedes hat die Produktion des Modells MB GLC F-Cell Mitte 2020 nach weniger als zwei Jahren Bauzeit ohne Nachfolgemodell eingestellt (Hommen, 2020) und Honda stellte die Fertigung seines H₂-Modells Clarity 2021 nicht nur ebenfalls ein, sondern empfiehlt auch Toyota, sich aus der Technologie zurückzuziehen (Stahl, 2022b). Über Hyundai wird berichtet, dass nicht nur die Abteilung zur Entwicklung von Verbrennungsmotoren, sondern auch die Abteilung für Brennstoffzellenantriebe geschlossen wird (Taylor, 2021). Und der Toyota-CEO Akio Toyoda hat jüngst angekündigt, bis 2030 30 Elektromodelle auf den Markt zu bringen und deutet so einen Strategiewechsel angesichts weltweit wachsender BEV-Absatzzahlen auch für Toyota an (Stahl, 2022b). Zumindest mit BMW findet Toyota ab 2022 einen neuen Kunden für seine Brennstoffzelle. Der „Wasserstoff X5 komme allerdings nur in einer Kleinserie für Demonstrations- und Erprobungszwecke auf die Straßen“ (Stegmaier, 2021). „Für die Masse wird Wasserstoff keine Lösung sein“, erklärt der Entwicklungsvorstand von BMW im September 2021 (Stegmaier, 2021).

Hyundai stellt die Entwicklung von Wasserstoff PKW vermutlich ein

Mit Toyota und Hyundai gibt es nur zwei Hersteller von Wasserstoff-PKW weltweit. Nachrichten von Hyundai lassen darauf schließen, dass das Unternehmen sich in Zukunft auf den Elektroantrieb konzentriert.

Auch andere Fahrzeugtypen mit Wasserstoffantrieb sind noch selten. Ca. 1,9 % der verkauften Null-Emissions-Busse fahren mit Brennstoffzelle und Wasserstoff und weitere 1,2 % fahren mit Wasserstoff und Verbrennungsmotor. Nur 0,4 Promille der Null-Emissions-Lastkraftwagen fahren mit Wasserstoff und Brennstoffzelle, keiner mit H₂-Verbrennungsmotor. Und letztlich gibt es noch ein einsames Kraftrad mit Wasserstoffantrieb (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b).

Bleibt zu fragen, weshalb in der Öffentlichkeit nach wie vor das Wasserstoffauto so herbeigeseht wird. Im August 2021 hat „Der Spiegel“ über 5.000 Personen fragen lassen: „Welche dieser Verkehrsmittel sollten Ihrer Meinung nach am dringendsten staatlich gefördert werden, um die Verkehrswende in Deutschland voranzutreiben?“. Priorisiert wird hier eine Förderung von ÖPNV (61 %) und Fernverkehr der Bahn (41 %), gefolgt von Brennstoffzellenautos mit Wasserstoff (39 %), E-Bikes und Lastenrädern (15 %) und dann erst batteriebetriebenen Automobilen (14 %) (Sorge, 2021). Der Autor sieht, ähnlich wie bei der Sichtweise auf den Klimawandel (infratest dimap, 2019), einen Zusammenhang mit der politischen Orientierung (Sorge, 2021):

Besonders viele Fans hat die Brennstoffzelle bei Wählerinnen und Wählern von Union und FDP. Fast jeder Zweite von ihnen wünscht sich Unterstützung für die Technik. Bei Grünenanhängern liegen Wasserstoff und Batterie am dichtesten beieinander (28 H2 zu 23 Prozent Batterie).

Viele Deutsche können sich das Autofahren ohne dafür einen Tank zu füllen offenbar noch nicht vorstellen. Und fast verwirrt es, dass im August 2021 nur 23 % der Anhänger der Grünen und 14 % der Anhänger der CDU die Förderung batterieelektrischer Automobile präferieren (AFD 2 %) (Sorge, 2021) und der Marktanteil schon im Dezember bei 21,3 % lag. Und auch im Frühjahr 2022 finden wir

Das Wasserstoffdilemma

ähnliche Präferenzen. 32,0 % der von Mobile.de Befragten favorisieren Wasserstoff als Antriebsart der Zukunft, nur 14,8 % wollen Elektrofahrzeuge (Oppenheimer, 2022). Oder sollte der Grund für die Wasserstoffauto-Präferenz darin liegen, dass deren Nichtverfügbarkeit durchaus bekannt und eine gute Entschuldigung dafür ist, den guten alten Verbrenner noch länger zu fahren?

In der Öffentlichkeitsarbeit für Wasserstoffautos werden zwei Vorteile immer wieder betont: eine vergleichsweise hohe Reichweite und kurze Tankzeiten. Aber wie weit tragen diese beiden Argumente eigentlich? Die Reichweite des Toyota Mirai wird nach WLTP mit 650 km angegeben, die des Hyundai Nexo mit 666 km. Beide kosten viel Geld, je nach Ausstattung 75.000 € bis 95.000 €. Auto Bild berichtet für hochwertige Elektroautos in der Preisregion von 50.000 € bis 100.000 € über Reichweiten in derselben Größenordnung (Jeß, 2022). Auch der Global EV Outlook der IEA lässt bei der Flottenanalyse keine systematischen Unterschiede in der Reichweite erkennen (IEA, 2021b, S. 30). Und das Laden von 300 km zusätzlicher Reichweite dauert bei diesen Autos bei 300 kW Ladeleistung auch nur noch 20 Minuten.

Das Gebrauchtwagenportal Carwow (2022) stellt allerdings darüber hinaus noch weitere Vor- und Nachteile von Wasserstoffautos dar:

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Wasserstoffautos

Vorteile	Nachteile
✓ lokal emissionsfrei	✗ Wasserstoff kommt nicht natürlich vor
✓ kurze Tankzeit	✗ hoher Anteil fossiler Energien nötig
✓ hohe Reichweite	✗ geringe Tankstellenabdeckung
✓ widerstandsfähig gegen Kälte	✗ Wasserstoffmodelle sind teuer und selten
✓ sehr sicher auch bei Unfällen	✗ Technik noch nicht ausgereift

Quelle: auf Basis von Carwow (2022)

In die Bewertung des hohen Anteils fossiler Energien fließt hier der Blick auf die europäische Wasserstoffproduktion mit gegenwärtig 2 % Anteil an grünem Wasserstoff ein. Die kurze Tankzeit könnte sich dadurch relativieren, dass eine erhebliche Anfahrtstrecke erforderlich sein könnte, um eine der ca. 100 Wasserstofftankstellen zu erreichen. Der H₂-Tankstellenbetreiber H2-Live argumentiert dagegen so: „Das Basisnetz für 700 bar Betankung wird in den nächsten Monaten auf 100 wachsen. Dann können über 6 Millionen Autofahrer auf Wasserstoff umsteigen, ohne größere Umwege in Kauf nehmen zu müssen“ (H2-Live, 2022). Carwow sieht das anders und spricht von „unglaublich“ wenig Tankstellen und argumentiert weiter: „Will man mit dem Wasserstoffauto in den Urlaub, sieht es noch schlechter aus. Die deutschen Nachbarländer kommen über fünf Tankstellen nicht hinaus – das macht eine Urlaubsfahrt so gut wie unmöglich“ (Carwow, 2022).

Was also ist es, was die Meinung der Automobilisten vom Wasserstoffauto so positiv macht? Vielleicht einfach „das Tanken“? Die Tatsache, dass man mit einem Wasserstoffauto wie gewohnt tanken fahren kann und insoweit alles so bleibt „wie immer“, könnte in der Tat ein wichtiger Grund sein. Das Verhalten ändern zu müssen, ist eines der wichtigsten Hemmnisse der Diffusion von umweltfreundlichen Produkten im Massenmarkt (Clausen & Fichter, 2019).

Das Wasserstoffdilemma

Zur Beurteilung des Wasserstoffantriebs sind weiter die Treibstoffpreise von Bedeutung. Beim gegenwärtig geltenden Einheitsverkaufspreis von 9,50 €/kg incl. MwSt. (H2-Live, 2022) betragen die Treibstoffkosten mit dem Wasserstoffauto zwischen 10 € und 12 € auf 100 km. Ein Elektroauto mit 20 kWh/100 km an der heimischen Ladesäule zu 32 Cent/kWh aufgeladen, schlägt mit nur 6,40 €/100 km zu Buche, wovon mehr als die Hälfte Steuern und steuerähnliche Umlagen sind. Strombeschaffung und Netzbetrieb machen die andere Hälfte aus. Viktorsson et al. (2017, S. 12) sehen mit Blick auf mögliche dauerhaft auskömmliche Endverkaufspreise an H₂-Tankstellen in Belgien Kostensenkungspotenziale auf ca. 6,70 €/kg (8 € incl. MwSt.) unter den Annahmen, dass die Investitionskosten für Elektrolyseure um ca. 80 % fallen und der Stromeinkaufspreis am Elektrolyseur (also inkl. Netzkosten) 4 Cent/kWh nicht übersteigt. Wird aus Gründen der Gleichbehandlung der im Wettbewerb stehenden Kraftstoffe von einer den Stromsteuern entsprechenden Besteuerung des Wasserstoffs für den Einsatz als Kraftstoff ausgegangen, würde sich langfristig, nach Realisierung der beschriebenen Investitions- und Strombeschaffungskosten, bei einem Anteil von Steuern und Abgaben von 50 % ein Verkaufspreis von 13,40 €/kg einstellen. Alternativ ist vorstellbar, dass zwar der Wasserstoff nur gering besteuert wird, wiederum aus Gründen der Gleichbehandlung aber die Stromsteuern deutlich gesenkt werden. Auch in diesem Szenario würde die Elektromobilität erhebliche Kostenvorteile gegenüber dem Antrieb mit Wasserstoff aufweisen.

In einem Wirtschaftlichkeitsvergleich von Elektroantrieb und Wasserstoff errechnet das Öko-Institut Kostenvorteile für den Wasserstoff aber nur unter der Annahme von Wasserstoff-Verkaufskosten von 3 €/kg oder weniger und hoher Jahresfahrleistungen von 20.000 km und mehr (Öko-Institut e.V., 2021, S. 50). Die Studie geht davon aus, dass für alle Energieträger dieselben Steuern und Abgaben anfallen, so dass diese im Wirtschaftlichkeitsvergleich außen vor bleiben können (Öko-Institut e.V., 2021, S. 43).

Kombiniert man die Erkenntnisse beider Studien, erscheint die Wahrscheinlichkeit des wirtschaftlichen Betriebs von Wasserstoff-PKWs mit Blick auf die Treibstoffkosten als sehr niedrig. Während Viktorsson et al. (2017, S. 12) 6,7 € netto für langfristig darstellbar halten, sieht das Öko-Institut die Wettbewerbsfähigkeit nur bei einem Preis von 3 €/kg als gegeben an (Öko-Institut e.V., 2021, S. 50). Auch die hohen Verkaufspreise der einzigen am Markt verfügbaren Modelle sowie die Tatsache, dass keine Tendenz zu Preissenkungen oder preiswerteren Modellen zu erkennen ist, weist darauf hin, dass kaum eine Chance zu eigendynamischer Marktentwicklung existiert.

Die daraus logisch folgende Lobbystrategie für die Wasserstoff-Befürwortenden muss sich auf die möglichst vollständige Ausnahme von Wasserstoff nicht nur für industrielle, sondern auch für eigentlich dauerhaft unwirtschaftliche Anwendungen im Verkehr aus sämtlichen Steuern und Abgaben richten. Hinzu kommt die Notwendigkeit, durch intensive Lobbyanstrengungen extreme Förderhöhen zu erwirken. Hier war Hyundai Anfang 2022 ungewöhnlich erfolgreich. Die NOW GmbH gewährte dem Hersteller eine Förderung von jeweils 14.299 € für nicht weniger als 800 Brennstoffzellenfahrzeuge, die Hyundai an den Leasinganbieter Allane SE, vormals Sixt Leasing, verkauft (Hajek, 2022). Der Deal wird dadurch fragwürdig, dass die Allane SE eine 92%ige Tochter der Hyundai Capital Bank Europe ist und Hyundai damit eigentlich die Autos an sich selbst verkauft (Hajek, 2022). Zudem existiert parallel die Elektroauto-Prämie, die sich allerdings nur auf 6.000 € pro Auto beläuft und für Wagen der Preisklasse des Hyundai Nexo nicht gezahlt wird. Die Regeln dieser Prämie umgeht die NOW offenbar absichtlich. Warum diese extrem teuren Leasingwagen von der NOW mit 11,4 Mio. € gefördert werden, erklärt sich auch durch die Presseerklärung der NOW (2022) zu dem Deal nicht wirklich:

Das Wasserstoffdilemma

Kurt-Christoph von Knobelsdorff, Geschäftsführer der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH): „Zur Klimaneutralität im Verkehrssektor führen mehrere Wege. Wenn ein Unternehmen wie die Allane Mobility Group bis zu 800 Exemplare vom Hyundai NEXO vermarktet, ist das ein starkes Signal an den Markt und zeigt, dass die Brennstoffzelle in der Mobilität auch im Pkw Perspektive hat.“

Knobelsdorff beschwört hier eine Perspektive die, wie oben gezeigt wurde, eigentlich nicht vorhanden ist. In der Presseerklärung der NOW findet sich dann auch Platz für einen Werbeblock (NOW, 2022):

Enorme Reichweite, futuristisches Design, moderne technische Ausstattung: Der Hyundai NEXO ist der vorläufige Höhepunkt der 20-jährigen Wasserstoff-Pionierarbeit von Hyundai: Der perfekte Null-Emissions-Antrieb für jeden Tag – doch alles andere als alltäglich! ... Der Hyundai NEXO lässt sich in nur fünf Minuten volltanken⁶ und hat eine Reichweite von bis zu 756 km⁷. Zudem verfügt er über moderne Multimedia-Konnektivität und Smart Sense Sicherheitssysteme. Weitere Infos zum Fahrzeug und zum Tankstellennetzwerk gibt es auf www.hyundai.de/gewerbekunden/aktionen-und-angebote.

Der wahre Grund der Förderung könnte aber, auch das wird aus der Presseerklärung deutlich, darin liegen, dass die Fahrzeuge bereits produziert waren und am Markt nicht erfolgreich abgesetzt werden konnten (NOW, 2022):

Bei den Fahrzeugen handelt es sich um voll ausgestattete, kurzfristig verfügbare Fahrzeuge mit dem beliebten Prime-Paket. Die Lieferzeit beträgt rund drei bis vier Wochen.

Trotz der offensichtlichen Effizienz Nachteile, den ausbleibenden Skaleneffekten, dem schleppenden Ausbau des Tankstellennetzes und den nach wie vor hohen Herstellungskosten von Brennstoffzellen-PKW werden nach wie vor Wasserstoff-PKW angeboten. Sowohl einige wenige Autohersteller wie auch die Wasserstofflobby hält an ihnen fest. Könnte es daran liegen, dass die Auslastung der vermutlich deutlich defizitären Tankstellen ohne eine PKW-Flotte kaum sicherzustellen ist? Gegenwärtig liegt die Wasserstoffnachfrage bei H₂-Mobility bei 20 t monatlich (H₂-Live, 2022), was bei ca. 100 Tankstellen etwa 200 kg oder 1.900 € Umsatz pro Tankstelle bedeutet. Bei Baukosten im Millionenbereich liegt auch hier ein wirtschaftlicher Betrieb in weiter Ferne.

Fazit PKW und Wasserstoff

Obwohl PKW mit Brennstoffzellenantrieb seit 2014 verfügbar sind, wächst ihr Absatz nur auf extrem niedrigem Niveau und sehr langsam. Die Aussichten auf einen wirtschaftlichen Betrieb sind im Vergleich zum batterieelektrischen PKW auch mittel- oder langfristig düster, da die geringe Effizienz dauerhaft zu höheren Kosten beim Treibstoff führen muss. Obwohl in Deutschland nur 3 % der weltweiten Wasserstoffflotte unterwegs ist, verfügt Deutschland über 17 % der H₂-Tankstellen der Welt (IEA, 2021b, S. 36). Und dennoch behindert die geringe Zahl der Tankstellen die Verbreitung von Wasserstoff-PKW deutlich. Es ist stark zu bezweifeln, dass für Wasserstoff-PKW in Zukunft ein

⁶ Betankung mit 700 bar.

⁷ Die maximale Reichweite beträgt bis zu 756 km bei idealen Verkehrsbedingungen, Fahrzeugausstattungen und optimaler Fahrweise. Im realen Fahrbetrieb kommt es zu einer geringeren Reichweite.

Markt existiert. Zudem schränkt die kontinuierliche Leistungssteigerung von Batterien mit Blick auf Reichweite und Ladezeit die Marktchancen der Brennstoffzellentechnik weiter ein.

5.2 Lieferfahrzeuge, LKWs und Busse: Elektrifizierung versus Wasserstoff

Die Marktentwicklung verläuft für den Brennstoffzellenantrieb auch im Nutzfahrzeugsegment für den Wasserstoff schleppend. In 2021 wurden in Deutschland gerade einmal 11 Brennstoffzellenbusse mit Wasserstoff sowie sieben weitere mit Wasserstoff - und zusätzlich vermutlich Verbrennungsmotor - zugelassen (vgl. Tabelle 4). Hinzu kommen fünf Lastwagen und 19 „sonstige“ Fahrzeuge mit Brennstoffzelle.

Busse mit Elektroantrieb erreichten dagegen europaweit bereits in 2021 eine Verkaufszahl von 3.282 und damit einen Marktanteil von 21,7 % (Schreiber, 2022). In ganz Europa notiert die „Fuel Cell Electric Buses Knowledge Base“ dagegen nur eine Zahl von 27 Wasserstoffbussen, die in acht Städten erprobt werden (Fuel Cell Electric Buses Knowledge Base, 2022).

Auch weltweit sind die Zahlen noch klein. Von den etwa 5.500 Bussen mit Brennstoffzelle fahren ca. 94 % in China und nur ca. 300 verteilen sich auf andere Länder, davon in Deutschland knapp 50 (IEA, 2021b, S. 36). Von den weltweit etwa 3.300 Lastkraftwagen fahren sogar ca. 99 % in China (IEA, 2021b, S. 36), sodass für andere Länder nur ca. 30 übrig bleiben. In Deutschland wurden davon in 2017 eine Zugmaschine und in 2021 fünf LKW zugelassen. Dagegen sind weltweit inzwischen rund 30.000 batterieelektrische Lkw in Betrieb (Plötz, 2022).

Die Frage der Kraftstoffkosten ist auch für Nutzfahrzeuge kritisch. Auch hier gelten die Überlegungen von Viktorsson et al. (2017, S. 12) zu langfristigen Kostensenkungspotenzialen auf ca. 6,7 €/kg (8 € incl. MwSt.) unter den Annahmen, dass die Investitionskosten für Elektrolyseure um ca. 80 % fallen und der Stromeinkaufspreis am Elektrolyseur (also incl. Netzkosten) 4 Cent/kWh nicht übersteigt, was incl. fairer Steuern und Abgaben von 50 % zu einem Verkaufspreis von 13,40 €/kg führen würde.

In einem Wirtschaftlichkeitsvergleich von Dieselantrieb und Wasserstoff errechnet das Öko-Institut keinerlei Kostenvorteile für den Wasserstoff selbst bei eigentlich unerreichbaren Wasserstoff-Verkaufskosten von 3 €/kg oder weniger (Öko-Institut e.V., 2021, S. 43ff). Nur in Kombination mit 80 % Zuschüssen auf die Investitionskosten wird eine Perspektive bei Wasserstoff-Verkaufskosten von 3 €/kg oder weniger gesehen. Ifeu und PTV-Consult sehen mit dem Blick auf das Jahr 2030 auf 98 % der gefahrenen Relationen einen Kostenvorteil für batterieelektrische LKW gegenüber dem Diesel (Jöhrens et al., 2022, S. 7). Wird dagegen der Wasserstoff im Inland hergestellt, finden sie keine Relation, auf der der Wasserstoff-LKW wirtschaftlich verkehren könnte. Für Importwasserstoff zeigt sich ein Kostenvorteil gegenüber dem Diesel auf 31 % der Relationen nur, wenn der Wasserstoff für 4,57 €/kgH₂ angeboten wird (Jöhrens et al., 2022, S. 8), was aber wie oben ausgeführt wurde eher unwahrscheinlich ist.

Der Weg zu einer größeren LKW-Flotte mit Wasserstoffantrieb wird schwer. Die zum VW-Konzern gehörende Scania hat die Entwicklung von Brennstoffzellen-LKW zunächst zugunsten von elektrifizierten Modellen zurückgestellt (Schmidt, 2021). Begründet wird dies mit dem ungefähr dreimal höheren Primärenergiebedarf und den daraus erwachsenden hohen Treibstoffkosten sowie einem befürchteten kostenintensiven Wartungsaufwand. Ähnlich positioniert sich die VW-Sparte Traton, zu der neben Scania auch MAN, Volkswagen Caminhões e Ônibus, Navistar und RIO gehören (Gründler & Kammer, 2021):

Das Wasserstoffdilemma

Auch bei TRATON, einem der weltweit führenden Nutzfahrzeughersteller, rechnen wir mit einer Transformation Europas hin zur Wasserstoffwirtschaft – insbesondere in schwer zu dekarbonisierenden Industrien, etwa in Stahlwerken. Doch im Lkw-Verkehr, gerade auf der Langstrecke, werden reine E-Lkw in den meisten Fällen die günstigere und umweltfreundlichere Lösung sein. Denn der Wasserstoff-Lkw hat einen entscheidenden Nachteil: Nur etwa ein Viertel der Ausgangsenergie fließt in den Antrieb, drei Viertel gehen durch Umwandlungsverluste verloren. Beim E-Lkw ist das Verhältnis umgekehrt.

Daimler Truck AG und Volvo Group AB bündeln seit März 2021 ihre Wasserstoff Aktivitäten in der Cellcentric und streben an, serienreife Brennstoffzellensysteme zu entwickeln, zu produzieren und zu vermarkten (Cellcentric, 2022). Geplant ist der Beginn der Kundenerprobung von Brennstoffzellen-LKW in etwa drei Jahren und die Aufnahme der Serienproduktion in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts. Die anderen europäischen LKW-Hersteller suchen ihr Heil in Kooperationen. DAF sieht in Wasserstoff „eine interessante Option für die Zukunft“ und kooperiert mit Toyota und Shell im Unternehmen PACCAR (DAF, 2022), Renault Vehicules Industrielles mit Plug Power im Unternehmen Hyvia (electrive.net, 2021) und Iveco hat ins US-Amerikanische Nikola investiert und will mit Nikla zusammen sowohl elektrische wie wasserstoffgetriebene LKW bauen. Losgehen soll es schon 2022 in einer Iveco-Produktionsstätte in Ulm (ehedem Magirus Deutz), allerdings mit Elektrolastwagen (Kunkel, 2021).

Das Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung bezweifelt aber, dass die Wasserstoff-LKW rechtzeitig auf den Markt kommen werden. Der früheste Starttermin für Serien-Brennstoffzellen-LKW wird für das Jahr 2027 angekündigt. Aber zu diesem Zeitpunkt werden batterieelektrische LKW der zweiten Generation bereits auf den Straßen sein (Plötz, 2022). Plötz sieht daher das Zeitfenster für die erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen-LKW als geschlossen an und sieht für Wasserstoff-LKW nur noch eine kleine Nische, nämlich den Transport schwerer Lasten in entlegene Gebiete (Plötz, 2022).

Fazit Nutzfahrzeuge und Wasserstoff

Außerhalb von China gab es noch 2020 fast keine mit Brennstoffzellenantrieb ausgerüsteten Nutzfahrzeuge. Gegenwärtig beläuft sich der Bestand in Deutschland auf 50 Busse, weniger als 10 LKW und eine geringe Anzahl Sonderfahrzeuge (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d). Eine höhere Stückzahl an Zulassungen ist erst in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts zu erwarten, der eigentliche Markthochlauf wird bis weit in die 2030er Jahre dauern, wenn er denn überhaupt kommt. Zudem schränkt die kontinuierliche Leistungssteigerung von Batterien mit Blick auf Reichweite und Ladezeit die Marktchancen der Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge weiter ein.

5.3 Eisenbahnen: Elektrifizierung versus Wasserstoff

Auch im Bahnverkehr, zumindest auf den nicht elektrifizierten Strecken, konkurrieren Batteriezüge und Wasserstoffzüge. Elektrifizierte Strecken sind dabei außerhalb der Konkurrenz, weil von keiner Seite bestritten wird, dass es zu einem elektrischen Zug auf einer elektrifizierten Linie gegenwärtig keine klimafreundlichere Alternative gibt.

Das Wasserstoffdilemma

Nicht elektrifizierte Strecken stehen wiederum in der gleichen Konkurrenz um die Antriebssysteme wie der Schwerverkehr auf der Straße. Und die offensichtliche Lösung, einfach alle Linien zu elektrifizieren, funktioniert zwar theoretisch, benötigt aber praktisch viel Zeit. Der VDE sieht diese Lösung als sehr teuer an und auch die Kapazitäten der Fachfirmen reichten für eine kurzfristige Umsetzung nicht aus (VDE (Hrsg.), 2019, S. 35). Die Allianz pro Schiene verweist auf die hohen Ziele der Bundesregierung bei der Elektrifizierung von Bahnstrecken, bis 2025 sollten eigentlich 70 % der Strecken elektrifiziert sein, aber unter einer Reihe von CSU-Verkehrsministern⁸ ging es in den zehn Jahren von 2010 bis 2020 kaum voran. Nur 2 % des Bahnnetzes wurden zusätzlich elektrifiziert, der Anteil stieg von 59 % auf 61 % (Allianz pro Schiene, 2021). Die Allianz pro Schiene weist folgerichtig auf die Notwendigkeit hin, die Elektrifizierung zu beschleunigen. Mit Blick auf die dafür verfügbaren begrenzten Kapazitäten bleibt aber vermutlich nur, zumindest im Personennahverkehr, zunächst die Treibfahrzeuge auf klimaneutrale Antriebe umzurüsten.

Im Gegensatz zur hochemotionalen und teilweise irrationalen Debatte um PKW-Antriebe geht es in der Debatte um eine klimaneutrale Eisenbahn sehr sachlich zu (VDE (Hrsg.), 2019, S. 1):

Die für die Ausschreibung und Bestellung von Eisenbahnlinien zuständigen Aufgabenträger sehen sich mit der Erwartung konfrontiert, baldmöglichst eine Lösung für das Dieselproblem im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) zu finden. Die typische Betriebslebensdauer von Triebzügen ist auf 25 bis 30 Jahre angelegt. In den kommenden Jahren als Neufahrzeuge eingesetzte Triebzüge sind also frühestens im Jahr 2050 reif für die Ausmusterung. 2050 ist zugleich das Jahr, in dem der gesamte Verkehr in Deutschland bereits vollständig dekarbonisiert sein soll. Heutzutage neue Dieseltriebzüge zu bestellen, ist also nicht sinnvoll. Der Angebotsmarkt hat sich bereits angepasst: Er fokussiert sich zunehmend auf alternative Antriebe.

Die am Markt verfügbaren Alternativen sind der Elektroantrieb, der batterieelektrische Antrieb und der Wasserstoffantrieb, jeweils verfügbar für Personentriebzüge und Lokomotiven. Die Entscheidung, welche Alternative die beste ist, ist aber nicht nur mit Blick auf die Eigenschaften der Antriebssysteme zu entscheiden. Auch die Struktur des Streckennetzes und des Fahrbetriebes spielt eine Rolle. So ist z.B. die Elektrifizierung dort eine vorteilhafte Option, wo in schneller Taktung oft gefahren wird und viele Personen oder Güter transportiert werden. Der VDE (2019, S. 84) zieht die Grenze etwa bei einem Halbstundentakt. Fahren die Züge öfter, lohnt Elektrifizierung. Fahren sie nur stündlich oder zweistündlich, dann nicht. Ein weiterer Faktor ist die nicht-elektrifizierte Entfernung. Ist z.B. Lücke zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht zu lang, dann können batterieelektrische Züge eingesetzt werden, die immer dann, wenn sie z.B. an Endhaltepunkten unter einer Oberleitung fahren oder im Bahnhof stehen, die Batterien aufladen.

Zum Zeitpunkt der Studie des VDE wurden 469 Bahnverbindungen mit Dieselnügen bedient, weil sie oberleitungsfreie Teilstrecken enthalten. 47 % der nicht elektrifizierten Streckenabschnitte sind kürzer als 40 km, 77 % sind kürzer als 80 km und 90 % sind kürzer als 120 km (VDE (Hrsg.), 2019, S. 34).

Batterietriebzüge wurden zum Zeitpunkt der VDE Studie mit unterschiedlichen Reichweiten im Batteriebetrieb von den Herstellern Bombardier (40 bis 60 km Batterie-Reichweite), Stadler (80 km) und

⁸ Peter Ramsauer (28. Oktober 2009 bis 17. Dezember 2013, Alexander Dobrindt (17. Dezember 2013 bis 24. Oktober 2017, Christian Schmidt (24. Oktober 2017 bis 14. März 2018) und Andreas Scheuer (14. März 2018 bis 8. Dezember 2021).

Das Wasserstoffdilemma

Siemens Mobility (80 bis 100 km) angeboten (VDE (Hrsg.), 2019, S. 34). Schon Ende 2020 spricht Bombardier aber von bis zu 150 km Reichweite (Soller, 2020) und der Möglichkeit, in Deutschland nahezu 100 % aller nichtelektrifizierten Strecken batterieelektrisch befahren zu können. Steht damit die Brennstoffzelle auch auf dem deutschen Schienennetz vor dem Ende?

2018 stellte Stadler Rail den Batteriezug FLIRT Akku erstmals vor und begann mit der Erprobung (Stadler Rail, 2018). Bereits 2019 hat Stadler Rail (2021) mit dem Zug die erste Green-Technology-Ausschreibung in Deutschland gewonnen und 55 batterieelektrische Triebzüge nach Schleswig-Holstein verkauft und gewann dann im November 2021 einen Auftrag über 44 Fahrzeuge für die DB Regio. In Schleswig-Holstein sollen die ersten fünf Züge Ende 2022 eingesetzt und weitere 50 in den Jahren 2023 und 2024 geliefert werden (NAH.SH, 2021). Mit den Akkutriebzügen wird der Nahverkehr in Schleswig-Holstein auf den zahlreichen Bahnstrecken ohne Oberleitung jedes Jahr ca. 10 Mio. Liter Diesel einsparen und ca. 26.000 Tonnen CO₂ Emissionen vermeiden (NAH.SH, 2021).

Den ersten Batteriezug brachte aber ein anderer Hersteller aufs deutsche Schienennetz. Alstom fuhr bereits im September 2021 batterieelektrisch durch Sachsen und spricht von einer Reichweite von 100 km (Die Zeit Online, 2021). Von Alstom kommt aber auch der 2016 vorgestellte weltweit erste Wasserstoffzug Coradia iLint (Invest in Niedersachsen, 2019). Mit 1.000 km Reichweite stellt er die Reichweite der Batteriezüge in den Schatten und fährt seit März 2021 in Niedersachsen. 14 Züge sollten noch 2021 geliefert werden und für den Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) wurden 27 weitere Wasserstoffzüge geordert, die ab Ende 2022 eingesetzt werden sollen (Invest in Niedersachsen, 2019). Der RMV wird dabei vom Verkehrsministerium deutlich gefördert: *„Der Bund unterstützt diese Investition in klimafreundliche Mobilität, indem er 40 Prozent der Fahrzeugmehrkosten übernimmt, die im Vergleich zu Dieselfahrzeugen anfallen, sowie durch eine anteilige Förderung der Wasserstoff-tankstelle“* (Alstom, 2019).

Diese Förderung scheint auch erforderlich. Denn der VDE (2019, S. 85) zitiert die ökonomische Bewertung von Martin (2018), die für Wasserstoffzüge drei zentrale Kostennachteile nennt:

- (1) Elektrolytisch gewonnener Wasserstoff kostet mehr als 5 €/kg;
- (2) die Lebensdauer der HiTech-Komponenten Brennstoffzelle und Dynamikbatterie ist gering;
- (3) die neu benötigte Wasserstoff-Tankinfrastruktur ist relativ teuer.

Punkt 1) wurde bereits in Kapitel 2.4 bestätigt. Punkt 2) kann auf Basis der vorliegenden Untersuchungen weder bestätigt noch widerlegt werden. Punkt 3) ist ein klarer Unterschied zum Batteriezug, der dort, wo er einsetzbar ist, zumindest auf Teilstrecken oder an den Endbahnhöfen aus dem vorhandenen Oberleitungsnetz geladen werden kann.

Die VDE-Studie selbst zeigt sich gegenüber Wasserstoffzügen optimistischer und argumentiert mit zu erwartenden Preissenkungen. Ausgangspunkt ist, dass durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnener Wasserstoff bereits heute weniger als 2 €/kg kostet. Die darauf aufbauende, aber weitgehend unbegründete Vermutung lautet dann: *„Der Preis elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs wird sich langfristig daran orientieren“* (VDE (Hrsg.), 2019, S. 85). Die Studie bleibt allerdings die Begründung schuldig, warum dies so geschehen muss. Einen ähnlichen Optimismus teilt allerdings eine Studie der Wasserstoff-Förderorganisation NOW aus dem Jahre 2016, die auf Basis einer wenig überzeugenden Darlegung der Fakten einen Kostenvorteil von 23 % des Wasserstoffzuges gegenüber dem Dieseltriebwagen errechnet (Ernst & Young GmbH, 2016). Ein Vergleich mit möglichen batteriebetriebenen Triebwagen findet in der Studie weder statt noch wird die technologische Option überhaupt erwähnt.

Klar ist jedenfalls, dass Wasserstofftriebzüge auch unabhängig von der Kostenseite erfolgreich als in-

Wasserstoff für Hybridloks im Güterverkehr

Da Güterzüge oft nicht elektrifizierte Teilstrecken befahren, könnte ein Markt für Wasserstoff-Hybridloks existieren, die unter der Oberleitung elektrisch und sonst mit Brennstoffzelle fahren.

novativ geframt werden konnten. Denn Alstom hat mit dem Wasserstoff-Brennstoffzellenzug Coradia iLint den Deutschen Nachhaltigkeitspreis (DNP) in der Kategorie Design gewonnen (Alstom, 2021).

Ganz anders sieht es im Güterverkehr aus, der primär auf der Langstrecke fährt. Und da aufgrund der schnellen Züge im Personenfernverkehr Güterzüge häufig auf (teilweise nicht

elektrifizierten) Nebenstrecken umgeleitet werden, ist für den Betrieb der Güterzüge eine durchgehende Elektrifizierung von deutlich höherer Bedeutung als im Personennahverkehr. Für einen Güterverkehrsauftrag wegen eines nicht-elektrifizierten Streckenabschnitts noch mal die Lok wechseln, ist für die hier tätigen Verkehrsunternehmen keine Option. Und in jedem Güterzug große Akkus für Teilstrecken mitzufahren, ist aufwendig und teuer. Die naheliegende Lösung wäre eine Lokomotive, die unter der Oberleitung elektrisch fährt und gleichzeitig die Batterie auflädt. Kommt ein Streckenabschnitt ohne Elektrifizierung, kann dieser mit der Batterie überbrückt werden. Alternativ wäre auch eine elektrische Hybridlok mit Brennstoffzelle und der Möglichkeit, die Oberleitung zu nutzen, eine klimaneutrale Option.

Die Deutsche Bahn hat beschlossen, für den Personennahverkehr nur noch Elektro-, Elektro-Batterie- und Wasserstoffzüge zu beschaffen. Für den Güterverkehr werden zukünftig Lokomotiven mit Hybridantrieb beschafft, die sowohl mit Oberleitungsstrom als auch mit Dieselantrieb fahren können und so auf den elektrifizierten Streckenabschnitten keinen fossilen Brennstoff mehr verbrauchen. Als Treibstoff wird ab 2040 nach diesem Plan nur noch Biodiesel beschafft (Arnold & Sternberg, 2022). Ob die notwendigen Mengen Biodiesel oder ersatzweise synthetischer Diesel vorhanden sein werden, scheint gegenwärtig noch unklar.

Fazit Eisenbahn und Wasserstoff

Auch beim Einsatz im Personen-Regionalverkehr auf der Schiene scheint das in den letzten zehn Jahren immer wieder vorgebrachte Argument der fehlenden Reichweite der Elektroantriebe an Durchschlagskraft zu verlieren. Deutlich über 90 % der nicht-elektrifizierten Strecken können mit heute am Markt verfügbaren Batteriezügen befahren werden. Detaillierte und systematische Kostenvergleiche sind öffentlich nicht bekannt, jedoch scheint der Verkaufserfolg der Batteriezüge zahlenmäßig höher zu sein als der der Wasserstoffzüge, was Rückschlüsse auf die Kosteneinschätzungen zukünftiger Betreiber erlaubt.

5.4 Wärmeversorgung von Gebäuden: Elektrifizierung versus Wasserstoff oder wasserstoffbasiertes Methan und Biomasse

Die wissenschaftliche Studienlage zu Wasserstoff als Energieträger für die dezentrale Heizung von Gebäuden ist absolut eindeutig. Wasserstoff ist dazu zu knapp und zu teuer:

Das Wasserstoffdilemma

- ▶ Vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung wird Wasserstoff aufgrund von unklarer Verfügbarkeit, Ineffizienz und höheren Kosten nicht zum Heizen empfohlen (Ueckerdt et al., 2021, S. 390).
- ▶ Die Energy Transition Commission sieht keine Möglichkeit der Nutzung von Gasnetzen für Wasserstoff und insgesamt nur geringes Vertrauen und die geringste Bereitschaft zur Nutzung von Wasserstoff für Heizzwecke (Energy Transitions Commission (ETC), 2021, S. 21).
- ▶ Das International Council for Clean Transportation erwartet, dass Wasserstoff zum Heizen im Jahr 2050 mindestens doppelt so teuer sein wird wie Wärmepumpen (Baldino, O'Malley, Searle & Christensen, 2021, S. 6). Beim Vergleich von Wärmepumpe mit einer mit grünem Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellenheizung erwarten Baldino et al. (2021, S. 7) für die Haushalte sogar Heizkosten, die knapp um den Faktor acht höher liegen.
- ▶ Das Öko-Institut (2021, S. 37) findet nur unter der Annahme von unvorstellbar niedrigen Preisen für grünen Wasserstoff unterhalb von 1,5 €/kg und der Annahme, dass die Nutzung von Gasnetzen zur Wasserstoffdurchleitung nicht teurer ist als die gegenwärtige Durchleitung von Methan und nur in unsanierten und damit für Wärmepumpen schlecht geeigneten Gebäuden einen Kostenvorteil für die Verbrennung von Wasserstoff in Heizkesseln. Hier wird aber angemerkt: „Bei einem unsanierten Gebäude mit Wasserstoff-Kessel wird für die Wasserstoffherzeugung eine Strommenge benötigt, die fast das Vierfache des Strombedarfs einer Luft-Wärmepumpe ausmacht“ (Öko-Institut e.V., 2021, S. 37).
- ▶ Auch die Agora Energiewende kommt zu dem Schluss, dass Energieeffizienz und Elektrifizierung der Heizung weitaus preiswerter sind als eine Lösung mit Wasserstoff, der deshalb nicht bei der Wärmeversorgung sondern in anderen Sektoren eingesetzt werden wird (Agora Energiewende, 2019, S. 5).
- ▶ Auch Cassarino und Barrett (2021, S. 2) erwarten in ihrer Analyse der zukünftigen Wärmeversorgung im Vereinigten Königreich, dass auf grünem Wasserstoff basierte Heizungssysteme einen insgesamt etwa viermal so hohen Strombedarf haben wie Wärmepumpen und die Konsumierenden mit ungefähr den doppelten Kosten belasten.
- ▶ Die Modellierung des kostengünstigsten Weges zur Erreichung einer 100%igen Dekarbonisierung des britischen Gebäudebestandes durch Rosenow et al. schließt Wasserstoff für Heizzwecke nicht ein (Rosenow et al., 2020, S. 8). Als Grund führen Rosenow et al. an, dass erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Durchführbarkeit der Umstellung des Gasnetzes auf Wasserstoff bestehen. Weitere Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der zukünftigen Produktions- und Importstrukturen für Wasserstoff (Rosenow et al., 2020, S. 9).
- ▶ Für die IRENA hat Wasserstoff zum Heizen die geringste Marktreife aller Wasserstoffanwendungen (IRENA, 2022, S. 30).
- ▶ Für die IEA beinhaltet der kostengünstigste Weg nur weniger als 2 % Wasserstoff bei der Dekarbonisierung von Gebäuden (IEA, 2021c, S. 142).

Wasserstoff in der Raumwärmeversorgung wird aus der Wissenschaft stark kritisiert

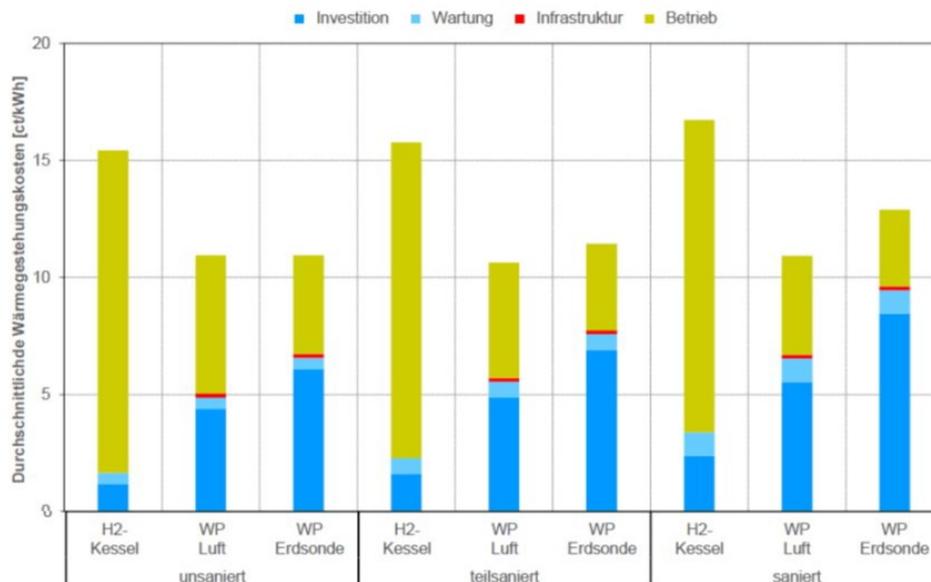
Zahlreiche Studien aus unterschiedlichen Perspektiven charakterisieren den Einsatz von Wasserstoff als Heizenergie als teuer und ineffizient. Eine Ausnahme bilden Studien die von der Erdgasbranche finanziert wurden.

In einem Kostenvergleich stellt das Öko-Institut (2021, S. 32) einen Wasserstoffkessel sowie eine Luft- und eine Erdwärmepumpe nebeneinander. Dabei wirkt sich trotz deutlich niedrigerer Investitionskosten der mehr als viermal so hohe Primärenergieverbrauch des Wasserstoffkessels so stark auf

Das Wasserstoffdilemma

die Betriebskosten aus, dass die Gesamtkosten dieser Lösung unabhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes um ungefähr 50 % höher liegen als bei der Wärmepumpe.

Abbildung 13: Vergleich der durchschnittlichen Wärmegestehungskosten für die Wärmeversorgung in einem Einfamilienhaus



Anmerkungen: Investitionszeitpunkt 2025, Strompreispfad 1, Netznutzungsentgelte: Gasnetz unverändert gegenüber heute, Grenzübergangs-/Großhandelspreis für Wasserstoff von 4,5 €/kg
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Quelle Öko-Institut (2021, S. 32)

Ähnliche Argumentationen finden sich beim Ariadne-Projekt (Kopernikus-Projekt Ariadne, 2021), beim Wuppertal Institut (2021) und auch in der Untersuchung des Institut für Solarenergieforschung Hameln und der Leibniz-Universität Hannover (2020). Zachmann et al. ordnen die Gebäudeheizung als hochspekulative Wasserstoffanwendung ein (Zachmann et al., 2021, 2022) und Liebreich (2021) schreibt:

Right now there is a mammoth lobbying campaign going on to place hydrogen at the heart of the country's future space heating needs. It's obvious, say the owners of existing gas distribution networks or boiler-related businesses. You just swap out a natural gas condensing boiler, for a hydrogen-ready dual fuel one, and then in due course just switch over to hydrogen.

Grüner Wasserstoff als Heizstoff ist unsicher, kaum verfügbar und zu teuer. Seine Verwendung ist ineffizient und hat einen unvorstellbaren Bedarf an grünem Strom zur Folge. Warum also wird überhaupt noch über Wasserstoff als Heizstoff geredet?

Liebreich (2021) bringt die Dinge auf den Punkt. Das einfach nachvollziehbare ökonomische Interesse daran, althergebrachte Produkte wie Gasthermen weiter produzieren und zu verkaufen und, noch weit wichtiger, die Gas-Verteilnetze weiter wirtschaftlich nutzen zu können. Eine Reihe von Argumenten wird von den Befürwortenden des Heizens mit Wasserstoff immer wieder aufgeführt:

Das Wasserstoffdilemma

Eines der Kernargumente der Gas-Befürwortenden ist die Höhe der **Investitionskosten**. Der Verein Zukunft Gas e.V. (2022) argumentiert:

Bezahlbare Wärmewende mit Gas: Deutlich kostengünstiger als eine vollständige Elektrifizierung ist ein Technologiemix, bei dem auch die Präferenzen von 21 Millionen Haushalten berücksichtigt werden, die heute mit Gas heizen. Durch den Einsatz von grünem Gas kann so rund die Hälfte des Gebäudesektors finanziell verträglich und mit geringem Aufwand dekarbonisiert werden. Die Kosten für den Umbau des Energiesystems würden so deutlich geringer ausfallen – laut dena um bis zu 260 Mrd. € bis 2050.

Das Argument stimmt, auch Zachmann et al. (2022, S. 6), vgl. auch Abbildung 7, erwarten in einer auf der Nutzung von grünem Gas basierenden Energiewirtschaft etwa 15 % niedrigere Investitionskosten. Leider verraten die Gas-Befürwortenden aber nicht, dass mit mehrfach höheren laufenden Energiekosten zu rechnen ist.

Das zweite an die Politik gerichtete Schlagwort ist die **Technologieoffenheit**. Beim Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie gehört sie seit Jahren zum Grundprogramm politischer Forderungen. So wurde schon 2016 gefordert: „*Technologie- und Energieneutralität bei gleichzeitigem Verzicht auf Technologieförderungen und Technologievorgaben und/oder Diskriminierung einzelner Energieträger*“ (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie, 2016). Aktuell formuliert der BDH hierzu (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), 2019):

Die durch den BDH vertretene deutsche Heizungsindustrie steht für eine marktwirtschaftliche und technologieoffene Energiepolitik. In Bezug auf Wasserstoff und weitere Green Gases muss eine solche marktwirtschaftliche Energiepolitik auf planwirtschaftliche Allokation der Energieträger verzichten. Für Wasserstoff und andere Green Gases heißt dies übersetzt, selbstverständlich eine Verwendung in allen Sektoren, also auch im Gebäudebereich zu sichern – zumal das für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff wichtige Gasnetz nicht nur die Industrie, sondern insbesondere den Gebäudebereich versorgt.

Der Verband kommunaler Unternehmen e.V. (2017) baut seine Argumentation für die Verteilung von Gasen wie Biogas oder Wasserstoff im Erdgasnetz im Wesentlichen darauf auf, dass das Gasnetz bereits existiert. Dadurch wird die Versorgung mit nachhaltigem Gas für Millionen Kunden möglich: „*Die Investitionen in dieses sichere, eng vermaschte und nahezu flächendeckende Netz sind größtenteils bereits getätigt. Die langlebige und sichere Erdgasinfrastruktur steht daher unmittelbar für die Aufgaben der Zukunft zur Verfügung*“ (Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), 2017, S. 6). Wie bereits gezeigt wurde, sind die Investitionskosten in das vorhandene Netz, um dies für eine wasserstoffbasierte Wärmeenergieversorgung zu nutzen, niedriger, als die Investitionen in die Elektrifizierung der Wärmeversorgung (vgl. Abschnitt 2.4 und Abbildung 7). Die Nutzung in der Zukunft ist dennoch zweifelhaft, da einerseits die notwendigen riesigen Gasmengen nicht oder erst in Jahrzehnten zur Verfügung stehen werden und andererseits die Kosten für die Direktverbrennung von elektrisch erzeugtem grünem Wasserstoff zum Heizen im Vergleich zur Wärmepumpe unangemessen hoch sind.

Ende 2021 freut sich der BDH in seiner Pressemitteilung zum Koalitionsvertrag der Ampel (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), 2021): „*Das Vorhaben der Koalitionäre, Wasserstoff nicht auf einzelne Sektoren zu beschränken, stützt die seit langem vom BDH geforderte Technologie-*

Das Wasserstoffdilemma

offenheit gegenüber einem Einsatz im Wärmemarkt.“ Dabei ist der BDH aber u.U. ein wenig zu optimistisch, denn der Ampel-Koalitionsvertrag will zwar keine Anwendungsfelder ausschließen, nimmt aber elektrifizierbare Verfahren und Prozesse aus (SPD, Die Grünen, & FDP, 2021, S. 26):

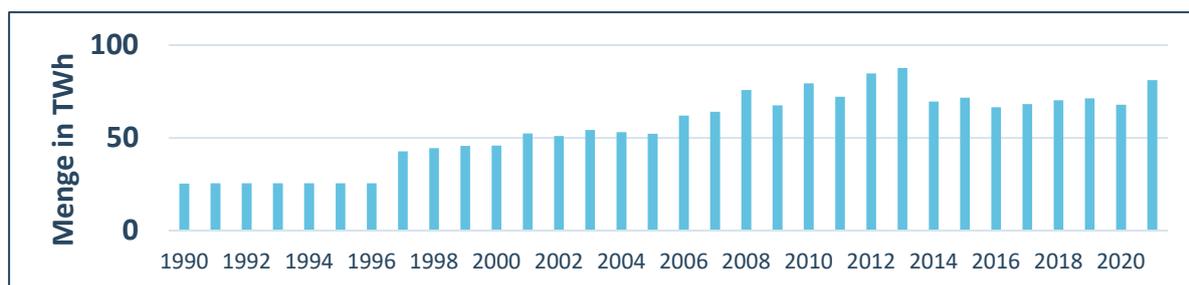
Wir wollen den Einsatz von Wasserstoff nicht auf bestimmte Anwendungsfelder begrenzen. Grüner Wasserstoff sollte vorrangig in den Wirtschaftssektoren genutzt werden, in denen es nicht möglich ist, Verfahren und Prozesse durch eine direkte Elektrifizierung auf Treibhausgasneutralität umzustellen.

Mit Blick auf die Gestaltung der Regulatorik findet sich allerdings ein Hinweis auf Technologieoffenheit (SPD, Die Grünen, et al., 2021, S. 59f): „Für einen schnellen Hochlauf und bis zu einer günstigen Versorgung mit grünem Wasserstoff setzen wir auf eine technologieoffene Ausgestaltung der Wasserstoffregulatorik.“

Ein klarer Zweckoptimismus wird dagegen in Studien der Erdgasnetzbetreiber deutlich. Der Deutsche Verein für das Gas- und Wasserfach geht von einem Wasserstoffbedarf von 44 bis 84 TWh in 2030 und einem von 292 bis 754 TWh in 2045 aus, dem eine Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff von 171 bis 487 TWh grünem Wasserstoff in 2030 und 647 bis 1934 grünem Wasserstoff in 2025 gegenübersteht (Gatzen & Reger, 2022). Dabei liegt die erwartete Importquote je nach Szenario mal etwas unter und mal über 90 %. Die optimistischen Annahmen bilden dabei den Kern des Arguments, dass Wasserstoff auch für die Wärmeversorgung zur Verfügung steht. Hierzu heißt es: „Entgegen der häufigen Annahme muss Wasserstoff keine Mangelware bleiben. Bereits ab dem Jahr 2030 kann der Bedarf an Wasserstoff mehr als gedeckt werden. Die Menge übertrifft um ein Vielfaches alle gängigen Nachfrageprognosen“ (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2022, S. 5). Diese Position wird in wissenschaftlichen Studien dagegen kaum geteilt.

Ein weiterer konkurrierender Innovationspfad zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung liegt in der Biomasse. Die Nutzung von **Biomasse** für die Wärmeerzeugung hat sich in den letzten zehn Jahren in Deutschland kaum verändert. Sie stagniert seit 2010 auf einem Niveau von ca. 150 TWh/a (Umweltbundesamt, 2021a, 2021b).

Abbildung 14: Nutzung von holzartigen Festbrennstoffen in deutschen Haushalten



Quelle: BMWK (2022)

Mit Blick auf die zukünftige Biomassenutzung weist das Umweltbundesamt (2019, S. 132) darauf hin, dass Anbaubiomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien mit Blick auf die Flächennutzungseffizienz sehr schlecht abschneidet. Mit Wind- und Solarenergie kann auf der gleichen Fläche ein 10 - 40-fach höherer Energieertrag erzielt werden. Auch mit Blick auf Feinstaubemissionen von

Das Wasserstoffdilemma

Verbrennungsprozessen sowie auf Akzeptanzprobleme der „Vermaisung“ der Landschaft (Umweltbundesamt, 2019, S. 133) plädiert das Umweltbundesamt daher für einen Ausstieg aus der Nutzung von Anbaubiomasse (Umweltbundesamt, 2019, S. 154). Weiter empfiehlt das Umweltbundesamt einen Ausstieg aus der Nutzung von Waldrestholz (Umweltbundesamt, 2019, S. 32) und verlagert die Perspektive der Holznutzung eher auf einen stark wachsenden Holzbau, um damit Treibhausgasemissionen aus der Gewinnung von mineralischen Baustoffen zu reduzieren (Umweltbundesamt, 2019, S. 32, 64). Schon heute wird der Holzertrag im Wald durch Veränderungen der Niederschläge, der Temperatur wie auch durch Dürren und Stürme geringer (Lindner et al., 2014; Senf, Buras, Zang, Rammig & Seidl, 2020). Für die Wärmegegewinnung aus Biomasse werden in Zukunft dann primär Produktionsabfälle, also Sägespäne und Verschnitt, zur Verfügung stehen. Nichts davon lässt sich dezentral in Anlagen der Heizung von Einzelgebäuden nutzen.

Fazit Wärmeversorgung von Gebäuden: Elektrifizierung und Biomasse versus Wasserstoff

Die Nutzung von noch mehr Biomasse für die Erzeugung erheblicher Mengen von Heizwärme ist angesichts der begrenzten Potenziale kaum sinnvoll und auch nicht wahrscheinlich. Als Alternativen stehen die Elektrifizierung und der Einsatz des Brennstoffs Wasserstoff zur Verfügung. Durch die Elektrifizierung mit Wärmepumpen kann aus einer Kilowattstunde regenerativem Strom die etwa 3- bis 5-fache Menge an Heizwärme gewonnen werden. Die Wissenschaft ist sich daher mit Blick auf die Wärmeversorgung des Gebäudebestandes weitgehend einig, dass Elektrifizierung die effizientere und bezahlbarere Option ist. Die bisherigen Betreiber der Gasnetze wie auch die etablierte Heizungsindustrie halten dagegen an einer Perspektive für Wasserstoff in der dezentralen Heizwärmeversorgung fest.

5.5 Schifffahrt: Segeln und Elektrifizierung versus wasserstoffbasierte Flüssigtreibstoffe

Der Schiffsverkehr auf den Weltmeeren verbraucht große Mengen an Treibstoffen und war 2015 für ca. 2,6 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich, ein Ausstoß von ca. 932 Mio. t CO₂ (UBA, 2021). Viele Jahrhunderte fanden dagegen Schiffstransporte CO₂-frei statt. Denn erst um das Jahr 1900 herum wurde das Segelschiff vom Dampfschiff abgelöst (Geels, 2002). Höhere Geschwindigkeiten und die Fähigkeit, unabhängig von der Windrichtung fahren und besonders in Häfen besser manövrieren zu können, stellten entscheidende Wettbewerbsvorteile dar. Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts dienen Segelschiffe zum einen der Freizeit und zum anderen der traditionellen Ausbildung von Seeschiffahrt und Marine. Der kommerzielle Einsatz der Windkraft zum Transport von Gütern oder Passagieren kam für Jahrzehnte vollständig zum Erliegen. Erst seit der Jahrtausendwende wurden wieder Konzepte entwickelt, um erneuerbare Energien in der kommerziellen Schifffahrt zu nutzen.

Für Frachtschiffe entwickelt das Hamburger Unternehmen SkySails seit seiner Gründung im Jahre 2001 Zugdrachen-Antriebssysteme, die den Treibstoff-Verbrauch um 20 % bis 40 % verringern können (Stepanek, 2020). Im Jahr 2007 wurde das erste SkySail auf einem kommerziellen Hochseefrachter installiert und 2021 das erste System ausgeliefert, welches zur Windenergieerzeugung an Land genutzt wird (SkySailsGroup, 2022). Die Entwicklung des Unternehmens erfolgte langsam und der Markt war in vieler Hinsicht und nicht zuletzt aufgrund dauerhaft niedriger Preise für Bunkeröl noch nicht reif für die unkonventionellen Ideen.

Das Wasserstoffdilemma

Ein zweites Antriebskonzept zur Nutzung des Windes sind die seit den 1920er Jahren sporadisch erprobten Flettner-Rotoren. Enercon gab in 2006 ein solches Schiff in Auftrag, die E-Ship 1, welches 2010 vom Stapel lief und einige Jahre für den Transport von Komponenten von Windkraftanlagen eingesetzt wurde (Wikipedia, 2022). Vahs et al. (2021, S. 24) führen seit 2010, als die E-Ship in Dienst gestellt wurde, weitere zehn kommerzielle Schiffe auf, die mit Flettner-Rotoren ausgerüstet und weitere sechs, die entworfen wurden.

Mit 5000 Quadratmeter Segelfläche bei 78 Meter Masthöhe und 170 Meter Länge wurde 2016 ein Autotransport-Frachtsegler für Volkswagen konzipiert (Hucko, 2016). Die Konstruktion nutzt ein in den Sechzigerjahren konzipiertes Segelsystem, das Dyna-Rigg, das eigens für Frachtschiffe konzipiert wurde. Bei Wallenius Marine, einem Tochterunternehmen von Wallenius Lines, in Zusammenarbeit mit der schwedischen Königlichen Technischen Hochschule KTH, befindet sich ein weiterer Segelfrachter in Entwicklung. Das erste Schiff des Oceanbird-Typs wurde im Februar 2021 in Auftrag gegeben (CSN, 2021). In Deutschland schrieb die NOW-GmbH Mitte 2021 die Konzeption eines Frachtenseglers zur Förderung aus und sah dafür ein Budget von 3 Mio. € vor (NOW-GmbH, 2021):

Es soll eine Durchführbarkeitsstudie bzw. ein Concept Design hinsichtlich Entwicklung und Neubau eines Frachtenseglers mit alternativem Antrieb erstellt werden. Das Concept Design soll als Grundlage für eine Pilotanwendung dienen können. Die Studie soll u.a. die Erstellung prüffähiger Zeichnungen, Berechnungen und Modellversuche umfassen. Dabei soll der technische Detaillierungsgrad so ausgearbeitet werden, dass die Anforderungen an ein „Approval in Principal“ durch eine von der deutschen Flagge anerkannte Klassifikationsgesellschaft erfüllt werden. Hinsichtlich des Designs des Energieversorgungssystems sind Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in die Betrachtung einzubeziehen, jedoch können auch wasserstoffbasierte E-Fuels, andere regenerative Energiequellen oder weitere klimafreundliche Bestandteile in Betracht gezogen werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts entwickelte die Hochschule Leer schon 2016 bis 2020 einen Green Sailer und schätzte seine Wirtschaftlichkeit ab. Im Ergebnis wird resümiert (Vahs et al., 2021, S. 168): *Die aktuellen Charrerraten für Frachtschiffe liegen derzeit bei um die 2500 € für Schiffe der doppelten Größe, was den GreenSailer in seiner aktuellen Form nicht konkurrenzfähig macht. Jedoch sollte angemerkt werden, dass der Markt für nachhaltige Schifffahrt ein wachsender Markt ist, was die bestehenden Konzepte für nachhaltige Transportfahrten beweisen.*

Das Wasserstoffdilemma

Abbildung 15: Green Sailer der Hochschule Leer



Quelle: Vahs et al. (2021, S. 2)

Auch batterieelektrische Schiffe sind in Entwicklung und in Betrieb. Grasso Macola (2020) listet die Entwürfe mit den größten Batterien und führt die Stena Jutlandica mit geplanten 50 MWh Batteriekapazität als größtes auf. Das Schiff verkehrt auf der Route Göteborg (S) - Frederikshavn (DK) und soll mit den 50 MWh Strom ca. 50 Seemeilen elektrisch fahren können. Bugge et al. (2021) beleuchten die Hintergründe der Elektrifizierung von Fähren in Westnorwegen. Ihre Studie kommt zu dem Schluss, dass die Neuausrichtung des bestehenden regionalen Innovationssystems auf Elektroantriebe gekennzeichnet war durch eine begrenzte Infragestellung, vergleichsweise geringe Komplexität und geringe Ungewissheit in Bezug auf die angestrebten batteriebetriebenen Lösungen. Auch verschiedene Akteure und die bereits bestehenden Strukturen, Institutionen und regulatorischer Rahmenbedingungen des regionalen Innovationssystems spielten eine Rolle.

Allein die überschaubare Zahl dieser Projekte lässt aber ahnen, dass sich die „treibstofffreien“ Schiffsantriebe noch in einer kleinen Nische befinden. Der Mainstream ignoriert die Notwendigkeit einer Antriebswende auf dem Meer oder setzt auf unproblematische Umstellung durch Wasserstoff.

So heißt es z.B. in der nationalen Wasserstoffstrategie: „*Inbesondere in der Luftfahrt, zu Teilen im Schwerlastverkehr, bei mobilen Systemen für die Landes- und Bündnisverteidigung und in der Seeschifffahrt sind viele Routen und Anwendungen nicht rein elektrisch darstellbar*“ (BMW, 2020). Die Kombination von Segel- und Elektroantrieb wird nicht erwähnt.

Die NOW GmbH informiert über umweltfreundliche Schiffsantriebe mit einem Hinweis auf Erdgas und Diesel (NOW-GmbH, 2022a):

Die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie kann im Schiffsbereich für emissionsfreie Antriebe und zur Bordstromversorgung eingesetzt werden. Als Brennstoff kann kurzfristig auf heute verfügbare Treibstoffe zurückgegriffen werden (LNG, Diesel, Methanol), aber auch strombasierte Kraftstoffe (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe ...) sind einsetzbar.

Letztlich läuft das auf die Förderung von Wasserstoff-Ready Antrieben hinaus, die solange Wasserstoff noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar ist, mit Diesel, LNG oder Methanol betrieben werden. Zudem wird in verschiedenen Projekten die Anwendung von Wasserstoff-Brennstoffzellen

Das Wasserstoffdilemma

für die Erzeugung von Bordstrom gefördert (NOW-GmbH, 2022b). Das zentrale Problem der Umrüstung von Schiffen auf Wasserstoffantrieb ist dabei die Lagerung an Bord (Van Hoecke et al., 2021). Verdichteter Wasserstoff an Bord ist in reiner Form nur schwer zu lagern, so dass – unter Verlusten – letztlich wohl synthetische Gase wie S-LNG oder Fischer-Tropsch-Diesel eingesetzt würden. Für beide Treibstoffe ist bereits eine Logistikstruktur vorhanden. Van Hoecke et al. (2021, S. 822) weisen aber auf die erheblichen Energieverluste der Variante Fischer-Tropsch-Diesel hin und darauf, dass neben komprimiertem Wasserstoff, Flüssigwasserstoff und S-LNG diverse weitere Alternativen wie Methanol, Ameisensäure, aromatische flüssige organische Wasserstoffträger existieren und dass strategische Entscheidungen der International Maritime Organisation erforderlich wären, um eine richtungssichere Entwicklung einzuleiten (Van Hoecke et al., 2021, S. 835).

Fazit Seeschifffahrt

Die Nutzung von Motoren zum Schiffsantrieb wird gegenwärtig nur von Nischenakteuren in Frage gestellt. Dennoch sollte erwogen werden, die Entwicklung von Schiffen mit Antrieb durch den Wind stärker zu forcieren, denn im Vergleich mit Bunkeröl dürfte die Versorgung der Schiffsflotte mit wasserstoffbasierten Treibstoffen sehr teuer sein.

5.6 Industrielle Prozesswärme: Elektrifizierung versus Biomasse oder Wasserstoff

In verschiedenen Branchen wird für Fertigungsprozesse Wärme auf einem Temperaturniveau von mehr als 100 °C benötigt, welches nicht mit Wärmepumpen dargestellt werden kann. Typische Beispiele sind die Glasindustrie oder Emailierwerke, das Brennen von Backsteinen oder Fliesen, Wärmebehandlungen zum Glühen und Härten von Metallteilen, Schmelzen von Metallen und Kunststoffen zum Vergießen oder zu anderen Zwecken sowie zahlreiche Anwendungen in chemischen Prozessen. Für die Bereitstellung von Prozesswärme werden aktuell in der Industrie jährlich ca. 200 TWh Erdgas und andere Gase, 100 TWh Kohle, 11 TWh Mineralöl und 21 TWh sonstige 34 TWh Strom und 26 TWh erneuerbare Energien genutzt (Fraunhofer ISI, 2021, S. 11). Diese Energieformen können auch in einer klimaneutralen Wirtschaft so bereitgestellt werden.

Sollen solche Prozesse auch im Zeitalter der nicht-fossilen Energien betrieben werden, benötigt die Industrie erhebliche Mengen von Wärme und besonders für Hochtemperaturprozesse auch Brennstoffe. Einige Studien identifizieren im Prozesswärmebedarf primär ein Anwendungsfeld für Biomasse (Robinius et al., 2020; The Boston Consulting Group & Prognos, 2018), andere eines für Strom und mit Strom hergestelltem Wasserstoff (Peterssen et al., 2022).

Peterssen et al. (2022, S. 10) schätzen ein Einsparpotenzial in der Größenordnung von 20 % und leiten letztlich einen Prozesswärmebedarf ab, der etwa 50 TWh/a umfasst und erst in den 2040er Jahren bereitgestellt werden kann. Zachmann et al. schätzen den Wasserstoffbedarf für die Bereitstellung von Prozesswärme mit einer Spannweite von 0 bis 70 TWh pro Jahr (Zachmann et al., 2021, S. 72). Denn neben Wasserstoff könnten auch Biokraftstoffe, fossile Brennstoffe mit CCS und weitgehende Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung gangbare Alternativen sein.

Madeddu et al. (2020, S. 4f) führen mit Blick auf die **Elektrifizierung der Prozesswärme** zu einer Reihe von Technologien auf, die bereits in der Industrie etabliert und Wärme über 400 °C liefern können. Dies

Das Wasserstoffdilemma

sind elektrische Öfen mit verschiedenen Heizsystemen und Ausführungen, weiter Widerstandsheizungen zum Brennen von Keramik, Glasschmelzen, Glühen und Härten und auch Induktions-, Widerstands- und Lichtbogenöfen für verschiedene Anwendungen. Madeddu et al. (2020) kommen so zu dem Schluss, dass 78 % des bestehenden Energiebedarfs der Industrie mit den vorhandenen Technologien elektrifiziert werden können, während 99 % des Bedarfs durch die Hinzunahme von Technologien, die derzeit entwickelt werden, elektrifiziert werden könnten. In Summe würde dies europaweit zu einem von 430 TWh/a auf 1330 TWh/a steigenden Strombedarf der Industrie für Prozesswärme führen. Als Wasserstoffbedarf bliebe in diesem Fall fast nur noch der Feedstock der chemischen Industrie übrig, der in etwa 890 TWh Wasserstoff entsprechen würde (Madeddu et al., 2020, S. 6). Zum Vergleich: Würde die Differenz im Strombedarf für Prozesswärme von 900 TWh durch Wasserstoff gedeckt, so würden für dessen Produktion ca. 1.350 TWh grüner Strom erforderlich sein, gegenüber dem Weg der radikalen Elektrifizierung ca. 450 TWh mehr.

Auch das Forschungszentrum Jülich (Robinius et al., 2020, S. 57f) nimmt in einem Szenario, das auf eine Senkung der Treibhausgasemissionen um 95 % zielt, an, dass die Elektrifizierung mit ca. einem Viertel des Prozesswärmebedarfs eine erhebliche Rolle spielen wird. Mit über 50 % deckt aber in diesem Szenario **Biomasse** den höchsten Anteil des Prozesswärmebedarfs ab, ca. 265 TWh (Robinius et al., 2020, S. 50). Insgesamt sieht die Studie des Forschungszentrums Jülich eine Biomassenutzung im Umfang von 460 TWh/a vor und nimmt eine Ausweitung der Anbaufläche von 2,5 Mio. ha auf 4,7 Mio. ha an (Robinius et al., 2020, S. 82). Die Studie „Klimapfade“ des BDI sieht die Nutzung von Biomasse ähnlich, fokussiert aber deren Nutzung auf die Industrie (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018, S. 46).

Die bereits heute in Deutschland energetisch verwendete Biomasse (vor allem Feststoffe, keine Importe oder Umwandlung von Agrarflächen) sollte prioritär in der Industrie eingesetzt werden, wo sie sehr effizient Gas und Kohle aus der Erzeugung von Nieder- und Mitteltemperaturwärme ersetzen kann. Diese Umstellung wäre im Rahmen natürlicher Reinvestitionszyklen realisierbar. Biomasse müsste dafür allerdings aus bestehenden Anwendungen in der Strom- und Wärmeerzeugung stärker in die Industrie gelenkt werden.

Im Gegensatz zu Jülich sieht der BDI aber Grenzen und verzichtet auf die Ausweitung von Anbauflächen und Importe (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018, S. 50). Im Zuge „natürlicher Investitionszyklen“ könnte der „Ersatz von Erdgas und Kohle durch feste Biomasse für 90 Prozent der Prozesswärmeerzeugung im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich“ erfolgen und dabei positive Vermeidungskosten mit sich bringen. Allerdings könnte dabei Biomasse langfristig um mindestens 20 % teurer werden, was zu Nachteilen in Branchen wie der Zellstoff-, Papier-, Holzstoff- oder Ernährungsindustrie führen würde, die Biomasse zur stofflichen Nutzung verwenden. Weitere wirtschaftliche Nachteile wären in der Gebäudewärmeversorgung (Pelletsheizungen) sowie im Bereich der Holzheizwerke anzunehmen, die gerade in großer Zahl entstehen.

Die Nutzung großer Mengen von Biomasse stellt, wie schon in Abschnitt 5.4 für die Raumwärmeversorgung gezeigt wurde, auch für die Prozesswärmeversorgung keine nachhaltige Option dar. Um die Entwicklung in Richtung einer Konzentrierung der Biomassenutzung für Prozesswärme in der Industrie (Robinius et al., 2020; The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) zu lenken, müssten zunächst die gegenwärtigen Nutzungen für die Erzeugung von Wärme und Strom sowie im Verkehr zurückgefahren wenn nicht gar vollständig eingestellt werden. Und auch in diesem Falle könnte nachhaltig produzierte Biomasse vermutlich nicht annähernd die Bedarfe decken.

Das Wasserstoffdilemma

Dieser langfristig niedrigen und eher sinkenden Prognose des Potenzials zur Biomassenutzung für Anwendungen in der Wärmeerzeugung steht ein aktuelles Überangebot auf dem Holzmarkt gegenüber, welches die niedersächsischen Landesforsten auf den Klimawandel zurückführen (Niedersächsische Landesforsten, 2019). Mit Blick auf die Waldschäden durch den Klimawandel bedarf die langfristige Abschätzung der nachhaltig nutzbaren Holzmenge vermutlich der Überarbeitung.

Fazit Industrielle Prozesswärme, Elektrifizierung, Biomasse und Wasserstoff

Die Nutzung von Biomasse für die Erzeugung erheblicher Mengen von Prozesswärme ist angesichts der begrenzten Potenziale wie auch der existierenden Nutzungsstrukturen und der aus ihnen erwachsenden Nutzungskonkurrenzen kaum wahrscheinlich. Als Alternative stehen die Elektrifizierung und der Einsatz des Brennstoffs Wasserstoff zur Verfügung. Je nach in Zukunft erzieltm Wirkungsgrad der Wasserstoffherzeugung wird für den Wasserstoffpfad eine um 40 % bis 50 % höhere Strommenge benötigt als für die Elektrifizierung und den Einsatz von „Direktstrom“.

5.7 Flugverkehr: Wasserstoff versus Sustainable Air Fuel oder Suffizienz

Ein spezielles Dilemma für den Flugverkehr könnte in einem Anstieg der Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre als Folge des Einsatzes von Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff liegen (Vogel et al., 2011). Weder der Einsatz von elementarem Wasserstoff in hoch fliegenden Langstreckenflugzeugen noch der Einsatz von synthetischem Kerosin, sogenanntem Sustainable Air Fuel (SAF), dürfte daher

Synthetisches Flugbenzin senkt die Treibhauswirkung des Fliegens nur wenig

Wird fossiles Kerosin durch synthetisches Kerosin ersetzt, wird Fliegen mitnichten klimaneutral, denn der indirekte Anteil der Treibhausgaswirkungen von 66 % bleibt erhalten.

die gravierenden Wirkungen des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt deutlich verbessern. Bekannt ist nämlich, dass der indirekte Effekt bei Kerosinverbrennung bei Flugzeugen den direkten CO₂-Effekt weit übersteigt. Lee et al. (2021) zeigen, dass die Klimawirkung der Verbrennung von Kerosin in großer Höhe etwa 3-mal so hoch ist wie die Klimawirkung bei bodennaher Verbrennung wäre (Lee et al., 2021). Wird fossiles

Kerosin durch Wasserstoff oder durch SAF ersetzt, wird Fliegen also mitnichten klimaneutral, denn der indirekte Anteil der Treibhausgaswirkungen bleibt erhalten. Der von Lee et al. (2021) genannte Faktor führt zu der Erkenntnis, dass eine vollständige Produktion des Kerosins auf Basis regenerativer Energien einen Flug nur um ca. 33 % weniger klimaschädlich machen würde. Die anderen 67 % ließen sich nur erschließen, wenn das Flugzeug nicht in große Höhen aufsteigen würde. Der „Traum vom klimaneutralen Fliegen“ (Bottler, 2021), den uns die Luftfahrtbranche unter Verweis auf die Aussicht auf Sustainable Aviation Fuel (SAF) aus Wasserstoff so gern verkaufen möchte, wird auch in der Wasserstoffwirtschaft ein Traum bleiben. Lufthansa verwendet dabei allerdings den Begriff CO₂-neutral (Lufthansa, 2019) und umschiffet so das Problem mit der nur geringen Reduzierung des Treibhauseffekts durch SAF. Andere technische Alternativen sind erforderlich. Ein klimaneutrales Fliegen mit einem Antrieb durch Verbrennung von SAF scheint wenig aussichtsreich.

Alternativ wird an Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb gearbeitet. Solange diese auf eher kurzen Strecken nur niedrige Flughöhen nutzen, was z.B. bei der APUS 2 der Fall ist (European Aviation.net, 2022), könnte hier in der Tat eine Perspektive vorliegen. Wenn Airbus bei seinen Zero-e Flugzeugen

Das Wasserstoffdilemma

aber von Flughöhen von 35.000 Fuß spricht (Airbus, 2022), dann wird von Klimaneutralität kaum die Rede sein können.

Und auch an elektrischen Flugzeugen wird gearbeitet. Mit den derzeitigen Fortschritten in der Flugzeugkonstruktion und bei den Lithium-Ionen-Batterien werden Elektroflugzeuge aber voraussichtlich zunächst nur als Ersatz für konventionelle Kurzstreckenflugzeuge dienen (Mitici, Pereira & Oliviero, 2022). Denn die Entwicklung elektrischer Flugzeuge steht noch am Anfang. Erst 2020 hat der slowenische Flugzeughersteller Pipistrel eine EASA-Musterzulassung für ein zweisitziges Trainingsflugzeug erhalten, das erste elektrische Flugzeug überhaupt, das die Urkunde erhalten hat (Reinhold, 2020). Bis zur Verfügbarkeit elektrischer Passagierflugzeuge wird es also wohl noch einige Zeit dauern.

Zumindest im interkontinentalen Flugverkehr deutet sich daher an, dass bis zur Verfügbarkeit einer wirklich klimaneutralen Technologie für das Fliegen, wenn sie denn überhaupt möglich sein sollte, eine deutliche Einschränkung des Flugverkehrs die einzige zuverlässige Methode sein könnte, um den Einfluss des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt annähernd auf null zu reduzieren.

Flugverkehr: Wasserstoff versus Sustainable Air Fuel oder Suffizienz

Das Fliegen mit Wasserstoff, Sustainable Air Fuel (SAF) aus Wasserstoff oder mit batterieelektrischen Flugzeugen bietet nur in geringen Flughöhen die Aussicht auf klimaneutrales Fliegen. Aufgrund der indirekten Wirkung der Abgase der Verbrennung von synthetischem Kerosin wie auch von Wasserstoff auf den Treibhauseffekt beim Fliegen in großer Höhe ist gegenwärtig keine Technologie für klimaneutrales Fliegen auf der Langstrecke verfügbar oder auch nur in Entwicklung. Eine deutliche Einschränkung des Flugverkehrs könnte die einzige zuverlässige Methode sein, um den Einfluss des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt des Fliegens annähernd auf null zu reduzieren

5.8 Exkurs: Volkswirtschaftliche Suffizienz

Über den Wettbewerb technologischer Lösungen, die in unterschiedlicher Ausprägung die gewünschten Dienstleistungen mehr oder weniger effizient oder gar konsistent erbringen, ist zur Reduktion des Bedarfs an Wasserstoff (und allen anderen Energieträgern) auch eine Suffizienzstrategie vorstellbar. Folkers und Paech (2020, S. 126) definieren Suffizienz in Abgrenzung zu Effizienz und Konsistenz wie folgt:

Demgegenüber begnügt sich das Suffizienzprinzip weder mit verringertem Ressourceninput noch mit einer ökologischeren Qualität der genutzten Mittel, sondern adressiert und hinterfragt direkt den eigentlichen Zweck ökonomischer Aktivitäten. Zur Disposition gestellt wird das Ausmaß des erzeugten Outputs oder Produktionsergebnisses. Dessen Reduktion oder Begrenzung würde sich zwangsläufig auf Konsummuster auswirken.

Nicht nur Konsummuster, auch die Produktion ließe sich durch eine Suffizienzpolitik verändern. Beispielhaft erklären lässt sich der Ansatz am Güterverkehr. So kann z.B. ein Transport auf die ökologisch effizientere Bahn verlagert werden oder er kann durch ein einen LKW mit geringerem Dieselverbrauch durchgeführt werden. Beides wären Ansätze der Effizienz. Er kann aber auch z.B. auf LKWs verlagert werden, die durch Ökostrom oder grünen Wasserstoff angetrieben werden, worin sich das Konsistenzprinzip spiegeln würde. Mit Blick auf die horrenden Energiemengen, die zur Produktion

Das Wasserstoffdilemma

einer großen Menge grünem Wasserstoff erforderlich sind, könnte der Staat aber auch Rahmenbedingungen schaffen, auf die die Wirtschaft mit einer Reduktion des Transportvolumens reagieren würde. Hier bestünde Aussicht auf eine Suffizienzlösung.

Nehmen wir einmal an, durch eine höhere LKW-Maut, hohe Treibstoffkosten oder bessere und damit teurere Arbeitsbedingungen für LKW-Fahrende würden die Transportkosten so stark steigen, dass Münchener Bier in Norddeutschland genauso unattraktiv teuer wäre wie Bier von der Küste in München. Der Konsum würde sich wieder auf lokale Produkte zurückverlagern und für den Transport wäre weder Wasserstoff, Diesel oder Strom notwendig noch würden ein weiterer Ausbau der Autobahnen erforderlich sein. Zudem würden Arbeitskräfte frei, die für den dringend notwendigen ökologischen Umbau des Landes sinnvollere Tätigkeiten verrichten könnten, als Bier von Nord nach Süd und zurück zu fahren. Eigentlich aus Sicht einer nachhaltigen Wirtschaftspolitik eine Win-Win-Situation.

Die Vermeidung des Gebrauchs energie- und materialintensiver Produkte- und Dienstleistungen wäre besonders dort zu empfehlen, wo deren messbarer Beitrag zu Wohlstand und Wohlbefinden nur niedrig ist. Die Vermeidung bestimmter Produkte- und Dienstleistung ginge aber letztlich mit Eingriffen in die Freiheit des Marktes einher.

In der Situation eines fortschreitenden Klimawandels wird für Bernd Ulrich (2019, S. 155ff) eine „*naive Interpretation der Freiheit*“ mit Blick auf die Rechte des Individuums gegenüber dem Staat zur Farce. Ein knapper werdendes CO₂-Budget (Rahmstorf, 2019) und die damit einhergehende Verschärfung der Folgen des Klimawandels z.B. durch Überschreiten von Kippunkten, erhöht den Handlungsdruck und die **Möglichkeiten** des Klimaschutzes verwandeln sich in unvermeidliche **Notwendigkeiten**. Eine Verschärfung der Umweltprobleme führt im Laufe der Zeit zu einer immer bedrohlicheren Situation und es „*herrscht auch in den westlichen Demokratien nicht mehr die Freiheit, sondern blanke Panik*“ (Ulrich, 2019, S. 160). Für den freiheitlichen Staat stellen damit weniger die ideologischen Auffassungen im Kontext von freien Konsumententscheidungen als klimapolitische Fehler durch Unterlassungen mit den aus ihnen erwachsenden Langzeitfolgen eine ernsthafte Bedrohung dar. Wenn Teile der Konsumgesellschaft aus der Gewohnheit der letzten Jahrzehnte heraus auf „*Fliegen und Rasen, mit brummender Beschleunigung*“ (Ulrich, 2019, S. 162) pochen, dann handeln sie nicht rational sondern „*pfadabhängig*“ und fordern letztlich überkommene und nicht mehr zeitgemäße Privilegien ein. Eine solche Anspruchshaltung hält Ulrich aber nicht für freiheitlich, sondern für feudal.

Eine volkswirtschaftlichen Suffizienzpolitik würde unzweifelhaft den Widerspruch zwischen kurzfristiger Freiheit und langfristiger Zukunftssicherung zuspitzen. Denn in der politischen Debatte wird der Freiheitsbegriff immer wieder zur Begründung von Ansprüchen an den Konsum genutzt. Folkers und Paech (2020, S. 211) spitzen zu:

An der mittels antiautoritärer und freiheitsbetonter Entwicklungsmaximen erstrittenen Enthemmung aller erdenklichen Ausschweifungen, ganz gleich ob individuell oder ökonomisch, zerbricht nicht nur die physische Existenzgrundlage, sondern die Moderne an sich.

Auch wenn Folkert und Paech der Politik nur geringe Handlungsmöglichkeiten einräumen und sie eher als willfährigen Gehilfen der Konsum- und Wachstumsgesellschaft sehen, sollte eine auf eine nachhaltige Wirtschaft gerichtete Politik die über Jahrzehnte zu erwartende Knappheit an grüner Energie realistisch anerkennen und dort, wo es nötig, wirksam und durchsetzbar ist, neben dem Aufbau neuer technischer Optionen auch die Reduktion des Verbrauchs mitdenken.

6 Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Wasserstoffpolitik

Die gegenwärtige „Entdeckung“ von Wasserstoff als klimaneutralem Energieträger der Zukunft begeistert alle diejenigen, die verschiedenste Anwendungen damit betreiben wollen. Und es stellt diejenigen vor eine große Herausforderung, die sich verantwortlich für die Deckung des rasch wachsenden Bedarfs fühlen.

Das folgende Kapitel wird Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Wasserstoffpolitik aus mehreren Perspektiven betrachten:

- ▶ aus der technischen-naturwissenschaftlichen Perspektive einer effizienten Energieversorgung
- ▶ sowie aus der Perspektive der Notwendigkeit des Ausbaus einer Wasserstoffwirtschaft mit den einer ersten Hauptphase zur Deckung des wahrscheinlichen Bedarfs und einer zweiten zur Deckung spekulativer Bedarfe.

Auf Basis dieser beiden Perspektiven, die quasi ein Screening des Feldes der Anwendungen darstellen, werden erste Konsequenzen für die Entwicklung einer rationalen Wasserstoffpolitik abgeleitet.

6.1 Wasserstoff für eine effiziente Energieversorgung

Peterssen et al. zeigen in einer komplex erscheinenden aber letztlich einfachen Grafik die Grundstruktur eines klimaneutralen Energiesystems am Beispiel des Landes Niedersachsen (Institut für Solarenergieforschung Hameln & Leibniz-Universität Hannover, 2020, S. 57). Klimaneutralität bedeutet dabei mindestens den vollständigen Ausstieg aus der Verbrennung und sonstigen Nutzung fossiler Stoffe wie Kohle, Öl und Gas. Von den fünf nach unten zeigenden Pfeilen, die Energieträger symbolisieren, fallen damit zwei fort: Fossil Liquid Fuels und Erdgas. Fossile Kohle wird nur als Input für Kohlekraftwerke mitgedacht und fällt mittelfristig in einem klimaneutralen Energiesystem ebenfalls fort.

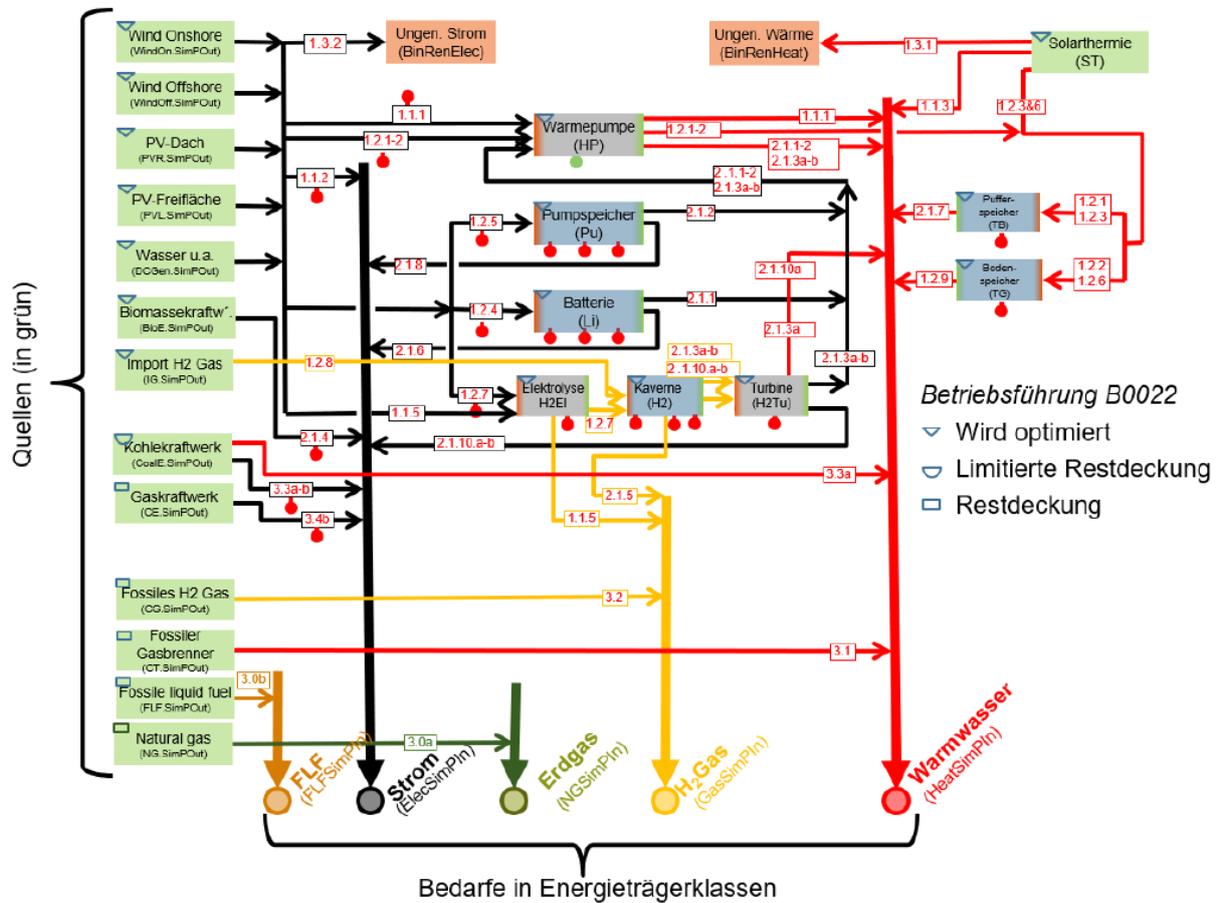
Nur zwei Energieträger bleiben für die Versorgung der Wirtschaft und Gesellschaft mit klimaneutraler Energie übrig. Warmwasser und Strom. Beide können mit verschiedenen Technologien aus erneuerbarer Primärenergie gewonnen werden. Eine dritte Energieform kann als Speicher und Energieträger für besondere Anwendungen unter hohen Verlusten aus Strom hergestellt oder importiert werden: Wasserstoff. Wasserstoff wiederum kann weiterverarbeitet werden zu Methan (Erdgas) und synthetischen Kraftstoffen, wobei allerdings weitere Verluste zu beklagen sind.

Schon hier kann resümiert werden: Während die direkte Gewinnung von warmem Wasser durch kleine und große Solarthermie oder auch durch Geothermie von der Gesellschaft mit ihren hohen Heizwärmebedarfen konsequent unterbewertet, wenn nicht gar ignoriert wird, wird Wasserstoff als Energieträger hoch bewertet und für viele, letztlich für viel zu viele Anwendungen als Problemlösung gesehen.

Weiter wäre abzuleiten, dass die für das Energiesystem benötigte Strommenge mit Blick auf den Energieträger Wasserstoff durch zwei Maximen niedriger gehalten werden kann: Zum einen durch den konsequenten Einsatz von elektrifizierten Lösungen, zum anderen durch Elektrolyseanlagen zur Herstellung von Wasserstoff mit hohem Wirkungsgrad.

Das Wasserstoffdilemma

Abbildung 16: Leistungsflüsse für die Bereitstellung von Energieträgern im Programm „Renewable Lower Saxony“



Quelle: Institut für Solarenergieforschung Hameln & Leibniz-Universität Hannover (2020, S. 57)

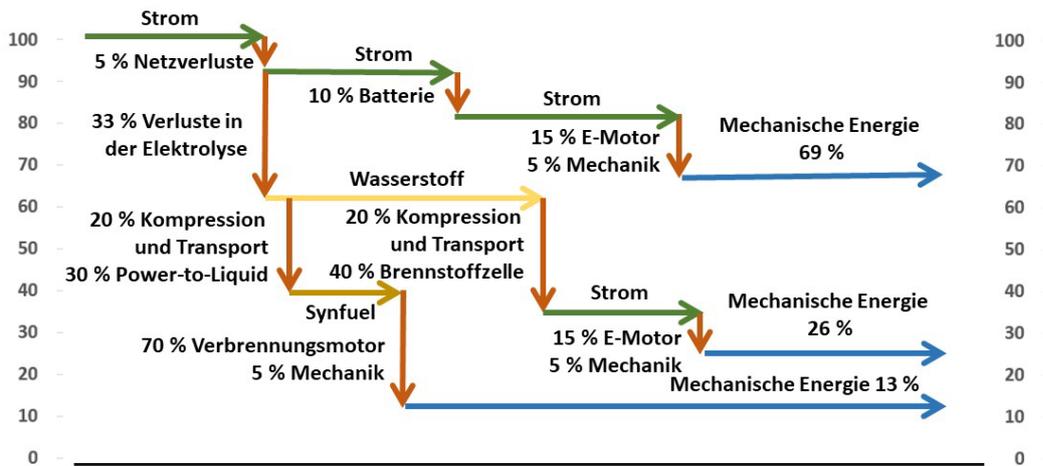
Insbesondere die Frage des Einsatzes von Wasserstoff alternativ zu elektrifizierten Lösungen wirkt sich dabei in hohem Ausmaß auf den Strombedarf auf. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Bedarf an mechanischer Energie wie z.B. in der Mobilität und Bedarf an Wärme in Industrie und Gebäuden.

Für die Umwandlung in mechanische Energie, wie sie z.B. für den Antrieb von Fahrzeugen erforderlich ist, gibt die folgende Grafik einen Überblick über die verschiedenen Umwandschritte des regenerativ erzeugten Stroms in mechanische Antriebsenergie „am Rad“. Der elektrische Antrieb bleibt dabei durchgängig in der „Stromwelt“, die zwar bei der Netzdurchleitung, der Speicherung in der Batterie wie auch im Elektromotor mit Verlusten verbunden ist, am Ende aber immer noch 69 % des ursprünglich erzeugten Stroms „am Rad“ zur Verfügung stellt.

Durch die Umwandlung von Strom in chemisch gespeicherte Energien wie Wasserstoff, Methan und synthetische Treibstoffe sowie die Rückumwandlung in Strom und mechanische Energie stehen bei Fahrzeugantrieben mit Brennstoffzelle nur 26 % des ursprünglich erzeugten Stroms „am Rad“ zur Verfügung, bei Antrieb mit synthetischen Treibstoffen und Verbrennungsmotor nur 13 %.

Das Wasserstoffdilemma

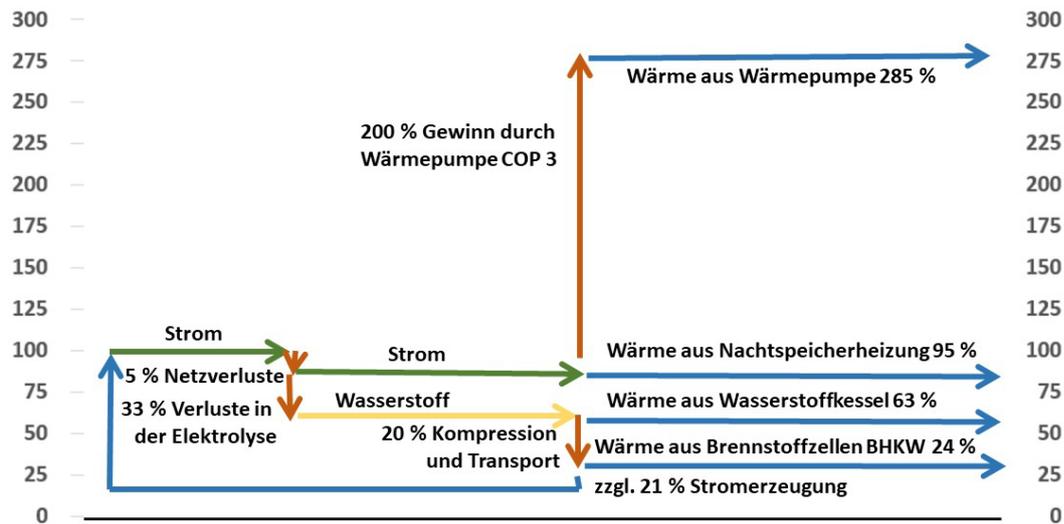
Abbildung 17: Verluste bei der Umwandlung von Strom in mechanische Energie



Quelle: eigene unter Nutzung von Daten von Penner, Unteutsch und Lövenich (2018, S. 12)

Wird also wie durch Peterssen et al. (Institut für Solarenergieforschung Hameln & Leibniz-Universität Hannover, 2020, S. 53) pauschal ein nicht elektrifizierbarer Anteil am Straßenverkehr von 15 % angenommen und dieser durch Brennstoffzellenantriebe bedient, so steigt der Strombedarf für den Verkehr um 25 %. Werden stattdessen Verbrennungsmotoren mit Synfuel eingesetzt, so steigt aufgrund dieser 15 % der Fahrzeuge der Strombedarf des Verkehrssystems um 65 % an. Ähnlich sieht die Situation bei der Raumwärmeversorgung aus.

Abbildung 18: Verluste und Gewinne bei der Umwandlung von Strom in Raumwärme



Quelle: eigene unter Nutzung von Daten von Penner, Unteutsch und Lövenich (2018, S. 12)

Jeder wenn auch kleine Anteil an Gebäuden wirkt sich sofort steigend auf die notwendige Primärenergie zur Stromerzeugung aus. Die Entscheidung, ob eine Energieanwendung mit Strom oder mit

Wasserstoff oder gar Synfuel bedient wird, wird damit zu einem zentralen **Branching-Point** der Entwicklung des Energiesystems. Bei allen in Kapitel 5 dargestellten konkurrierenden Innovationspfaden sollte die Politik darauf gerichtet sein, höchstmögliche Systemeffizienz zu erzielen. Nur dann wird der notwendige Ausbau der Erzeugungskapazitäten für erneuerbaren Strom zu stemmen sein.

6.2 Skizzierung einer Wasserstoffwirtschaft

6.2.1 Wasserstoffbedarf in den verschiedenen Anwendungsfeldern

Zachmann, Holz, Roth et al. (2021, S. 72) ermitteln die wahrscheinlichen und spekulativen Wasserstoffbedarfe für Europa (vgl. Kapitel 4.2.2). Dabei schätzen die für das Jahr 2050 wahrscheinlichen Bedarfe auf 241 TWh bis 655 TWh, sie spekulativen Bedarfe auf 90 TWh bis 1.410 TWh, zusammen also 331 TWh bis 2.065 TWh. Selbst die höchsten Schätzungen für alle Anwendungsgebiete liegen deutlich unterhalb der zur Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse erschließbaren Potenziale an erneuerbarem Strom (Heuser et al., 2020, S. 16).

Der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft könnten in dem Falle ohne Einschränkungen vorangetrieben werden, wenn in Europa eine Wasserstoffmenge von ca. 2.000 TWh bis 2050 bzw. besser bis 2045 bereitgestellt werden kann.

Die jährliche Menge an grünem Wasserstoff aus Elektrolyseuren, der in der EU produziert werden kann, wird bis 2030 voraussichtlich weniger als 3 Mio. tH₂ (ca. 100 TWh) betragen (World Energy Council Europe, 2021, S. 29). Dafür strebt die Europäische Union an, bis zum Jahr 2030 in Europa Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von 40 GW zu installieren (World Energy Council Europe, 2021, S. 11), davon ca. 15 % in Deutschland (vgl. Abbildung 9). Ein Zwischenziel dafür sind 6 GW in 2024. Bis 2050 werden 500 GW für möglich gehalten, davon wiederum 15 % in Deutschland (vgl. Abbildung 10). Dies entspräche etwa einer Menge Wasserstoff von 100 TWh in 2030 und 1.250 TWh in 2050 und damit nur gut der Hälfte der von Zachmann et al. (2021, S. 72) ermittelten Maximalbedarfe für die wahrscheinlichen und spekulativen Anwendungen in Europa. Mit Blick auf den deutschen Anteil am europäischen Bruttosozialprodukt von ca. 24 % (Eurostat, 2020) errechnet sich ein „fairer“ deutscher Anteil von ca. 25 TWh in 2030 und 320 TWh in 2050. Auch die Betrachtungen in Abschnitt 4.2.3 auf Basis einer Studie des Öko-Instituts (2021) führen zu ähnlichen Zahlen. In Summe weisen sie auf eine langfristig begrenzte Wasserstoff-Verfügbarkeit von sogar nur 15 bis 16 TWh im Jahr 2030, 75 TWh bis 85 TWh in 2035 und bei weiter steigendem Import vielleicht 150 TWh in 2040 und 350 TWh in 2050 hin.

Zahlreiche Studien haben versucht, den Wasserstoffbedarf in Deutschland für die nahe Zukunft bis 2050 zu ermitteln. Die Ergebnisse sind allerdings ausgesprochen unterschiedlich und umfassen nach Lechtenböhrer et al. (2019, S. 12) mit dem Zieljahr 2050 mindestens ein Spektrum von ca. 170 TWh/a bis zu 660 TWh/a, Peterssen et al. (2022) veranschlagen die Menge sogar auf 1.000 TWh/a an Wasserstoff. Allein für den Verkehrssektor führen Lechtenböhrer et al. (2019, S. 12) Studien auf, die den Wasserstoffbedarf für Mobilität in 2050 alternativ auf 0 TWh, 25 TWh, 55 TWh, 92 TWh, 120 TWh, 215 TWh und 219 TWh schätzen. Auch Peterssen et al. (2022, S. 10) veranschlagen in einem ihrer Szenarien den Anteil des Verkehrs mit Brennstoffzellenfahrzeugen auf ca. 200 TWh und den Gesamtbedarf in 2050 auf ca. 1.000 TWh. Der Deutsche Verein für das Gas- und Wasserfach geht von einem Wasserstoffbedarf von 44 bis 84 TWh in 2030 und einem von 292 bis 754 TWh in 2045 aus, dem eine Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff von 171 bis 487 TWh grünem Wasserstoff in 2030 und 647 bis 1934 grünem Wasserstoff in 2025 gegenübersteht (Gatzen & Reger, 2022). Dabei liegt

Das Wasserstoffdilemma

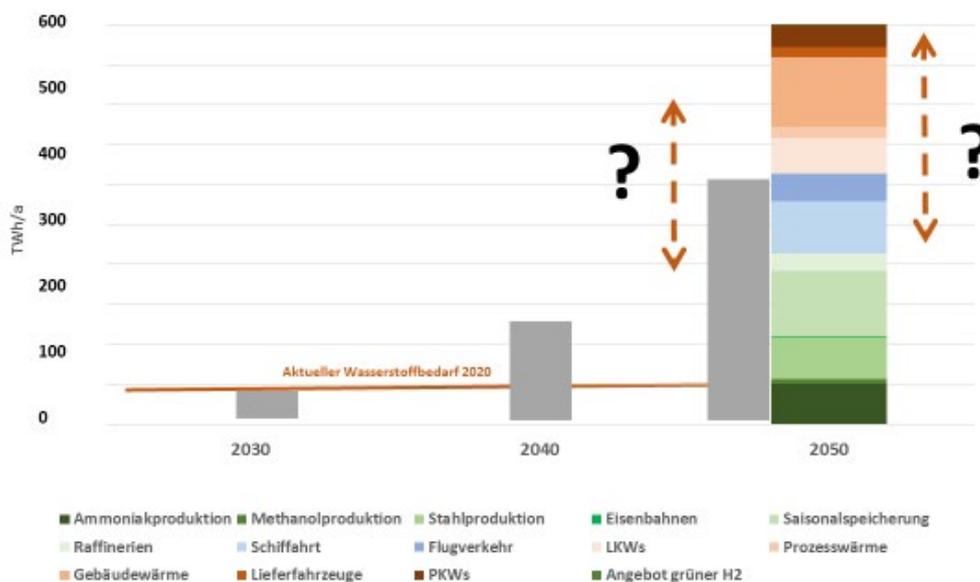
die erwartete Importquote je nach Szenario mal etwas unter und mal über 90 %. Die optimistischen Annahmen bilden dabei den Kern des Arguments, dass Wasserstoff auch für die Wärmeversorgung zur Verfügung steht. Hierzu heißt es: „Entgegen der häufigen Annahme muss Wasserstoff keine Mangelware bleiben. Bereits ab dem Jahr 2030 kann der Bedarf an Wasserstoff mehr als gedeckt werden. Die Menge übertrifft um ein Vielfaches alle gängigen Nachfrageprognosen“ (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2022, S. 5).

Vieles deutet aber entgegen dem Zweckoptimismus der Erdgasbranche darauf hin, dass die mögliche Ausbaugeschwindigkeit ein Engpass ist, der ein ungebremstes Wachstum des Wasserstoffverbrauchs als zweifelhafte Strategie erscheinen lässt. So sind insbesondere die Szenarien mit extrem hohen Importanteilen eher mit Hoffnungen auf ein rasches Anwachsen des Angebots als mit Projekten unterlegt und berücksichtigen nicht die vom Öko-Institut aufgeführten Hemmnisse bei dem Zustandekommen eines raschen Wachstums des Angebots (Öko-Institut e.V., 2021). Es erscheint daher unzweifelhaft keine gute Idee, einen großen Teil der in 2050 möglicherweise verfügbaren Wasserstoffmenge ausgerechnet den nach Zachmann et al. spekulativen Anwendungen in der Gebäudeheizung und im Straßenverkehr zuzuordnen. Es gilt eher möglichst genau herauszufinden, wie die Skalierung von Wasserstofferzeugung und Wasserstoffimport so aufeinander abgestimmt werden kann, dass die wichtigsten Bedarfe prioritär gedeckt werden können.

Die folgende Abbildung 19 basiert im Kern auf den höheren Abschätzungen der Wasserstoff-Bedarfe nach Zachmann et al. (2021, S. 72). Deutschland wird jeweils 24 % der für Europa geschätzten Mengen zugeschlagen. Zusätzlich ist für 2050 ein Bedarf von Wasserstoff für die Stabilisierung der Stromerzeugung von 400 TWh in Europa (Zachmann et al., 2021, S. 81) berücksichtigt.

Das Wasserstoff-Angebot, Produktion und mögliche Importe, folgt den Überlegungen in Abschnitt 4.2.3 auf Basis der Studie des Öko-Instituts (2021).

Abbildung 19: Wasserstoffbedarfe (farbig) und mögliche grüne Wasserstoffproduktion und Import (grau)



Quelle: Borderstep, Gegenüberstellung auf Basis von Zahlen von Zachmann et al. (2021) sowie Öko-Institut (2021) Hinweis auf grundsätzliche Unsicherheiten (Fragezeichenbereiche)

6.2.2 Anwendungsfelder, die wahrscheinlich mit Wasserstoff versorgt werden

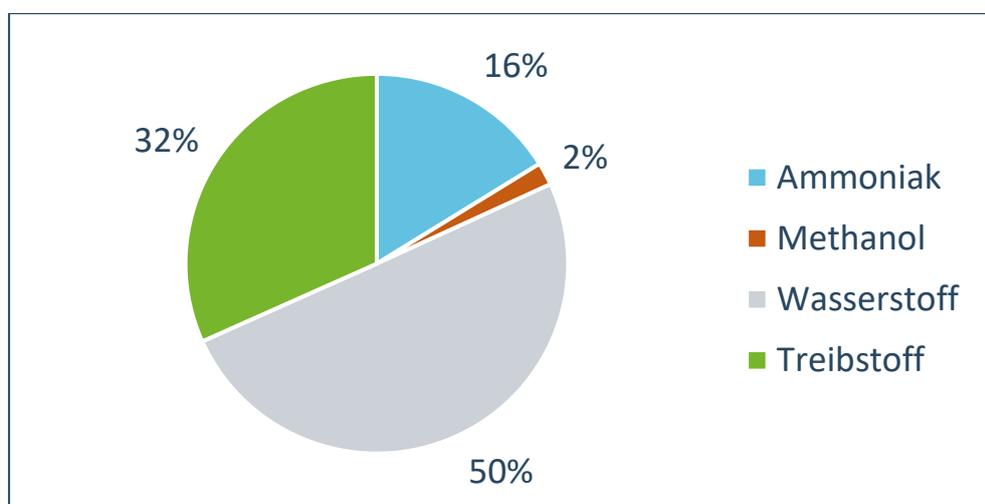
Der erste Schritt einer neuen Wasserstoffwirtschaft sollte darin bestehen, den schon heute für die Ammoniakproduktion, in Raffinerien und weitere Anwendungen im Wesentlichen aus fossilen Quellen produzierten Wasserstoff auf die Produktion auf regenerativer Basis zu verlagern. Hier geht es gegenwärtig um ca. 57 TWh Wasserstoff (Statista, 2021). Die Perspektiven des Ausbaus der Produktion von grünem Wasserstoff (BMW, 2020; Öko-Institut e.V., 2021) deuten darauf hin, dass es bis in die 2030er Jahre dauern könnte, diese Wasserstoffmenge aus regenerativen Quellen bereitzustellen.

Weitere quasi alternativlose Anwendungsfelder für Wasserstoff finden sich in der **Methanolproduktion**, der **Stahlproduktion**, einige wenige **Eisenbahnstrecken** wie auch für die Verwendung als **Energiespeicher im Stromnetz**, für die gegenwärtig kaum seriensreife Alternativen für die Langzeitspeicherung von Strom zur Verfügung stehen. Auch für den **Flugverkehr** ist gegenwärtig kaum eine andere machbare Alternative bekannt, wobei auch die Verbrennung klimaneutraler Treibstoffe in großer Höhe erheblich zum Treibhauseffekt beiträgt, so dass ein Flugbetrieb mit 100 % klimaneutral produziertem Treibstoff die Treibhauswirkung des Flugverkehrs nur um ca. 33 % reduzieren würde. Solange mit Verbrennungstechnologien geflogen wird, ist eine radikale Reduktion des Flugverkehrs der einzige Weg, der große Klimaschutzpotenziale bietet. Da es vermutlich kaum machbar sein wird, die **Seeschifffahrt** komplett auf Segelbetrieb umzustellen oder den internationalen Seehandel fast auf Null zu reduzieren, dürfte ein weiterer Bedarf in der Schifffahrt hinzukommen.

Nach den Schätzungen des Öko-Instituts ist durch diese prioritären Anwendungsfelder das bis 2050 mögliche Volumen der Produktion und des Imports von Wasserstoff und Wasserstoffprodukten weitgehend aufgebraucht. Aber muss überhaupt elementarer Wasserstoff importiert werden? Benötigen wir überhaupt in der ersten Phase der Wasserstoffwirtschaft eine „Wasserstoff-Infrastruktur“ für den Import?

Hier hilft ein Blick auf die „Erscheinungsformen“ von Wasserstoff in den unterschiedlichen Folgeprodukten. Ammoniak und Methanol werden in genau diesen Formen als Chemikalien benötigt. Treibstoffe für Flugzeuge und Schiffe werden ebenfalls nicht als elementarer Wasserstoff, sondern eben als flüssige Treibstoffe benötigt. Es verbleiben nur 50 % der Menge als elementarer Wasserstoff.

Abbildung 20: Auf die Anwendungen bezogene Erscheinungsformen von Wasserstoff



Quelle: Borderstep

Das Wasserstoffdilemma

Der elementare Wasserstoff wird fast ausschließlich von Großverbrauchern benötigt. 52 % der Menge in diesem groben Szenario dienen der Saisonspeicherung von Energie für die Strom- und Wärmenetze. Verbrannt werden sie bei Bedarf in modernen KWK-Gaskraftwerken, also nur an wenigen Standorten. Weitere 34 % werden in der Stahlproduktion und 14 % in Raffinerien benötigt. Sie werden voraussichtlich durch die Stahlkonzerne und Raffinerien direkt an den Standorten hergestellt, was mögliche Verluste durch Wasserstoffemissionen minimiert. Nur 1 % dieser Menge könnte, wenn sich die Batterietechnik nicht noch weiterentwickelt, in Eisenbahnzügen zum Einsatz kommen. Bis ungefähr in das Jahr 2050 hinein wird also eine Wasserstoffinfrastruktur in Form von Tankstellen nicht benötigt.

Elementarer Wasserstoff und eine Infrastruktur zu seiner dezentralen Verteilung wird nur für diejenigen Anwendungen benötigt, die Zachmann et al. (2022) als spekulativ bezeichnen. Damit wird aber auch jede Investition in eine solche Infrastruktur spekulativ.

6.2.3 Anwendungsfelder, in denen die Energieversorgung mit Wasserstoff unsicher ist

Die überwiegende Mehrzahl von Studien, die sich mit der Möglichkeit der **Wasserstoffnutzung für die Heizung von Gebäuden** befassen, stufen Wasserstoff in diesem Anwendungsfeld als ineffizient und zu teuer ein (vgl. Abschnitt 5.4). In wenig verdichteten Siedlungsgebieten ist die Wärmepumpe aufgrund ihres im Vergleich zum Wasserstoffkessel um den Faktor drei bis fünf höheren Wirkungsgrades und damit zusammenhängend auch niedrigerer Kosten vorzuziehen. In verdichteten Wohngebieten ist die Versorgung mit Wasserstoff nicht mit der Versorgung mit Fernwärme konkurrenzfähig.

In der Mobilität ist die Lage im **PKW-Markt** ähnlich eindeutig. Ende 2021 hat der Marktanteil von batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland erstmals die 20 %-Marke überschritten. Dass mehr geht, zeigt der norwegische Markt, in dem 2021 die batterieelektrischen Fahrzeuge einen Marktanteil von 64,5 % und die Plug-In-Hybride einen von nur noch 21,7 % halten. Im Januar 2022 deutete sich in Norwegen mit einem Marktanteil von 83,7 % für BEV und von 6,8 % für PHEV ein weiterer Bedeutungsverlust der Plug-In-Hybride an, womit sich der batterieelektrische Antrieb klar als neue dominante Technologie etabliert hat. Der Anteil an zugelassenen PKW mit Brennstoffzelle lag in 2019 bei 27 Fahrzeugen, 0,017 % der in Norwegen 2019 zugelassenen Fahrzeuge (UNECE, 2022).

Ähnlich ist die Lage bei **Bussen**. Während europaweit die batterieelektrischen Busse einen Marktanteil von über 20 % erreicht haben, wurden in Deutschland 2021 gerade einmal 11 Brennstoffzellenbusse mit Wasserstoff sowie sieben weitere mit Wasserstoff und vermutlich Verbrennungsmotor zugelassen. In Europa notiert die „Fuel Cell Electric Buses Knowledge Base“ (2022) dagegen nur eine Zahl von 27 Wasserstoffbussen, die in acht Städten erprobt werden.

Bei **LKW** ist mit Blick auf die weltweit sehr niedrige Zahl von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben noch unklar, aus Sicht verschiedener Studien aber für die Brennstoffzelle nicht sehr aussichtsreich. Klarer ist die Situation bei kleinen **LKW für den Lieferverkehr**, ein Markt, in dem sich elektrische Fahrzeuge ähnlich wie beim PKW durchzusetzen scheinen.

Auch beim Einsatz im **Personen-Regionalverkehr auf der Schiene** scheint das in den letzten zehn Jahren immer wieder vorgebrachte Argument der fehlenden Reichweite der Elektroantriebe an Durchschlagskraft zu verlieren. Deutlich über 90 % der nicht-elektrifizierten Strecken können mit heute am Markt verfügbaren Batteriezügen befahren werden. Der Verkaufserfolg der Batteriezüge scheint zahlenmäßig deutlich höher zu sein als der der Wasserstoffzüge, was Rückschlüsse auf die Kosteneinschätzungen zukünftiger Betreiber erlaubt. Im **Güterverkehr** dagegen werden für nicht elektrifizierte

Das Wasserstoffdilemma

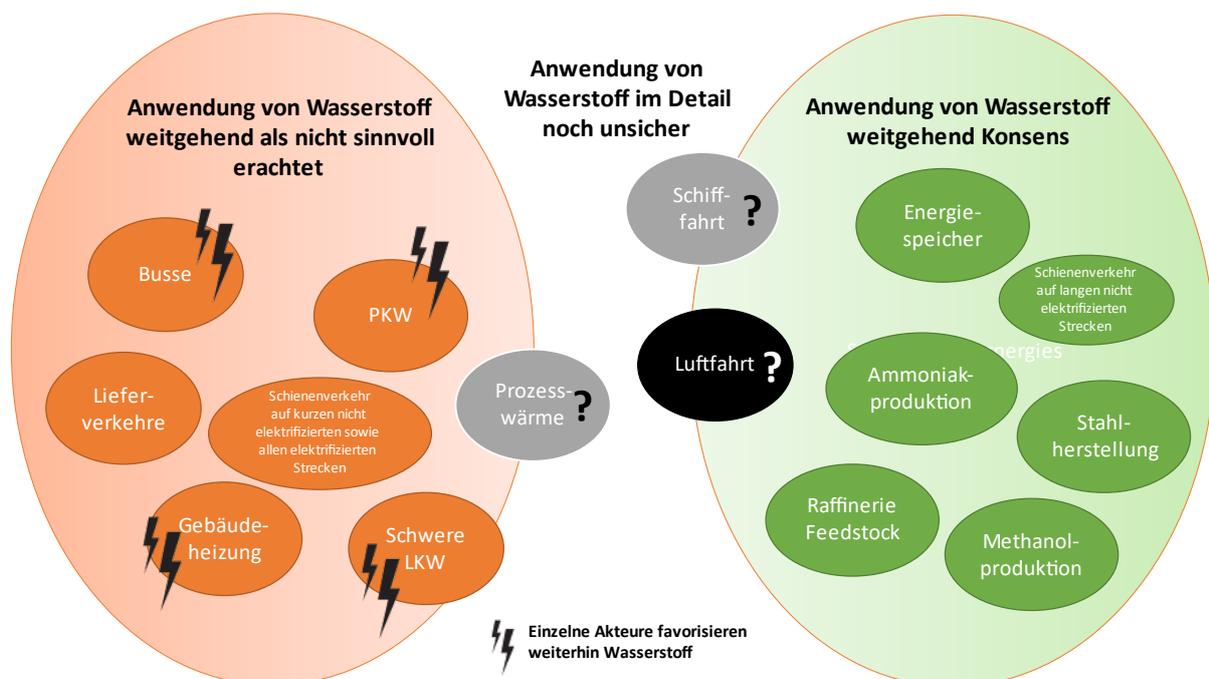
Streckenabschnitte zumindest Hybridlokomotiven erforderlich sein, die „unter dem Fahrdraht“ elektrisch fahren und auf anderen Teilstrecken z.B. auch mit Wasserstoff und Brennstoffzelle.

Die Nutzung von Biomasse für die Erzeugung erheblicher Mengen von **Prozesswärme** ist angesichts der begrenzten Potenziale wie auch der existierenden Nutzungsstrukturen und der aus ihnen erwachsenden Nutzungskonkurrenzen kaum wahrscheinlich. Als Alternative stehen die Elektrifizierung und der Einsatz des Brennstoffs Wasserstoff zur Verfügung. Madeddu et al. (2020) kommen zu dem Schluss, dass 78 % des bestehenden Wärmebedarfs der Industrie mit vorhandenen Technologien elektrifiziert werden können, während 99 % des Bedarfs durch die Hinzunahme von Technologien, die derzeit entwickelt werden, elektrifiziert werden könnten. Je nach dem in Zukunft erzielten Wirkungsgrad der Wasserstofferzeugung wird für den Wasserstoffpfad eine um 40 % bis 50 % höhere Strommenge benötigt als für die Elektrifizierung und den Einsatz von „Direktstrom“. Da die Umstellung der Prozesswärmeversorgung noch am Anfang steht, dürften erhebliche F&E Mittel erforderlich sein, um zu volkswirtschaftlich optimalen, effizienten Lösungen zu kommen.

6.3 Überblick über Anwendungsfelder

Stellt man die Anwendungsfelder im Überblick dar, ergeben sich drei Gruppen. Dies sind zunächst die Anwendungsfelder von Wasserstoff, in denen der Einsatz von Wasserstoff im Vergleich zur Elektrifizierung von den allermeisten wissenschaftlichen Studien als wenig bis nicht sinnvoll erachtet wird. Dies sind die Heizung von Gebäuden, der Betrieb sämtlicher Straßenfahrzeuge von PKW und Lieferverkehren bis zu Bussen und LKW sowie der ohnehin schon weitgehend elektrifizierte Schienenverkehr. Alle diese Anwendungen werden in Anlehnung an Zachmann et al. (2021) der „all electric world“ zugeordnet.

Abbildung 21: Sinnvolle, weniger sinnvolle und unsichere Anwendungsfelder von Wasserstoff



Quelle: Borderstep

Das Wasserstoffdilemma

Die zweite Gruppe umfasst Anwendungen von Wasserstoff, die in der Fachwelt weitgehend Konsens sind und die der „Wasserstoffwelt“ zugeordnet werden. Neben der Stahlherstellung sind dies Anwendungen in der Chemie oder als chemischer Grundstoff wie Ammoniak, Methanol oder als Grundstoff für Raffinerien. Weiter umfasst diese Gruppe die Herstellung und Speicherung von Wasserstoff als Energiereserve für die Strom- und Wärmeproduktion in KWK-Kraftwerken sowie den Einsatz in H₂-Elektro-Hybridlokomotiven auf den im Laufe der Zeit immer weniger Eisenbahnstrecken, die noch nicht elektrifiziert sind.

Die dritte Gruppe umfasst die Erzeugung von Prozesswärme, die Schifffahrt und die Luftfahrt. In allen drei Gruppen ist das Rennen noch nicht entschieden. Zwar weisen Madeddu et al. (2020) darauf hin, dass weite Anwendungsbereiche der industriellen Prozesswärme elektrifizierbar sind und Altermatt et al. (o. J.) heben hervor, dass ein erheblicher Teil dieser Wärme unter dem Einsatz von Wärmepumpen sehr effizient bereitgestellt werden kann, aber ein Fortschreiten der Marktentwicklung in eine der beiden Richtungen Elektrifizierung oder Wasserstoff ist noch kaum zu beobachten. Bei der Schifffahrt ist noch abzuwarten, ob sich neben dem Antrieb durch synthetische Treibstoffe auch der Segelantrieb als nachhaltiger Schiffsantrieb durchsetzt. Und beim Flugverkehr ist noch offen, inwieweit der Flugzeugantrieb durch Synthetic Air Fuels sich angesichts der Klimakrise überhaupt begründen lässt, da diese den Treibhauseffekt beim Fliegen in großer Höhe nur um ca. ein Drittel reduzieren und insoweit keine klimafreundliche Lösung darstellen. Insbesondere bei diesen drei Anwendungen besteht insoweit noch keine klar erkennbare Richtungssicherheit.

QUELLEN

- Agora Energiewende. (2019). *Building sector Efficiency: A crucial Component of the Energy Transition. Final report*. Berlin. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.agora-energie-wende.de/en/publications/building-sector-efficiency-a-crucial-component-of-the-energy-transition/>
- Airbus. (2022, Februar 22). The ZEROe demonstrator has arrived. *Airbus*. Zugriff am 15.6.2022. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>
- Allianz pro Schiene. (2021, März 1). Elektrifizierung der Schiene braucht einen Schub. *Allianz pro Schiene*. Verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/elektrifizierung-der-schiene-braucht-einen-schub/>
- Alstom. (2019, Mai 21). RMV-Tochter fahma bestellt größte Brennstoffzellenzug-Flotte der Welt bei Alstom. *Alstom*. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2019/5/rmv-tochter-fahma-bestellt-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-der-welt>
- Alstom. (2021, Dezember 3). Alstom-Wasserstoffzug gewinnt Deutschen Nachhaltigkeitspreis. *Alstom*. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2021/12/alstom-wasserstoffzug-gewinnt-deutschen-nachhaltigkeitspreis>
- Altermatt, P. P., Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Gerhards, C., Weber, U. et al. (o. J.). Rapid substitution of fossil gas with renewable electricity and heat pumps: modelling bottom-up scenarios in Germany to support decision-making in line with the Paris Agreement. *to be published*.
- Arnold, M. & Sternberg, J. (2022, Februar 7). Deutsche Bahn setzt auf Biodiesel. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*, S. 20.
- Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. (2020). *Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg Klimaschutz und Wertschöpfung kombinieren*. Stuttgart.
- Baldino, C., O'Malley, J., Searle, S. & Christensen, A. (2021). *Hydrogen for heating? Decarbonization options for households in the European Union in 2050*. ICCT. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: <https://theicct.org/publication/hydrogen-for-heating-decarbonization-options-for-households-in-the-european-union-in-2050/>
- Bayerische Staatsregierung. (2020). *Bayerische Wasserstoffstrategie*. München.
- BMVI. (2016). *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Zugriff am 26.9.2016. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile
- BMWi. (2020). *Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=14
- BMWK. (2022). *Tabelle 5: Endenergieverbrauch erneuerbarer Energien für Wärme und Kälte 1990 bis 2021*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Zugriff am 12.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEWjz8KDPutn3AhWWQvEDHdbBDhYQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.erneuerbare-energien.de%2FEE%2FRedaktion%2FDE%2FDownloads%2Fzeitreihen-zur-entwicklung->

Das Wasserstoffdilemma

- der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2021-excel.xlsx%3F__blob%3Dpublication-File%26v%3D27&usg=AOvVaw0mw9EkQ_1qOyNsmKGxDTbi
- Bottler, S. (2021, April 27). Der Traum vom klimaneutralen Fliegen. *Deutsche Verkehrs Zeitung*.
- Bugge, M. M., Andersen, A. D. & Steen, M. (2021). The role of regional innovation systems in mission-oriented innovation policy: exploring the problem-solution space in electrification of maritime transport. *European Planning Studies*, 1–22.
<https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1988907>
- Bundesamt für Energie. (2021). *Energiespeichertechnologien. Kurzübersicht 2021*. Bern: Schweizerisches Bundesamt für Energie. Zugriff am 14.5.2022. Verfügbar unter:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjworHEi9_3AhWTQvEDHZOqCd8QFnoE-CAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fpubdb.bfe.admin.ch%2Fde%2Fpublication%2Fdownload%2F10623&usg=AOvVaw30P8P5ZitNa43BGd9mwb8T
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. (2016). Doppelstrategie aus Effizienz und erneuerbaren Energien. Zugriff am 5.4.2016. Verfügbar unter: <http://www.bdh-koeln.de/bdh/portrait/doppelstrategie.html>
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH). (2019). *Politikbrief „CO2-Senkung im Wärmemarkt mit Wasserstoff“*. Berlin. Zugriff am 1.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.bdh-industrie.de/verband/portrait/positionspapiere>
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH). (2021, November 25). BDH zum Koalitionsvertrag: Solides Fundament pro Wärmewende. Zugriff am 2.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.bdh-industrie.de/presse/pressemeldungen/artikel/bdh-zum-koalitionsvertrag-solides-fundament-pro-waermewende>
- Carwow. (2022). Vor- und Nachteile von Wasserstoffautos. *Carwow*. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.carwow.de/ratgeber/welches-auto-passt-zu-mir/das-wasserstoffauto-vorteile-nachteile-und-zukunftsaussichten#gref>
- Cassarino, T. G. & Barrett, M. (2021). *Meeting UK heat demands in zero emission renewable energy systems using storage and interconnectors*. preprint. In Review.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-629226/v1>
- Cellcentric. (2022). We power sustainable life. *Cellcentric*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.cellcentric.net/ueber-uns/>
- Clausen, J. & Fichter, K. (2019). The diffusion of environmental product and service innovations: Driving and inhibiting factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 64–95.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.003>
- Clever Tanken. (2022, Januar 21). Wasserstoff-Preis. *Clever Tanken*. Zugriff am 21.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.clever-tanken.de/>
- CSN. (2021, Februar 18). First order of an Oceanbird vessel Wallenius Wilhelmsen. *Cyprus Shipping News*. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: <https://cyprusshippingnews.com/2021/02/18/first-order-of-an-oceanbird-vessel-wallenius-wilhelmsen/>
- DAF. (2022). Hydrogen An interesting option for the future. *DAF*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.daf.com/en/about-daf/sustainability/alternative-fuels-and-drivelines/hydrogen>
- Dambeck, H., Ess, F., Falkenberg, H., Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S. et al. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2050- In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals*. Berlin: Prognos AG, Öko-Institut,

Das Wasserstoffdilemma

- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie. Zugriff am 16.7.2021. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf
- Dena. (2018). *Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Zugriff am 16.8.2019. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- Derwent, R. G. (2018). *Hydrogen for Heating: Atmospheric impacts. A literature review*. London. Zugriff am 2.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.gov.uk/government/publications/atmospheric-impacts-of-hydrogen-literature-review>
- Derwent, R., Simmonds, P., O'Doherty, S., Manning, A., Collins, W. & Stevenson, D. (2006). Global environmental impacts of the hydrogen economy. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications*, 1(1), 57. <https://doi.org/10.1504/IJNHPA.2006.009869>
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022). *Hintergrundpapier vom 11. März 2022 zum für einen Umstieg auf eine resiliente Energieversorgung mit erneuerbaren Gasen*. Bonn. Zugriff am 26.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/meldungen/meldung-vom-15032022-hintergrundinformationen-gasversorgung>
- Die Bundesregierung. (2022). *Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie*. Berlin. Zugriff am 7.6.2022. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-der-nws.html>
- Die Zeit Online. (2021, September 7). Premiere für Batteriezug: Regel-Einsatz ab Dezember geplant. *Die Zeit*.
- DIHK. (2020). *Wasserstoff. DIHK Faktenpapier*. Berlin, Brüssel. Zugriff am 15.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>
- electrive.net. (2021, Juli 7). Renault and Plug Power reveal H2 plans with Hyvia. *electrive.net*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.electrive.com/2021/07/07/renault-and-plug-power-reveal-h2-plans-with-hyvia/>
- Energy Transitions Commission (ETC). (2021). *Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy*. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/ETC-Global-Hydrogen-Report.pdf>
- Ernst & Young GmbH. (2016). *Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland*. Berlin.
- EU Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brüssel. Zugriff am 24.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/hydrogen_strategy.pdf
- EU Commission. (2022). *ANNEX to the COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../...amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities*. Brüssel. Zugriff am 7.2.2022. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/finance/docs/level-2-measures/taxonomy-regulation-delegated-act-2022-631-annex-1_en.pdf
- European Aviation.net. (2022, Februar 3). APUS entwickelt wasserstoffbetriebenes Flugzeug. *European Aviation.net*. Zugriff am 15.6.2022. Verfügbar unter: <https://european-aviation.net/apus-entwickelt-wasserstoffbetriebenes-flugzeug/>

Das Wasserstoffdilemma

- European Clean Hydrogen Alliance. (2022). Project pipeline of the European Clean Hydrogen Alliance. *Europa.eu*. Zugriff am 25.1.2022. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/growth/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance/project-pipeline_en
- European Hydrogen Backbone & Gas for Climate. (2021). *Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen*. Utrecht. Zugriff am 24.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/EHB_Analysing-the-future-demand-supply-and-transport-of-hydrogen_June-2021.pdf
- Eurostat. (2020). Which EU countries had the highest GDP in 2019? Zugriff am 22.2.2022. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200508-1>
- Folkers, M. & Paech, N. (2020). *All you need is less*. München: oekom verlag.
- Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISE, & Fraunhofer ISI. (2021). *Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats*. Karlsruhe - Freiburg - Cottbus.
- Fraunhofer ISE. (2020). *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem . Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. Freiburg. Zugriff am 16.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- Fraunhofer ISI. (2021). *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD*. Karlsruhe. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/>
- Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE. (2019). *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Karlsruhe und Freiburg. Zugriff am 16.1.2022. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf
- Fraunhofer ISI, TU Wien & Comllias. (2019). *D7.8: Summary report - Energy Systems: Supply Perspective*. Wien und Karlsruhe. Zugriff am 18.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/D_7_8_Summary_report_Energy_Systems_Supply_Perspective.pdf
- Freistaat Sachsen. (2021). *Die Sächsische Wasserstoffstrategie*. Dresden.
- Freistaat Thüringen Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz. (2021). *Thüringer Landesstrategie Wasserstoff*. Erfurt.
- Fuel Cell Electric Busses Knowledge Base. (2022). Bus locations. *Fuel Cell Electric Busses Knowledge Base*. Zugriff am 24.2.2022. Verfügbar unter: <https://fuelcellbuses.eu/category/demos-europe>
- Gatzen, C. & Reger, M. (2022). *Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff – Merit Order für klimafreundliche Gase in 2030 und 2045*. Bonn: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Zugriff am 26.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-02032022-wasserstoffmengen>
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Global CCS Institute. (2021). *Global Satus of CCS 2020*. Melbourne. Zugriff am 13.5.2020. Verfügbar unter: [67](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-</p></div><div data-bbox=)

Das Wasserstoffdilemma

KEWjssdeQ3dz3AhX8SfEDHd9xA7cQFnoECAcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.globalccsinstitute.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F03%2FGlobal-Status-of-CCS-Report-English.pdf&usg=AOvVaw1DdkOHukQ4oasUusbMEgl_O

- Gründler, M. & Kammel, A. (2021, April 13). Warum die Zukunft dem E-Lkw gehört. *Traton*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://traton.com/de/newsroom/aktuelle-themen/zukunft-transportsektor-e-lkw.html>
- H2-Live. (2022). H2 tanken. Wasserstoffmobilität beginnt jetzt. *H2Live*. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: <https://h2.live/>
- Hajek, S. (2022, Januar 27). Wasserstoff-Autos: Dieser Hyundai-Deal wirft Fragen auf. *Wirtschaftswache*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://support.hp.com/de-de/document/c03827818>
- Hanke-Rauschenbach, R. & Peterssen, F. (2021, November 4). Die Wasserelektrolyse als künftige Abwärmequelle: Eine Ersteinschätzung. Gehalten auf der 7. BMU-Fachtagung „Klimaschutz durch Abwärmenutzung“, Frankfurt am Main. Verfügbar unter: <https://www.izes.de/de/content/die-wasserelektrolyse-als-k%C3%BCnftige-abw%C3%A4rmequelle-eine-ersteinsch%C3%A4tzung>
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. (2021). *Die Potenziale des Wasserstoffs für Wirtschaft und Klimaschutz erschließen Eine Strategie für Hessen*. Wiesbaden.
- Heuser, P.-M., Grube, T., Heirnichs, H., Robinius, M. & Stolten, D. (2020). Worldwide Hydrogen Provision Scheme Based on Renewable Energy. *Preprints 2020*.
- Hommen, M. (2020, April 24). GLC F-Cell wird eingestellt. *AMZ*. Verfügbar unter: <https://www.amz.de/glc-f-cell-wird-eingestellt>
- Hucko, M. (2016). VW will Umweltprobleme mit dem ersten modernen Segelfrachter der Welt umschiffen. *Spiegel Online*.
- Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*. Brüssel. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan*. Paris. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA. (2021a). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris. Zugriff am 15.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- IEA. (2021b). Global EV Outlook 2021. *International Energy Agency*. Zugriff am 28.1.2020. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/GlobalEVOutlook2021.pdf>
- IEA. (2021c). *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris.
- Ilaria. (2020, August 25). Electric ships: the world's top five projects by battery capacity. *Ship Technology*. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.ship-technology.com/features/electric-ships-the-world-top-five-projects-by-battery-capacity/>
- infratest dimap. (2019). ARD-Deutschlandtrend. Zugriff am 12.12.2019. Verfügbar unter: <https://www.infratest-dimap.de/umfragen-analysen/bundesweit/ard-deutschland-trend/2019/mai/>

Das Wasserstoffdilemma

- Institut für Solarenergieforschung Hameln & Leibniz-Universität Hannover. (2020). *Bericht zum Forschungsprojekt Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen (SiKuWa)*. Hameln und Hannover. Zugriff am 23.1.2022. Verfügbar unter: <https://isfh.de/download/simulative-kurzstudie-zum-einsatz-von-wasserstofftechnologie-in-niedersachsen-sikuwa/>
- Invest in Niedersachsen. (2019). Weltweit erster Wasserstoffzug aus Niedersachsen. *Invest in Niedersachsen*. Verfügbar unter: <https://www.nds.de/de/darum-niedersachsen/erfolgsgeschichten/alstom>
- IRENA. (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective*, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Zugriff am 31.1.2020. Verfügbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf
- IRENA. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor*. Bonn. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>
- Jeß, C. (2022, Januar 14). So kommt ein Tesla Model S 1200 Kilometer weit. *Autobild*. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.autobild.de/artikel/tesla-model-s-reichweite-batterie-akku-start-up-one-21135405.html>
- Jöhrens, J., Allekotte, M., Heining, F., Helms, H., Räder, D., Köllermeier, N. et al. (2022). *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030*. Heidelberg.
- Jovan, D. J. & Dolanc, G. (2020). Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions. *Energies*, 13(24), 6599. <https://doi.org/10.3390/en13246599>
- Kopernikus-Projekt Ariadne. (2021). *Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor: Vergleich technischer Möglichkeiten und Kosten defossilisierter Optionen der Wärmeerzeugung*. Potsdam.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2022a). *Email Wasserstoff / AZ: 321-130/12081-22*. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2022b). *Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb. Monatsergebnisse Dezember 2021*. Flensburg. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Monatliche-Neuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html?yearFilter=2021&monthFilter=12_Dezember
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2022c). *Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen. Monatsergebnisse Dezember 2021*. Flensburg. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html?yearFilter=2021&monthFilter=12_Dezember
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2022d). *Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb FZ 28.7 Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Dezember 2021 nach ausgewählten Modellen (Top 10) sowie nach ausgewählten Kraftstoffarten bzw. Energiequellen*. Flensburg. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz28_n_uebersicht.html
- Krajinska, A. (2021). *Magic green fuels: Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems*. Brüssel. Zugriff am 20.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.transportenvironment.org/discover/magic-green-fuels-why-synthetic-fuels-in-cars-will-not-solve-europes-pollution-problems/>

Das Wasserstoffdilemma

- Kunkel, C. (2021, September 15). Wie Iveco den Lastwagen sauberer machen will. *Süddeutsche Zeitung*.
- Land Brandenburg Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie. (2021). *Maßnahmenkonkrete Strategie für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Land Brandenburg*. Potsdam.
- Lechtenböhrer, S., Samadi, Sa., Leipprand, A. & Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69(10), 10–13.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q. et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Liebreich, Mi. (2021, August 15). The Clean Hydrogen Ladder [Now updated to V4.1]. Zugriff am 1.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.liebreich.com/the-clean-hydrogen-ladder-now-updated-to-v4-1/>
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N. E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E. et al. (2014). Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management*, 146, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Lufthansa. (2019). Sustainable Aviation Fuel - Video. *Lufthansagroup*. Zugriff am 13.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.lufthansagroup.com/de/themen/sustainable-aviation-fuel.html>
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A. et al. (2020). The CO reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters*, 15(12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
- Magenheim-Hörmann, T. (2022, Januar 12). Energiekonzerne glauben nicht an neue Gaskraftwerke durch EU-Taxonomie. *Redaktionsnetzwerk Deutschland*.
- Martin, J. (2018). *Bewertung bedeutender Entscheidungskriterien für den Einsatz alternativer Antriebe im Schienenpersonennahverkehr (Master-Thesis)*. Erlangen.
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr Saarland. (2021). *Eine Wasserstoff-Strategie für das Saarland*. Saarbrücken.
- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. (2020). *Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf.
- Mitici, M., Pereira, M. & Oliviero, F. (2022). Electric flight scheduling with battery-charging and battery-swapping opportunities. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 11, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100074>
- NAH.SH. (2021, Dezember 8). Einsatz von Akkutriebzügen: Zuschlag für das letzte Teilnetz erteilt. *NAH.SH*. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://unternehmen.nah.sh/de/themen/neuigkeiten/einsatz-von-akkutriebzuegen-zuschlag-fuer-das-letzte-teilnetz-erteilt/>
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH. (2018). *Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Berlin. Zugriff am 25.2.2021. Verfügbar unter: <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2019/06/NOW-Elektrolysestudie-2018.pdf>
- Nationaler Wasserstoffrat. (2022). Mitglieder des Nationalen Wasserstoffrates. *Nationaler Wasserstoffrat*. Zugriff am 22.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.wasserstoffrat.de/nationaler-wasserstoffrat>

Das Wasserstoffdilemma

- Niedersächsische Landesforsten. (2019, November 29). Der Wald fest uim Griff des Klimawandels. Zugriff am 30.11.2019. Verfügbar unter: <https://www.landesforsten.de/2019/11/29/der-wald-fest-im-griff-des-klimawandels/>
- NMU. (2016). *Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050 - Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöste Szenarien*. Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz,. Zugriff am 22.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCL~1/App-Data/Local/Temp/Gutachten_Energieszenarien2050.pdf
- NOW. (2022, Januar 25). Allane Mobility Group erhält Rekordfördersumme für Vermarktung von Wasserstoffauto Hyundai NEXO. *NOW-GmbH*. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/allane-mobility-group-erhaelt-rekordfoerdersumme-fuer-vermarktung-von-wasserstoffauto-hyundai-nexo/>
- NOW-GmbH. (2021). *Bekanntmachung: Aufruf zur Skizzeneinreichung im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie für eine Durchführbarkeitsstudie eines Frachtenseglern mit alternativen Antrieben*. Berlin. Zugriff am 4.2.2021. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/frachtensegler-mit-alternativen-antrieben-foerderung-fuer-durchfuehrbarkeitsstudie-startet/>
- NOW-GmbH. (2022a). Wasser. *NOW-GmbH*. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/sektoren-themen/mobilitaet-verkehrstraeger/wasser/>
- NOW-GmbH. (2022b). Projektfinder Schiff. *NOW-GmbH*. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/projektfinder/?_sft_anwendungsbereich=schiff
- Öko-Institut e.V. (2021). *Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland*. Berlin. Zugriff am 29.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/Oeko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland.pdf>
- Oppenheimer, S. (2022, Februar 27). Umfrage: So groß ist der Wunsch der Deutschen nach Wasserstoff-Antrieb. *Merkur*. Zugriff am 27.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.merkur.de/auto/umfrage-wasserstoff-antrieb-auto-zukunft-display-autonomes-fahren-benzin-mobile-de-berlin-zr-91375840.html>
- Perner, J., Unteutsch, M. & Lövenich, A. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Köln. Zugriff am 10.1.2020. Verfügbar unter: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf
- Peterssen, F., Schlemminger, M., Lohr, C., Niepelt, R., Bensmann, A., Hanke-Rauschenbach, R. et al. (2022). Hydrogen supply scenarios for a climate neutral energy system in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, S0360319922007108. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.098>
- Plötz, P. (2022). Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. *Nature Electronics*, 5(1), 8–10. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>
- Rahmstorf, S. (2019, Oktober 20). Emissionsbudget Darum schweigt die Bundesregierung zur wichtigsten Zahl beim Klimaschutz. *Spiegel Online*. Zugriff am 16.11.2019. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/emissionsbudget-zur-wichtigsten-zahl-beim-klimaschutz-schweigt-die-regierung-a-1292033.html>
- Reinhold, L. (2020, Juni 10). EASA-Zulassung für Velis Elektro. *Aerocourier*. Zugriff am 26.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.aerokurier.de/elektroflug/pipistrel-easa-zulassung-fuer-velis-elektro/>

Das Wasserstoffdilemma

- Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P., Kullmann, F. & Heuser, P.-M. (2020). *Wege für die Energiewende. kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*. Jülich.
- Rosenow, J., Lowes, R., Broad, O., Hawker, G., Wu, J., Qadrdan, M. et al. (2020). *The pathway to net zero heating in the UK*. UK Energy Research Centre Energy Data Centre (UKERC EDC).
<https://doi.org/10.5286/UKERC.EDC.000941>
- Sachsen-Anhalt Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie. (2020). *Weißbuch zur Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für Sachsen-Anhalt*. Magdeburg.
- Schmidt, H. (2021, Februar 10). Gegen den Trend: Dieser Lkw-Hersteller setzt stärker auf Batterien als Brennstoffzellen. *Neue Zürcher Zeitung*.
- Schreiber, R. (2022, Februar 22). Analyse: Elektrobusse legen europaweit weiter zu. *electrive.net*. Zugriff am 22.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2022/02/22/analyse-elektrobusse-legen-europaweit-weiter-zu/>
- Seckmeyer, G. (2022). *E-Mail zu Klimawirkungen von Wasserstoff*. Hannover.
- Senf, C., Buras, A., Zang, C. S., Rammig, A. & Seidl, R. (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*, 11(1), 6200.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1>
- SGH2Energy. (2022). Cost Comparison. *SGH2Energy*. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.sgh2energy.com/economics>
- Shell Deutschland Oil GmbH. (2017). *ENERGIE DER ZUKUNFT? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2*. Hamburg. Zugriff am 15.1.2022. Verfügbar unter: https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf
- SkySailsGroup. (2022). About us. Zugriff am 1.2.2022. Verfügbar unter: <https://skysails-group.com/about-us/>
- Soller, G. (2020, Dezember 8). Bombardier Talent 3: Warum der Akku die Brennstoffzelle auch auf der Schiene schlagen könnte. *Vision Mobility*. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://vision-mobility.de/news/bombardier-talent-3-warum-der-akku-die-brennstoffzelle-auch-auf-der-schiene-schlagen-koennte-73723.html>
- Sorge, N.-V. (2021, August 30). Umfrage zu Elektroautos Welche Verkehrsmittel sollte der Staat fördern? *Spiegel Online*. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/auto/elektroautos-wasserstoff-bei-deutschen-beliebter-als-batterien-a-955fa3e2-e5b4-4077-aa2c-ec43e938b95c>
- SPD, Bündnis 90/Die Grünen & FDP. (2021). *Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)*.
- SPD, Die Grünen, & FDP. (2021). *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Berlin.
- Spritmonitor. (2022, Januar 21). Spritmonitor Toyota Mirai. *Spritmonitor*. Zugriff am 21.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.spritmonitor.de/de/uebersicht/49-Toyota/1565-Mirai.html?powerunit=2>

Das Wasserstoffdilemma

- Stadler Rail. (2018, Oktober 25). Stadler: Flirt Akku in Berlin vorgestellt. *lok-report*. Verfügbar unter: <https://www.lok-report.de/news/deutschland/industrie/item/7717-stadler-flirt-akku-in-berlin-vorgestellt.html>
- Stadler Rail. (2021). *224 Kilometer Batteriereichweite: Stadler stellt mit FLIRT Akku Weltrekord für das Guinness Buch der Rekorde auf*. Bussnang. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCLE~1/AppData/Local/Temp/2021_1222_medienmitteilung_stadler%20flirt%20akku%20stellt%20weltrekord%20auf_de.pdf
- Stahl, T. (2022a, Januar 22). Aus für Wasserstoff: Diese Stadt setzt jetzt auf viel günstigere Elektro-Busse. Zugriff am 25.1.2022. Verfügbar unter: https://efahrer.chip.de/news/aus-fuer-wasserstoff-diese-stadt-setzt-jetzt-auf-viel-guenstigere-elektro-busse_106871
- Stahl, T. (2022b, Januar 24). Wasserstoff-Autos: Honda-Chef mischt sich in Toyotas Pläne ein. *efahrer*. Zugriff am 27.1.2022. Verfügbar unter: https://efahrer.chip.de/news/wasserstoff-autos-honda-chef-mischt-sich-in-toyotas-plaene-ein_106968
- Statista. (2021, Januar 6). Produktion von Wasserstoff nach Prozess in Deutschland im Jahr 2020. *Statista*. Zugriff am 2.3.2022. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1194793/umfrage/produktion-von-wasserstoff-nach-prozess/>
- Stegmaier, G. (2021, September 16). Wasserstoff in der Nische, kein Verbrenner-Ende. *Auto-Motor-und-Sport*. Zugriff am 27.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/wasserstoffantrieb-bmw-nischenprodukt-fokuse-antrieb-kein-ende-verbrenner/>
- Stepanek, M. (2020, Juni 22). Wenn Drachen große Schiffe ziehen. *Future Zone*. Zugriff am 21.2.2022. Verfügbar unter: <https://futurezone.at/science/wenn-drachen-grosse-schiffe-ziehen/400942319>
- Tagesschau. (2022, März 20). Habeck vereinbart Energiepartnerschaft mit Katar. *tagesschau.de*. Zugriff am 27.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/inland/habeck-gasversorgung-winter-katar-emirate-103.html>
- Taylor, M. (2021, Dezember 31). Hyundai Freezes Third-Gen Hydrogen Fuel Cell EV Development. *Forbes*. Zugriff am 24.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.forbes.com/sites/michaeltaylor/2021/12/31/hyundai-freezes-third-gen-hydrogen-fuel-cell-ev-development/?sh=6f1d87243588>
- The Boston Consulting Group & Prognos. (2018). *Klimapfade für Deutschland*. Berlin. Zugriff am 24.1.2018. Verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- Tix, M. (2022, Februar 28). Krieg in der Ukraine. Zwei neue LNG-Terminals für Deutschland. *energategemessenger*. Zugriff am 27.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.energategemessenger.de/news/220393/zwei-neue-lng-terminals-fuer-deutschland>
- Tjarks, G. H. (2017). *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen*. Jülich. Zugriff am 17.1.2022. Verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>
- UBA. (2021, November 12). Seeschifffahrt. *Umweltbundesamt*. Zugriff am 24.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schifffahrt#fakten-zur-seeschifffahrt-und-zu-ihren-auswirkungen-auf-die-umwelt>
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A., Everall, J., Sacchi, R. & Luderer, G. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11(5), 384–393. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- Ulrich, B. (2019). *Alles wird anders: Das Zeitalter der Ökologie*. Köln: Verlag Kiepenheuer & Witsch.

Das Wasserstoffdilemma

- Umweltbundesamt. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 30.12.2019. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf
- Umweltbundesamt. (2021a). *Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_abb_entw-waermeverbrauch-ee_2021-12-02.pdf
- Umweltbundesamt. (2021b, November 15). *Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern*. Zugriff am 3.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick>
- UNECE. (2022). *New vehicle registrations by Fuel Type, Type of Vehicle, Country and Year. UNECE*. Zugriff am 24.2.2022. Verfügbar unter: https://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT__40-TRTRANS__03-TRRoad-Fleet/08_en_TRRoadNewVehF_r.px/table/tableViewLayout1/
- Vahs, M., Bentin, M., Elger, D. & Schnabel, C. (2021). *Wissenschaftlicher Abschlussbericht GreenSailer*. Leer. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: <https://www.hs-emden-leer.de/studierende/fachbereiche/seefahrt-und-maritime-wissenschaften/forschung-labore-projekte/projekte/greensailer>
- Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W. & Lenaerts, S. (2021). *Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. Energy & Environmental Science*, 14(2), 815–843. <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
- VDE (Hrsg.). (2019). *Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV Einschätzung der systemischen Potenziale*. Frankfurt am Main.
- Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU). (2017). *Erdgasinfrastruktur in der Zukunft: Darauf können wir aufbauen*. Berlin: Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU).
- Viktorsson, L., Heinonen, J., Skulason, J. & Unnthorsson, R. (2017). *A Step towards the Hydrogen Economy — A Life Cycle Cost Analysis of A Hydrogen Refueling Station. Energies*, 10(6), 763. <https://doi.org/10.3390/en10060763>
- Vogel, B., Feck, T. & Groß, J.-U. (2011). *Impact of stratospheric water vapor enhancements caused by CH4 and H2O increase on polar ozone loss. Journal of Geophysical Research*, 116(D5), D05301. <https://doi.org/10.1029/2010JD014234>
- Wikipedia. (2022). *E-Ship 1. Wikipedia*. Zugriff am 4.2.2022. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/E-Ship_1#cite_note-9
- Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer. (2019). *Norddeutsche Wasserstoffstrategie*.
- Witsch, K. (2022, April 19). *Grüner Wasserstoff ist zum ersten Mal günstiger als Wasserstoff aus Erdgas. Handelsblatt*.
- World Energy Council Europe. (2021). *Decarbonised hydrogen imports into the European Union: challenges and opportunities*. Berlin. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.welternegerat.de/publikationen/studien/hydrogen-imports-into-the-eu/>
- Wuppertal Institut. (2021). *CO2-neutrale Gebäude bis spätestens 2045*. Wuppertal. Zugriff am 31.1.2022. Verfügbar unter: file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/ZI21_Gebaeude.pdf

Das Wasserstoffdilemma

Zachmann, G., Holz, F., Kemfert, C., McWillimas, B., Meissner, F., Roth, A. et al. (2022). *Decarbonisation of the energy system*. Brüssel. Zugriff am 19.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.bruegel.org/2022/01/decarbonisation-of-the-energy-system/>

Zachmann, G., Holz, F., Roth, A., McWillimas, B., Sogalla, R., Meissner, F. et al. (2021). *Decarbonisation of Energy Determining a robust mix of energy carriers for a carbon-neutral EUR*. Luxemburg. Zugriff am 19.1.2022. Verfügbar unter: [file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/IPOL_STU\(2021\)695469_EN.pdf](file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/IPOL_STU(2021)695469_EN.pdf)

Zukunft Gas e.V. (2022). Klimaziele für den Wärmemarkt Einsatz klimaneutraler Gase ist notwendig. Zugriff am 1.2.2022. Verfügbar unter: <https://gas.info/impressum>

ANHANG

Experteninterviews

Interviewpartner

- (1.) Prof. Dr. Richard Hanke Rauschenbach, Leibniz Universität Hannover, Wasserstoffkoordinator des niedersächsischen Energieforschungszentrums (29.3.2022)
- (2.) Dr. Veit Bürger, Öko-Institut, Stv. Leiter Bereich Energie & Klimaschutz (Freiburg), Mitautor „Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland“ (Öko-Institut, 2021) (17.3.2022)
- (3.) Prof. Dr. Franziska Holz, DIW, Stellvertretende Abteilungsleiterin in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt, Mitautorin „Decarbonisation of the energy system“ (Zachmann et al. 2022) (24.3.2022)
- (4.) Dr. Frank Meißner, DIW-Econ, Consultant, Mitautor „Decarbonisation of the energy system“ (Zachmann et al. 2022) (24.3.2022)
- (5.) Johannes Daum, NOW-GmbH, Bereichsleiter Wasserstoff, alternative Kraftstoffe und Brennstoffzelle (24.3.2022)

Leitfragen

- (1.) Welches sind aus Ihrer Sicht die prioritären Anwendungen für grünen Wasserstoff in Deutschland in 2030? Und bis 2050?
- (2.) Gibt es Anwendungen, für die der Wasserstoff erst später „ausgerollt“ werden sollte, weil erst später genügend Wasserstoff vorhanden sein wird?
- (3.) Mit Blick auf den möglichen Wasserstoffimport gibt es sehr unterschiedliche Annahmen. Wie verläuft aus ihrer Sicht die Entwicklung des Importanteils bis 2050?
- (4.) Gibt es Technologiepfade, die aufgrund einer zu starken Begeisterung für Wasserstoff in der Politik gegenwärtig nicht konsequent weiterentwickelt werden? Wenn ja, welche sind dies?
- (5.) Welche Rolle spielt Ihrer Ansicht nach die Tatsache, dass das geplante Verbrennen von Wasserstoff in vielen Anwendungen (Motoren, Gasheizungen etc.) genau die Technologien fortsetzt, die wir seit Jahrzehnten praktizieren? Bedeutet der Wasserstoff-Hype auch ein „Ausweichen aus dem Wandel?“
- (6.) Welche Anspruchsgruppen sind tonangebend und dominieren die Meinungsbildung, wenn es um Ausbaupfade für grünen Wasserstoff geht? Welche Bedeutung hat dabei die Wissenschaft?
- (7.) Welche Anspruchsgruppen vertreten aus Ihrer Sicht Positionen, die zu einer Fehlallokation von Wasserstoff führen könnten?
- (8.) Inwieweit verändert der Angriffskrieg Putin auf die Ukraine die energiepolitischen Rahmenbedingungen für die Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff?"