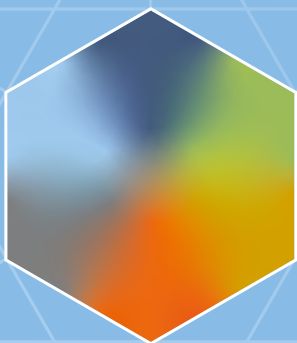


Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft

*Grundlagen, Konzepte und
mögliche Anwendungsbereiche*

„Ohne den Einsatz von Wasserstoff können wir die Klimaneutralität nicht erreichen.“
Prof. Dr. Veronika Grimm, Mitglied des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung





*Erkennen
ist mehr
als Sehen*



Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft

*Grundlagen, Konzepte und
mögliche Anwendungsbereiche*

Prof. Dr. Birgit Scheppat

David Coleman

Matthias Werner



„Vor zwei Jahren wurde kaum über Wasserstoff gesprochen. Heute ist das Thema in aller Munde. Zwar wird grüner Wasserstoff nicht allein Klimaneutralität erreichen, aber ohne grünen Wasserstoff wird nichts gelingen.“

Wolfgang Langhoff, CEO von BP Europa SE
Langhoff (2021, Wasserstoffgipfel)

„Klimaneutralität ist ohne Wasserstoff nicht machbar. Wir brauchen ihn vor allem als Speichermedium im Stromsektor und als Rohstoff in der Industrie.“

Rainer Baake, Direktor der Stiftung Klimaneutralität
Baake (2021, Klimaneutralität)

„Wasserstoff ist der ideale Energiespeicher, der zeitgemäße Ersatz für alle fossilen Energieträger wie Erdöl, Benzin, Diesel oder Kerosin.“

Dr. Matthias May, Universität Ulm, Institut für Theoretische Chemie
May (2021, Sonnenkönig)

„Wasserstoff kann (...) durch die Verwendung als Grundstoff weitere Produktionsprozesse in der Industrie dekarbonisieren, für die nach derzeitigem Stand der Technik keine anderen Dekarbonisierungstechnologien zur Verfügung stehen.“

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMW (2020, NWS)

„Wasserstoff ist ein zentrales Element für eine erfolgreiche Transformation der Industrie. Dies birgt neue Chancen für den Industriestandort Deutschland und Europa. Jetzt gilt es, die Maßnahmen der deutschen und europäischen Wasserstoffstrategie mit Tempo umzusetzen und Industriepolitik und Klimaschutz eng zu verzahnen. Der internationale Wettbewerb schläft nicht.“

Prof. Dr. Siegfried Russwurm, Präsident des BDI e.V.
Russwurm (2021, Wasserstoffgipfel)

„Für die Chemieindustrie steht die stoffliche Nutzung von CO₂-freiem Wasserstoff im Fokus. Die Herstellung via Wasserelektrolyse ist sehr stromintensiv. Wir müssen daher auch andere Verfahren im Blick behalten, damit wir mit der knappen verfügbaren Ressource Strom aus erneuerbaren Quellen möglichst viel CO₂ reduzieren können.“

Dr. Martin Brudermüller, CEO von BASF SE
Brudermüller (2021, Wasserstoffgipfel)

Bad Homburg/Wiesbaden, Januar 2022

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die Weltklimakonferenz COP26 in Glasgow Ende November 2021 hat die enorme Dringlichkeit globaler Dekarbonisierungsstrategien erneut sehr klar zum Ausdruck gebracht. Als globaler Konsens gilt nun, dass *„das aktuelle Jahrzehnt (...) entscheidend (sein wird) für unseren gemeinsamen Weg zur Klimaneutralität und zu einem Wirtschaftssystem (...), das die Grenzen unseres Planeten respektiert.“*¹

Trotz vielfältiger Bestrebungen ist jedoch noch kein klares Bild erkennbar, wie das zentrale Dilemma globaler Dekarbonisierung aufgelöst werden kann – einerseits hohe Versorgungssicherheit mit bezahlbarer Energie, andererseits massive Reduktion klimaschädlicher Treibhausgas-Emissionen.

Hier rückt das Thema Wasserstoff in den Fokus: Wasserstoff hinterlässt beim Verbrennen praktisch keine Abgase und steht (theoretisch) in nahezu unbegrenzter Menge zur Verfügung. Das macht Wasserstoff zur umweltfreundlichen Alternative zu Kohle, Öl und Erdgas und zum wichtigsten Aspiranten für eine zukunftsfähige Energieversorgung. Wasserstoff eignet sich als Energieträger sowohl für zahlreiche industrielle Anwendungen als auch für die Nutzung in privaten Haushalten. Daneben dient Wasserstoff als effizienter Energiespeicher – etwa für Strom aus Solarzellen oder Windrädern – sowie als Antriebsquelle innovativer Mobilitätslösungen.

In Verbindung mit der Brennstoffzelle wird Wasserstoff künftig ein zentraler Bestandteil eines nachhaltigen, integrierten Energiesystems sein. Für den Aufbau einer zukunftssicheren Wasserstoffwirtschaft sind jedoch noch ernsthafte technische Probleme zu lösen. Insbesondere die kostengünstige Erzeugung von Wasserstoff, die klimaneutrale Bereitstellung der dafür benötigten Elektrizität sowie die effiziente Verteilung des Energieträgers stehen dabei im Fokus.

Die vorliegende Studie, die gemeinsam mit dem Labor für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie des Fachbereiches Ingenieurwissenschaften an der Hochschule RheinMain erarbeitet wurde, geht diesen Fragen nach und prüft die Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine mögliche Wasserstoffwirtschaft der Zukunft. Noch ist die Wasserstofftechnik teuer, aber Klimakrise und Energiewende treiben das Thema an – in Politik, Wirtschaft und zunehmend auch bei Investoren.

Übrigens: Die Idee von Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ist keineswegs neu. Schon der französische Schriftsteller und Visionär Jules Verne bezeichnete Wasser als „Kohle der Zukunft“ und schrieb im späten 19. Jahrhundert: *„Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“*²

Wir werden es sehen und wünschen vorerst eine energiegeladene Lektüre!



Dr. Heinz-Werner Rapp
Gründer & Leiter Steering Board
FERI Cognitive Finance Institute



Prof. Dr. Birgit Scheppat
Leiterin Wasserstofftechnologie/
Energiespeicher
Hochschule RheinMain



David Coleman
M. Eng.
Hochschule RheinMain



Matthias Werner
B. Sc.
Hochschule RheinMain

¹ tagesschau (2021, UN-Klimakonferenz).

² Verne (1999, Insel).

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	1
Abkürzungsverzeichnis	2
1 Executive Summary	3
2 Hintergrund und Rahmenbedingungen	6
2.1 Wie Deutschland die Klimaschutzziele erreichen will	9
3 Wasserstoffstrategien in Europa und Deutschland	15
3.1 European Green Deal	15
3.2 Fit for 55	16
3.3 Hydrogen Roadmap Europe	17
3.4 Nationale Wasserstoffstrategie	20
4 Technologien zur Gewinnung von Wasserstoff	23
4.1 Die Herstellungsverfahren von Wasserstoff	23
4.2 Abscheidung, Speicherung und Nutzung von Kohlenstoff	26
4.3 Die verschiedenen Farben von Wasserstoff	27
5 Aufbereitung und Distribution von Wasserstoff	30
5.1 Die Aufbereitung von Wasserstoff	30
5.2 Die Distribution von Wasserstoff	32
6 Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff	35
6.1 Stoffliche Nutzung	35
6.2 Energetische Nutzung	39
6.2.1 Wasserstoff als Grundlage für klimaneutrale Mobilität	42
7 Konzepte für eine integrierte Wasserstoffwirtschaft	45
8 Fazit und Ausblick	49
8.1 Geopolitische Implikationen	50
8.2 Perspektiven für Investoren	51
Literaturverzeichnis	52
Informationen über die Autoren und den Kooperationspartner	56

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Jahresemissionsmengen in ausgewählten Sektoren	9
Abb. 2:	Energieverbrauch nach Sektoren	10
Abb. 3:	In Deutschland produzierte Strommenge 2019	11
Abb. 4:	In Deutschland produzierte Strommenge 2020	11
Abb. 5:	Einordnung verschiedener Energiespeicher nach Entladedauer und Speicherkapazitäten	13
Abb. 6:	Der europäische Grüne Deal	16
Abb. 7:	Der Wasserstoff-Regenbogen	27
Abb. 8:	Erzeugung, Aufbereitung, Distribution und Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff	34
Abb. 9:	Europäischer Verbrauch von Wasserstoff	37
Abb. 10:	Schematische Übersicht des Antriebsstranges eines Brennstoffzellenfahrzeugs	43
Abb. 11:	Schematische Darstellung eines Wasserstoffmotor-Antriebsstranges	44
Abb. 12:	Europäischer Infrastrukturplan (European Hydrogen Backbone)	47
Abb. 13:	Positionen der Hydrogen Valleys in Europa	48

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Maßnahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie im Überblick	21
Tab. 2:	Wasserstoff-Druckspeicher-Typen	31
Tab. 3:	Stoffliche Anwendungen von Wasserstoff	35

Abkürzungsverzeichnis

BZ	Brennstoffzelle
CAES	Compressed Air Energy Storage (Druckluftspeicher)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (CO ₂ Grenzausgleichssystem)
CCU	Carbon Capture and Utilization (Kohlenstoffabscheidung und -nutzung)
CCS	Carbon Capture and Storage (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
CGH ₂	Compressed Gaseous Hydrogen (Druckwasserstoff)
COP	Conference of the Parties (Vertragsstaatenkonferenz)
EE	Erneuerbare Energien
EKF	Energie- und Klimafonds
EU-EHS	EU-Emissionshandelssystem
GW	Gigawatt
KSG	Klimaschutzgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LH ₂	Liquid Hydrogen (Flüssigwasserstoff)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers (flüssige organische Wasserstoffträger)
Mt	Megatonne
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
PEC	Photo Electro Chemical Water Splitting (photoelektrochemisches Wasserspaltungsverfahren)
PEM	Proton-Exchange-Membrane (Protonen-Austausch-Membran)
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PtG	Power-to-Gas (gasförmige Folgeprodukte, die aus Wasserstoff hergestellt werden)
PtL	Power-to-Liquid (flüssige Folgeprodukte, die aus Wasserstoff hergestellt werden)
PtX	Power-to-X (Folgeprodukte, die aus grünem Wasserstoff hergestellt werden)
SMR	Steam Methane Reforming (Dampfreformierung)
SNG	Synthetic Natural Gas (synthetisches Erdgas)
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)
TWh	Terawattstunde
TWS	Thermochemical Water Splitting (thermochemisches Wasserspaltungsverfahren)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention)

1 Executive Summary

- Um das 1,5-Grad-Ziel von Paris zu erreichen, dürfen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts nicht mehr Treibhausgase ausgestoßen werden, als der Atmosphäre durch natürliche Senken entzogen werden. Diese „Treibhausgasneutralität“ kann jedoch nur dann erreicht werden, wenn sich die Weltwirtschaft konsequent nahezu vollständig „dekarbonisiert“.
- In diesem Kontext spielt Wasserstoff eine entscheidende Rolle, da es sich um einen vielfältig einsetzbaren Energieträger handelt, der in Kombination mit Brennstoffzellen u.a. den Verkehr dekarbonisieren und als Basis für synthetische Kraftstoffe genutzt werden kann.
- Wasserstoff kann aber auch die volatile Erzeugung erneuerbarer Energien und deren Verbrauch räumlich und zeitlich bedarfsgerecht voneinander trennen.
- Als Energievektor in andere Sektoren dekarbonisiert Wasserstoff als Grundstoff treibhausgasintensive Produktionsprozesse in der Industrie, für die es bislang keine anderen Dekarbonisierungstechnologien gibt.
- In Europa und Deutschland weisen u.a. Wasserstoffstrategien wie der European Green Deal und die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) den Weg in die Zukunft. So sollen bis 2030 laut NWS in Deutschland erzeugungsseitig 5 GW Elektrolyseleistung installiert und 14 TWh Wasserstoff auf Basis von 20 TWh erneuerbarer Energien produziert werden, ohne eine Konkurrenz zur direkten Grünstromnutzung darzustellen. Für den Zeitraum bis 2035 sind weitere 5 GW Elektrolyseleistung vorgesehen. Mittel- bis langfristig geht die NWS von Importen von Wasserstoff aus.
- Um importierten bzw. inländisch produzierten Wasserstoff zu verteilen, können die Gasnetzinfrastruktur sowie die angeschlossenen Gasspeicher genutzt werden. Darüber hinaus ist es jedoch notwendig, dezidierte Wasserstoffnetze auszubauen und den regulatorischen Rahmen für diese Transformation zu schaffen.
- In puncto Erzeugung von Wasserstoff sind zwei Methoden zu unterscheiden: a.) die regenerative und b.) die konventionelle Wasserstofferzeugung, wobei Kohlenwasserstoffe (z.B. Methan), Biomasse, Kohle oder auch Strom (Elektrolyse) Verwendung finden. Der größte Teil des weltweit verbrauchten Wasserstoffs wird über die Dampfreformierung von Erdgas (Steam Methane Reforming, SMR) erzeugt.
- Je nach Energieträger, Ausgangsstoff, Prozess oder nachgeschalteter Verfahren wird die Wasserstofferzeugung in die Farben Grün, Blau, Türkis, Gelb, Orange, Rot und Grau eingeteilt.
- Die Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff sind vielfältig. Grundsätzlich wird bei der Nutzung zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung unterschieden. Während die stoffliche Nutzung alle Nutzungsformen umfasst, die Wasserstoff als Ausgangs- oder Hilfsstoff verwenden, zielt die energetische Verwendung von Wasserstoff auf die Wandlung der chemisch gebundenen Energie in thermische oder elektrische Energie ab. Die Mineralöl- und Düngemittelindustrie sind die bedeutendsten Verbrauchszweige. Zusammen verbrauchen sie ca. 80 % des in Europa genutzten Wasserstoffs.
- Prinzipiell ist die energetische Verwendung von Wasserstoff überall dort vorstellbar, wo Erdgas, Mineralölprodukte und Kohle als Energieträger Gebrauch finden. Wasserstoff kann in thermisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen oder in Wasserstoff-Brennstoffzellen in die End- bzw. Nutzenergien Strom, Wärme und mechanische Energie konvertiert werden. In Verbrennungsmotoren kann Wasserstoff als Gas oder in Form von synthetischen Kraftstoffen verbrannt werden. Verbreiteter ist jedoch das Wasserstoff-Antriebskonzept auf Basis von Brennstoffzellen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind als Elektrofahrzeuge anzusehen, da sie von einem Elektromotor angetrieben werden, der Wasserstoff in einem Speicher mitführt und reinen Wasserdampf als Abgas freisetzt.

- Auf internationaler Ebene gibt es bereits zahlreiche Aktivitäten in Form von Wasserstoff-Roadmaps, die darauf abzielen, eine integrierte Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln und Industrien zu dekarbonisieren.
- Bereits seit vielen Jahren sind Wasserstoffpipelines im Gebrauch und werden zum energetischen Rückgrat der EU. Der *Hydrogen Backbone* mit einer geplanten Gesamtlänge von 39.700 km im Jahr 2040 soll alle wichtigen Industriezentren in Europa mit den erforderlichen Wasserstoffgasleitungen verbinden.
- 26 EU-Mitgliedstaaten haben sich zu einer *Wasserstoffinitiative* zusammengeschlossen. 14 Mitgliedstaaten haben bereits Wasserstoff in einem nationalen Strategieplan für den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe vorgesehen.
- Die *IPCEI-Projekte* (Important Projects of Common European Interest) der EU, die bis Mitte 2022 definiert sein sollen, werden einen wesentlichen Impuls geben, um mit Hilfe von Wasserstoffgroßprojekten die verschiedenen Herausforderungen der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft zu lösen.
- Schätzungen der EU gehen von kumulierten Investitionen in erneuerbaren Wasserstoff in Europa von 180 bis 470 Mrd. EUR bis 2050 aus.
- Für Investoren bietet der Wasserstoff-Komplex außergewöhnliche Chancen zur aktiven Partizipation an einer energetischen „Jahrhundert-Transformation“.
- Neben spezialisierten Herstellern von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen zählen versierte Anlagenbauer, Unternehmen im Bereich Solarenergie und Windkraft, Betreiber von Gasnetzen oder Tankerflotten, technische Systemintegratoren sowie Anbieter neuartiger Mobilitätskonzepte zu möglichen Profiteuren einer aufkommenden Wasserstoffwirtschaft.
- Auswahl und zeitliche Abfolge entsprechender Anlagethemen sollten jedoch eng an der Entwicklung politischer Rahmenbedingungen ausgerichtet werden. Auch das Risiko temporärer „Hype Cycles“, also einer euphorischen Überschätzung zukünftiger Wachstumsaussichten an den Kapitalmärkten, ist stets mitzuberücksichtigen.

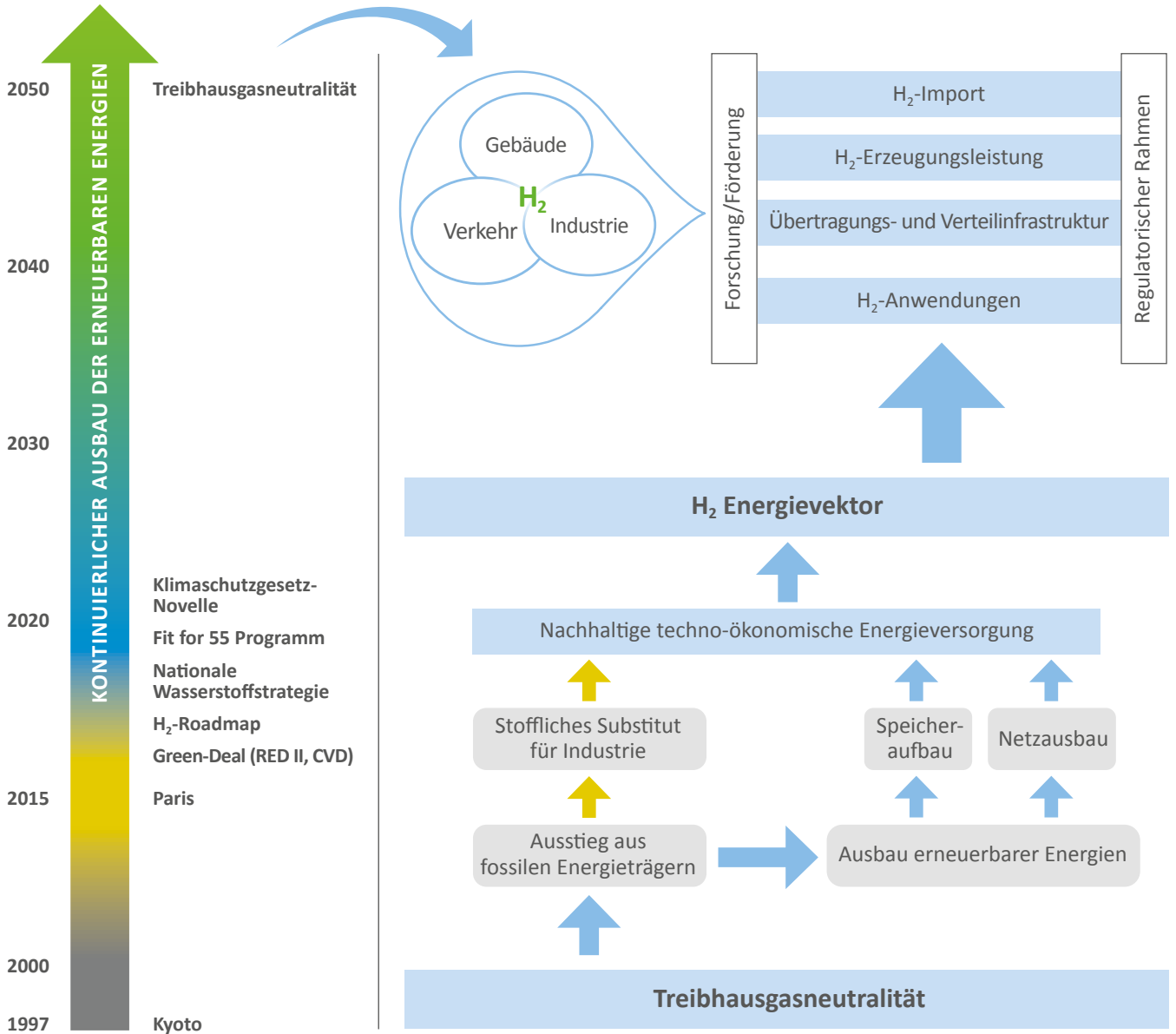


Wasserstoff ist ein Energiespeicher, der angebotsorientiert und flexibel erneuerbare Energien speichern und einen Beitrag zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage leisten kann. Das macht Wasserstoff zu einem wichtigen Baustein der Energiewende.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWi (2020, NWS)



COGNITIVE CONCLUSION
 Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft
 Grundlagen, Konzepte und mögliche Anwendungsbereiche



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021

2 Hintergrund und Rahmenbedingungen

Zu den zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts zählen der Klimawandel, eine steigende Weltbevölkerung, zunehmende Umweltbelastung durch anthropogene, also von uns Menschen verursachte Schadstoffe, die Endlichkeit sowie die ungleiche Verteilung bzw. Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe.

Spätestens die *Fridays-for-Future*-Bewegung rückte den Begriff der Klimakrise und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zunehmend in den Fokus der Gesellschaft. Ausgemachtes Ziel ist schnellstmögliche Treibhausgasneutralität.

„Nachhaltigkeit“ bedeutet gemäß der *Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*, „den Bedürfnissen der heutigen Generation zu entsprechen, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“.³

Die globale, sektorenübergreifende Energieversorgung basiert mit ca. 14.000 Megatonnen (Mt) Öläquivalenten zu 86 %⁴ auf **fossilen Energieträgern**, welche es in Zukunft vollständig zu substituieren gilt. Hierfür stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- die sektorenübergreifende Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien (EE),
- die Steigerung der Effizienz über die gesamte Energiewandlungskette hin zu einer Kreislaufwirtschaft sowie
- die Substitution begrenzter fossiler Energieträger in der Energieerzeugung durch erneuerbare Energieträger.

Wasserstoff wird in diesem Transformationsprozess eine zentrale Rolle einnehmen.

Der klimapolitische Rahmen wird durch die *Conference of the Parties (COP)* gegeben: 1992 kamen die Staaten der UN zusammen, um in Rio de Janeiro die Klimarahmenkonvention „United Nations Framework Convention on Climate Change“ (UNFCCC) zu unterzeichnen. Ihr Ziel war es, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann“.⁵

Treibhausgase sind gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, die sowohl einen natürlichen als auch menschlichen, also anthropogenen, Ursprung haben. Hierzu zählen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), das als Lachgas bekannte Distickstoffoxid (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃) sowie wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFKW) gemäß Anhang V Teil 2 der Europäischen Governance-Verordnung in der jeweils geltenden Fassung.⁶

Als oberstes Gremium des UNFCCC hat sich die COP etabliert. Sie soll in jährlichen Konferenzen, den sogenannten UN-Klimakonferenzen, zusammenkommen, um verbindliche Verpflichtungen zu beschließen. In der dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention von 1997 wurde das wohl wichtigste und v.a. verbindliche *Protokoll von Kyoto* formuliert. Die Besonderheit liegt in den erstmals bezifferten Mengen- und Zeitangaben zur Treibhausgasreduktion, um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken. Es wurde von 191 Ländern weltweit, darunter allen europäischen, ratifiziert.

³ BReg (2021, Nachhaltigkeitsstrategie).

⁴ IEA (2020, Global Review).

⁵ United Nations (1992, UNFCCC).

⁶ BMJV (2021, KSG).

Im Dezember 2015 haben knapp 190 Vertragsparteien, einschließlich aller EU Mitgliedsstaaten, das *Pariser Abkommen* der Konferenz der Vertragsparteien (COP21) als Folgeabkommen des Kyoto-Protokolls unterzeichnet und ratifiziert. Hierin haben sich die Länder auf gemeinsame Ziele geeinigt, die sie mit dem Abkommen erreichen wollen. Die Erderwärmung soll im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 Grad Celsius, idealerweise auf 1,5 Grad begrenzt werden. Diese Obergrenzen sind somit erstmals in einem völkerrechtlichen Vertrag verankert.

Um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen, dürfen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts nicht mehr Treibhausgase ausgestoßen werden als der Atmosphäre durch natürliche Senken, also etwa Wälder, entzogen werden. Diese „Treibhausgasneutralität“ kann nur dann erreicht werden, wenn die Weltwirtschaft rasch und konsequent deutlich weniger Kohlenstoff umsetzt, sich also nahezu **vollständig „dekarbonisiert“**.⁷

Ein weiteres Ziel des Vertrags: Die Staaten sollen sich besser an den Klimawandel anpassen und globale Finanzflüsse so gestalten, dass das Klima geschützt wird und die Widerstandsfähigkeit gegen die Folgen des Klimawandels steigt.⁸

Schätzungen der *Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien* (IRENA) zufolge müssen zur Erreichung der Ziele des Übereinkommens von Paris etwa 8 % des weltweiten Energieverbrauchs durch Wasserstoff gedeckt werden.⁹

Der Weg dorthin ist noch steinig und der aktuelle Zustand des Klimas alles andere als beruhigend. Im August 2021 fasste die Arbeitsgruppe 1 über naturwissenschaftliche Grundlagen des Weltklimarats der Vereinten Nationen IPCC die Situation mit folgenden Worten drastisch zusammen:

- *„Es ist eindeutig, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, den Ozean und die Landflächen erwärmt hat. Es haben weitverbreitete und schnelle Veränderungen in der Atmosphäre, dem Ozean, der Kryosphäre und der Biosphäre stattgefunden.*
- *Das Ausmaß der jüngsten Veränderungen im gesamten Klimasystem und der gegenwärtige Zustand vieler Aspekte des Klimasystems sind seit vielen Jahrhunderten bis Jahrtausenden beispiellos. Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus. Seit dem Fünften Sachstandsbericht (AR5) gibt es stärkere Belege für beobachtete Veränderungen von Extremen wie Hitzewellen, Starkniederschlägen, Dürren und tropischen Wirbelstürmen sowie insbesondere für deren Zuordnung zum Einfluss des Menschen.*



Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus.

Deutsche Koordinierungsstelle IPCC
(2021, Sachstandsbericht)



- *Viele Veränderungen im Klimasystem werden in unmittelbarem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung größer. Dazu gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen, marinen Hitzewellen und Starkniederschlägen, landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren in einigen Regionen, der Anteil heftiger tropischer Wirbelstürme sowie Rückgänge des arktischen Meereises, von Schneebedeckung und Permafrost.*

⁷ Vgl. FERI / WWF (2017, Dekarbonisierung).

⁸ United Nations (2015, Paris Agreement).

⁹ IRENA (2020, Globaler Ausblick).

- Fortschreitende globale Erwärmung wird laut Projektionen den globalen Wasserkreislauf weiter intensivieren, einschließlich seiner Variabilität, sowie der globalen Monsunniederschläge und der Heftigkeit von Niederschlags- und Trockenheitsereignissen.
- Die globale Oberflächentemperatur wird bei allen betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von 1,5°C und 2°C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, es sei denn, **es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Reduktionen der CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen.**¹⁰

Unter dem Begriff der **Energiewende** sind allgemein Maßnahmen subsummiert, die den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung in allen Sektoren sowie die Effizienz in der Energienutzung erhöhen sollen.

Der wesentliche Anteil anthropogener Treibhausgasemissionen geht auf die Gewinnung sowie energetische und stoffliche Nutzung fossiler Energieträger zurück. Natürlich vorkommende Energieträger – fossile als auch erneuerbare Energien – sind erdgeschichtlich bedingt global ungleich verteilt. Der Export fossiler Energieträger stellt v.a. für Entwicklungsländer einen wesentlichen Wirtschaftsfaktor dar. Industrienationen sind hingegen vom Import abhängig, weisen allerdings einen höheren personenspezifischen Energiebedarf als Entwicklungsländer auf.

Das zentrale Problem des über die letzten Jahrhunderte entwickelten Energiesystems liegt in der Nutzung fast aus-

schließlich fossiler Energieträger. Die Verbrennung dieser über Jahrtausende akkumulierter Biomasse in thermischen Kraftwerken birgt zwei zentrale Herausforderungen:

- Die Freisetzung des Treibhausgases CO₂ und weiterer Schadstoffe wie beispielsweise Stickoxide verursacht einen menschengemachten Treibhauseffekt. Verglichen mit der Millionen Jahre dauernden Entstehung natürlicher Kohlenwasserstoffe erfolgt die Freisetzung des Treibhausgases jedoch schlagartig.
- Die Nachfrage nach fossilen Energieträgern würde in absehbarer Zeit das Angebot übersteigen, was unter Aufrechterhaltung des Status quo zwangsläufig zu einer Erschöpfung der Ressource führen würde.

Neben den fossilen Primärenergieträgern (Kohle, Mineralöl und Erdgas) wird ein global zunehmender Teil des Strombedarfs durch Kernkraftwerke gedeckt. Trotz kontrovers geführter Diskussionen decken weltweit ca. 440 Reaktorblöcke etwa 10 % des Strombedarfs.¹¹

Diese Rahmenbedingungen vor Augen, hat sich in Deutschland und Europa die sogenannte **Energiewende** etabliert.

“
Wasserstoff ist in der Energiewende das Bindeglied für eine CO₂-neutrale Mobilität und Industrie. Wer das Klima schützen will und Energiewende sagt, der meint Wasserstoff.

Dr. Andreas Opfermann,
Executive Vice President Americas von Linde plc
Opfermann (2021, Wasserstoffgipfel)

¹⁰ Deutsche Koordinierungsstelle IPCC (2021, Sachstandsbericht); Hervorhebung im Original.

¹¹ statista (2021, Stromerzeugung).

2.1 Wie Deutschland die Klimaschutzziele erreichen will

Um die nationalen Klimaschutzziele zu erfüllen und die europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten, hat Deutschland seine nationalen Treibhausgasemissionsziele im deutschen *Klimaschutzgesetz (KSG)* festgehalten.¹²

Im April 2021 wurde die Bundesregierung durch Beschluss des Bundesverfassungsgerichts dazu verpflichtet, das Klimaschutzgesetz nachzubessern. Aus Sicht des Gerichts waren die Zielvorgaben und Maßnahmen für den Zeitraum zwischen 2030 bis zur Erreichung der Treibhausgasneutralität nämlich nicht ausreichend konkretisiert.

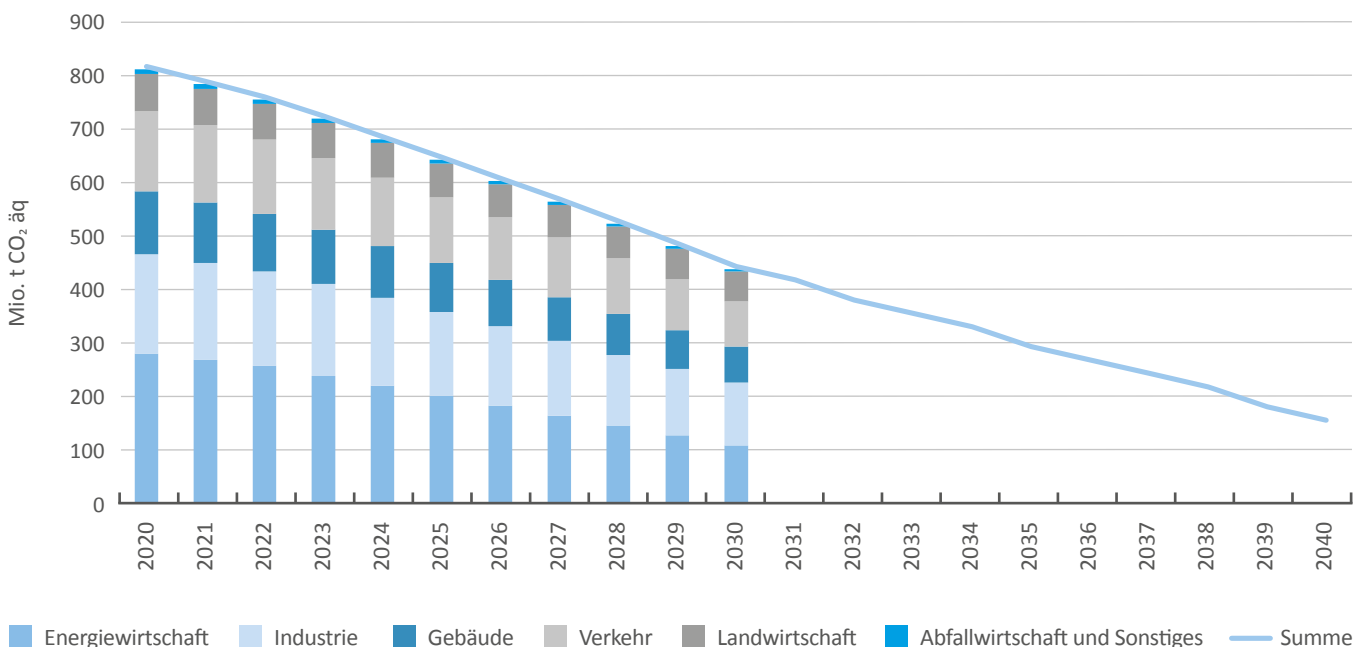
Die entsprechende *Klimaschutznovelle* vom Juni 2021 sieht verschärfte Treibhausgasemissionsziele vor. Und zwar um 10 % auf mindestens 65 % bis 2030

gegenüber 1990 und 88 % bis 2040. Darüber hinaus ist eine Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 festgeschrieben. Nach 2050 werden negative Treibhausgasemissionen angestrebt.

Der Beschluss des Gerichts verpflichtet den deutschen Staat, aktiv vorzubeugen, so dass es in Zukunft nicht zu unverhältnismäßigen Einschränkungen der Freiheitsgrundrechte der heute jüngeren Menschen kommt.¹³

Um diese Klimaschutzziele zu erreichen, werden jährliche Jahresemissionsmengen für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft festgeschrieben, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Darüber hinaus sind die im KSG festgeschriebenen, jedoch noch nicht zugeordneten Minderungen bis 2040 interpoliert.

Abb. 1: Jahresemissionsmengen in ausgewählten Sektoren



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021 basierend auf BMU (2021, Novelle KSG)

¹² BMJV (2021, KSG).

¹³ BReg (2021, Generationenvertrag).

Sollten Sektoren ihre zulässige Jahresemissionsmenge in einem Berichtsjahr überschreiten, so muss das zuständige Bundesministerium der Bundesregierung innerhalb von drei Monaten ein Sofortprogramm für den jeweiligen Sektor vorlegen, um die Jahresemissionsmengen für die folgenden Jahre wieder erfolgreich einhalten zu können.

An dieser Stelle ist ein Vergleich der Sektoren in puncto Endenergieverbrauch interessant. Wie Abbildung 2 verdeutlicht, weist der Verkehrssektor mit 770 TWh den höchsten Verbrauch auf, gefolgt von der Industrie mit 704 TWh. Allerdings hat in den letzten 30 Jahren keine signifikante Reduktion des Endenergieverbrauchs stattgefunden.

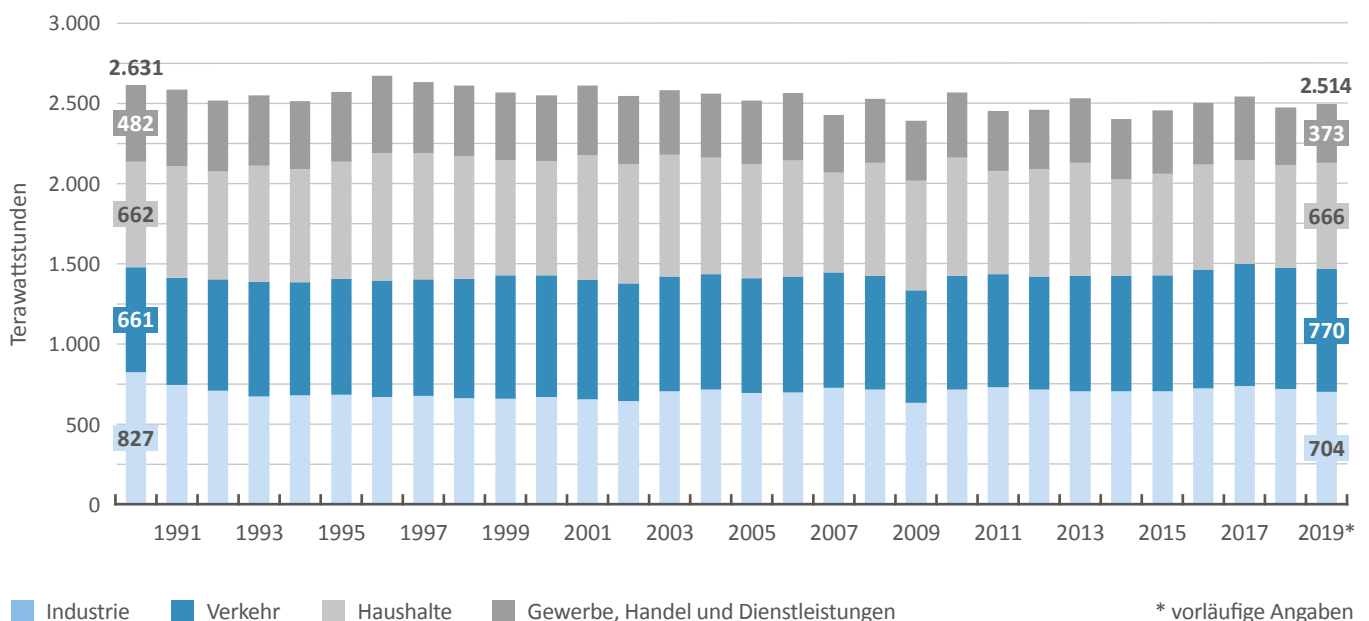
Zu realisieren sind die Klimaziele von Paris ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energien, wie Wind, Sonne, Wasserkraft sowie Biomasse. Dabei besitzen v.a. die Wind- als auch Solarenergie die höchsten Potentiale zur Deckung des globalen Primärenergiebedarfs.

Folglich gilt es, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Zukunft deutlich zu erhöhen. Wie Abbildungen 3 und 4 zeigen, verfolgt Deutschland diesen Weg.

2019 und 2020 erreichte der Anteil der erneuerbaren Energien an der in der Bundesrepublik erzeugten und eingespeisten Strommenge einen neuen Höchststand: „Er stieg von 42,3 % im Jahr 2019 auf 47,0 % im Jahr 2020. Mit 25,6 % hatte mit der Windkraft erstmals ein erneuerbarer Energieträger den höchsten Anteil an der in einem Jahr eingespeisten Strommenge und löste damit Kohle als wichtigsten Energieträger ab. Im Jahr 2020 wurden 5,4 % mehr Strom aus Windkraft erzeugt als 2019, als der Anteil noch bei 22,8 % gelegen hatte.“¹⁴

Indem Deutschland Wind- und Solarenergie in das bestehende Endenergiesystem integriert, werden die Voraussetzungen für eine überwiegend nachhaltige Energieversorgung geschaffen. Dabei sollen in erster Linie die Energieeffizienz gesteigert sowie fossile Energieträger – Mineralöl, Kohle, Erdgas – substituiert werden, um zum einen Ressourcen zu schonen und zum anderen die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

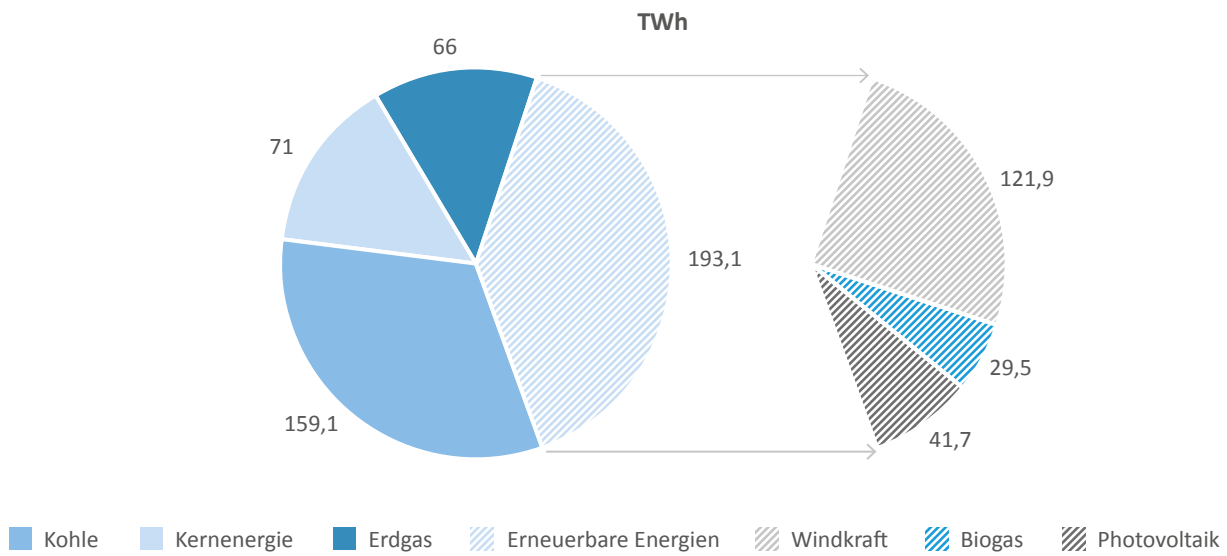
Abb. 2: Energieverbrauch nach Sektoren



Quelle: Umweltbundesamt (2021, Energieverbrauch)

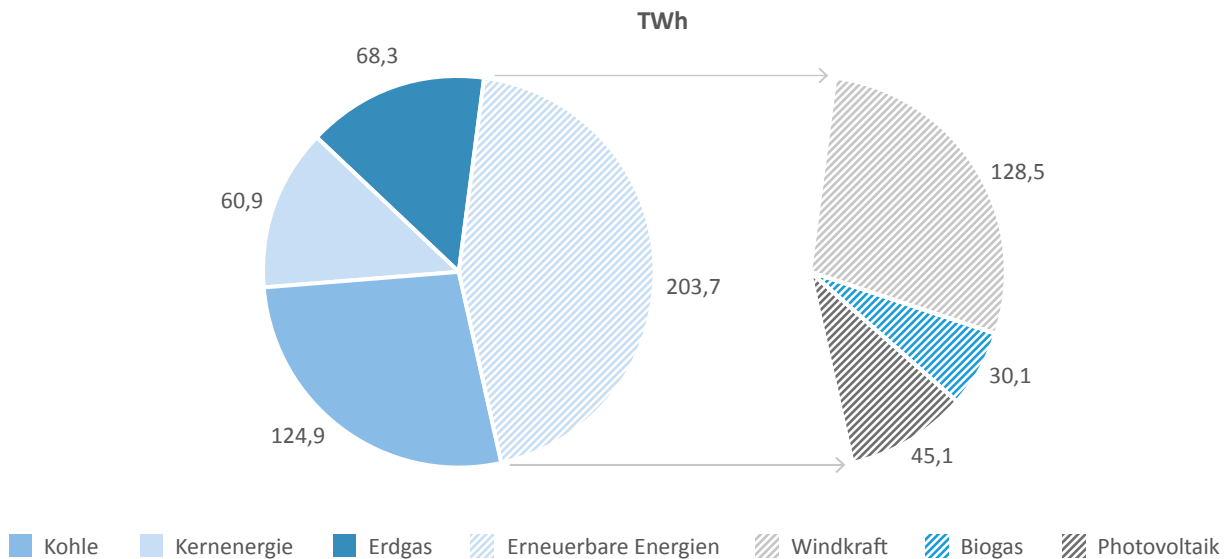
¹⁴ DESTATIS (2021, Stromerzeugung Korrektur).

Abb. 3: In Deutschland produzierte Strommenge in 2019



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021, basierend auf DESTATIS (2021, Stromerzeugung Korrektur)

Abb. 4: In Deutschland produzierte Strommenge in 2020



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021, basierend auf DESTATIS (2021, Stromerzeugung Korrektur)

Die Herausforderung der Versorgung aus Wind- und Sonnenenergie ist ihr volatiler Charakter, der in Zukunft ohne weitere Anpassungen zwangsläufig zu hohen Fluktuationen im Stromnetz führen wird.

Starke Bewölkung oder Windflauten treten insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten auf. Hier ist mit erheblichen Engpassituationen der Energieversorgung zu rechnen. Auf der anderen Seite führen konstante Windtage zu Überschüssen, welche zurzeit abgeriegelt werden. Diesen Herausforderungen muss auf drei Ebenen begegnet werden:

1. Netzausbau
2. Lastmanagement
3. Aufbau von Speicherkapazitäten

Der **Netzausbau** ist als zentrale Ausgleichsoption aufzuführen, da erzeugter elektrischer Strom aus erneuerbaren Energien vorzugsweise umgehend und ohne weitere Konversionschritte verbraucht werden sollte. Jede Energieumwandlung ist mit Energieverlusten behaftet. Jedoch schreitet der Netzausbau, bedingt durch Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung, hohen Kosten und langen Planfeststellungsverfahren zunehmend langsamer voran. Dabei ist der Ausbau sowohl auf Übertragungsnetz- als auch auf Verteilnetzebene von elementarer Bedeutung, um die Abriegelung v.a. der Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen zu vermeiden und Stromnetzstabilität zu gewährleisten.

Das **Übertragungsnetz** ist zur überregionalen Versorgung und Übertragung von elektrischer Energie im Höchstspannungsbereich zuständig. Es wird von den vier Übertragungsnetzbetreibern *50Hertz*, *Amprion*, *TenneT* und *TransnetBW* betrieben.

Das **Verteilnetz** ist für die Feinverteilung elektrischer Energie an die Endverbraucher zuständig. In Deutschland wird es durch das Nieder-, Mittel- sowie durch Teile des Hochspannungsnetzes gebildet.

Seeseitig errichtete **Windenergieanlagen** werden als **Offshore**, landseitig errichtete als **Onshore** bezeichnet.

Smart-Grids sind intelligente Stromnetze, die Erzeugung, Speicherung und Verbrauch kombinieren. Eine zentrale Steuerung stimmt diese Faktoren aufeinander ab und gleicht so Leistungsschwankungen im Netz aus, wie sie bei erneuerbaren Energien vorkommen.

Unter **Lastmanagement** werden Maßnahmen der aktiven Steuerung der Stromverbrauchsseite verstanden, mit dem Ziel, Netzengpässe zu vermeiden.

Allein mit dem Ausbau der Netze ist die Integration signifikanter Mengen (> 100 TWh) erneuerbarer Energien jedoch nicht zu bewältigen. Ferner muss flächendeckende Kommunikation zwischen Erzeugung (z.B. Windkraftanlagen), Transport (z.B. Übertragungsnetz) und Verbrauch (z.B. Haushalte) erfolgen. Um v.a. die tageszeitabhängigen Fluktuationen auszugleichen, ist die nachfragegesteuerte und flexible Bereitstellung von Energie aus steuerbaren erneuerbaren Energien eine wichtige Option.

Die zentrale Herausforderung hierbei ist die intelligente Kommunikation und Steuerung der Netze. Mittels **Lastmanagement** kann der Energieverbrauch von Konsumenten auf den Tag verteilt werden. Lastspitzen können so vermieden werden („Smart-Grids“). Allerdings ist auch hierbei, analog zu Übertragungs- und Verteilnetz, erheblicher Ausbaubedarf vorhanden. Es bleibt festzuhalten, dass trotz eines flächendeckenden Stromnetzausbaus und umfassenden Lastmanagements der weitere Ausbau von Energiespeichern notwendig ist.¹⁵

¹⁵ Fraunhofer IWS (2011, ökologische Bewertung); Wietschel et al. (2015, Energietechnologien).

Es gibt zahlreiche **Energiespeicher**, die im zukünftigen Energiesystem unterschiedlich wichtige Rollen spielen werden. Der Vergleich der Speicherarten in Bezug auf Speicherkapazität und Ausspeicherdauern bzw. Entladezeiten ist in Abbildung 5 dargestellt. Die elektrischen und elektrochemischen Energiespeicher, wozu die gängigen Antriebsbatterien von batterieelektrischen Fahrzeugen zählen, weisen maximale Kapazitäten von mehreren 100 MWh bei Ausspeicherdauern von bis zu einem Tag auf. Druckluft- (CAES – Compressed Air Energy Storage) und Pumpspeicher (PSW), welche zu den mechanischen Speichern zählen, weisen bereits Kapazitäten im Bereich von GWh bei Entladezeiten mehrerer Tage bis Wochen auf.

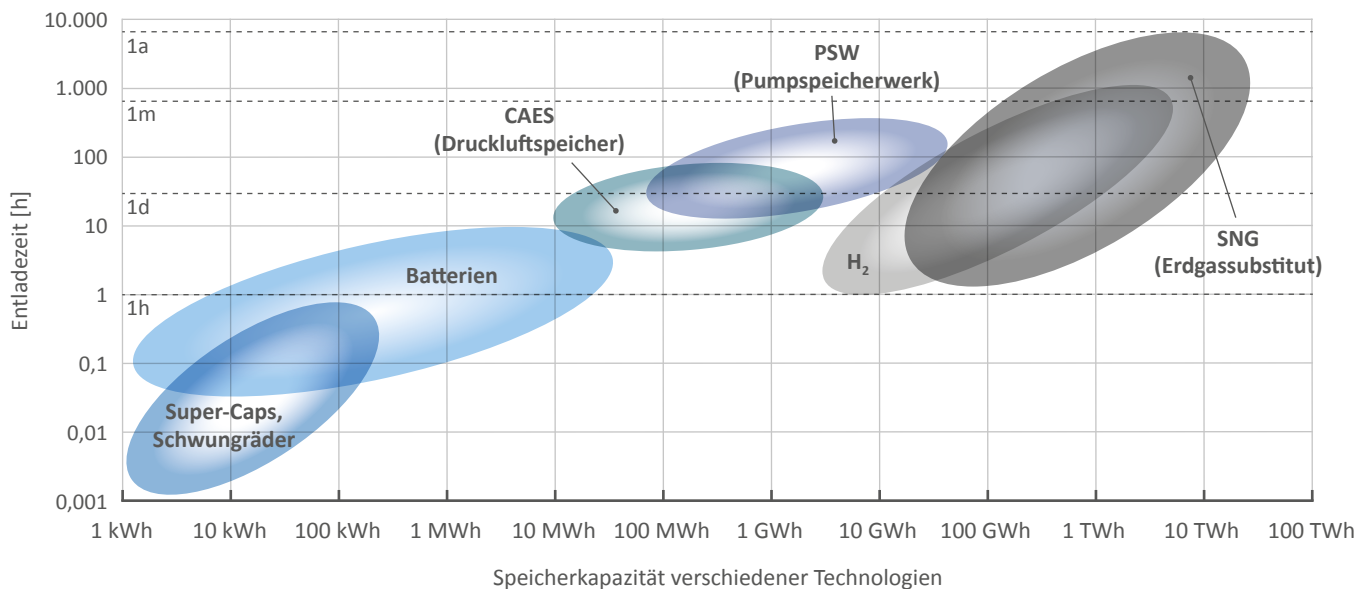
zu können, bedarf es **chemischer Speicher**, wie Wasserstoff oder synthetischem Methan (SNG – Synthetic Natural Gas).¹⁶

Es zeigt sich, dass eine bezahlbare, umweltverträgliche und sichere Energieversorgung gasförmige und/oder flüssige Energieträger erfordert, um die physikalischen Anforderungen der Energiesysteme von Industrienationen mit den Zielen des Klimaschutzes in Einklang zu bringen.¹⁷

Um erneuerbare Energien im Bereich von TWh zwischenzuspeichern und saisonale Flauten überbrücken

► Wasserstoff in Reinform oder als Ausgangsstoff einer weiteren Veredelung wird hierbei eine zentrale Rolle spielen.

Abb. 5: Einordnung verschiedener Energiespeicher nach Entladedauer und Speicherkapazitäten



Quelle: e-Mobil BW (2012, Potentiale)

¹⁶ e-mobil BW (2012, Potentiale); Sterner (2017, Energiespeicher).

¹⁷ BMWi (2020, NWS); FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe); e-mobil BW (2014, Energiewende); Sterner et al. (2017, Energiespeicher).

Die Nationale Wasserstoffstrategie fasst es folgendermaßen zusammen:

- „Wasserstoff ist ein vielfältig einsetzbarer Energieträger. Er kann zum Beispiel in Brennstoffzellen die wasserstoffbasierte Mobilität befördern und zukünftig als Basis für synthetische Kraft- und Brennstoffe genutzt werden.
- Wasserstoff ist ein Energiespeicher, der angebotsorientiert und flexibel erneuerbare Energien speichern und einen Beitrag zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage leisten kann. Das macht Wasserstoff zu einem wichtigen Baustein der Energiewende.
- Wasserstoff ist ein wesentliches Element der Sektorkopplung. In den Bereichen, in denen Strom aus erneuerbaren Energien nicht direkt eingesetzt werden kann, öffnen grüner Wasserstoff und seine Folgeprodukte (Power-to-X) neue Dekarbonisierungspfade.
- Bei verschiedenen chemischen und industriellen Prozessen ist Wasserstoff schon heute unabdingbar. Als Grundstoff wird er zum Beispiel für die Herstellung von **Ammoniak** benötigt. Künftig soll der bereits heute verwendete fossil erzeugte Wasserstoff ersetzt werden.
- Wasserstoff kann darüber hinaus durch die Verwendung als Grundstoff weitere Produktionsprozesse in der Industrie dekarbonisieren, für die nach derzeitigem Stand der Technik keine anderen Dekarbonisierungstechnologien zur Verfügung stehen. So ist für eine treibhausgasneutrale Erzeugung von zum Beispiel **Primärstahl** der Einsatz von Wasserstoff als Ersatz für Steinkohlenkoks derzeit der technologisch vielversprechendste Pfad.
- Bestimmte industrielle CO₂-Quellen, zum Beispiel prozessbedingte Emissionen der Zementindustrie, lassen sich langfristig nur mit Hilfe von Wasserstoff dekarbonisieren. So können abgefangene industrielle CO₂-Emissionen mit Wasserstoff in verwertbare Chemikalien umgewandelt und **neue Wertschöpfungsketten** für die Grundstoffindustrie erschlossen werden.¹⁸

„Die **Sektorenkopplung** oder **Sektorkopplung** verbindet die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und den nicht-energetischen Verbrauch fossiler Rohstoffe (v.a. Chemie) über Energiespeicher und Energiewandler. Damit wird vorwiegend **erneuerbarer Strom** als Primärenergie zur Dekarbonisierung der anderen Sektoren genutzt.“¹⁹

„Aus Wasserstoff können weitere Folgeprodukte hergestellt werden (Ammoniak, Methanol, Methan usw.). Sofern diese Produkte unter der Verwendung von „grünem“ Wasserstoff erzeugt werden, wird im Folgenden übergreifend von **Power-to-X (PtX)** gesprochen. Je nachdem, ob die erzeugten Folgeprodukte in gasförmiger oder flüssiger Form anfallen, spricht man von **Power-to-Gas (PtG)** oder von **Power-to-Liquid (PtL)**.“²⁰

¹⁸ BMWi (2020, NWS); Hervorhebungen durch Verfasser.

¹⁹ Sterner et al. (2017, Energiespeicher).

²⁰ BMWi (2020, NWS).

3 Wasserstoffstrategien in Europa und Deutschland

Wie in Kapitel 2 beschrieben, bestehen die Ziele der Energiewende darin, die Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um 65 % zu senken. Hinzu kommt die Zielsetzung, den Primärenergieverbrauch bis 2050 gegenüber 2008 um 50 % zu senken sowie den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch auf 65 % bzw. am Endenergieverbrauch generell zu erhöhen.²¹ Die nationale Nachhaltigkeitsstrategie gibt hierzu konkrete Zielvorgaben einer Steigerung von 60 % am Endenergieverbrauch und 80 % am Stromverbrauch.²²

Um diese Ziele zu erreichen, ist die Transformation des EE-Stroms in eine **chemische Energieform** unumgänglich; insbesondere, wenn es darum geht, den Anteil der erneuerbaren Energie am Endenergieverbrauch auf 60 % zu erhöhen. Indem Produktion und Verbrauch räumlich und zeitlich entkoppelt werden, kann flexibel auf das fluktuierende Angebot von Wind und Sonne eingegangen und die flächendeckende Verteilung gewährleistet werden.

Dabei sind verschiedene Kriterien für die chemischen Energieträger bzw. für den Brennstoff einzuhalten: Zum einen müssen diese in thermischen Kraftwerken aller Leistungsklassen einsetzbar sein, um auch die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung zu gewährleisten. Zum anderen soll der Heizwärmebedarf zumindest teilweise gedeckt werden können. Insbesondere hohe Temperaturen wie die industrielle Prozesswärme, die durch Solarkollektoren und/oder Geothermie nicht erreicht werden können, sind anzustreben. Auch soll die Möglichkeit zur Kraftstoffnutzung im Verkehrssektor gegeben sein. All diese Kriterien erfüllt Wasserstoff.

Von Nachteil sind die Verluste, die durch die Umwandlung des EE-Stroms in chemische Energieträger, beim Transport und bei der Rückverstromung bzw. thermischen Nutzung auftreten. Sie senken den **Gesamtwirkungsgrad** der Nutzung von EE und erhöhen die Gesamtkosten. Folglich ist in erster Linie die Energie aus Sonne und Wind direkt zu nutzen (Strom, Wärme und Verkehr) und nur bei Überschüssen bzw. innerhalb unabweichlicher Nutzungspfade auf Wasserstoff (synthetisches Methan oder synthetische Kraftstoffe) auszuweichen.

Die vorgenannten Herausforderungen der Transformation und die Anforderungen an eine sichere Energieversorgung vor Augen, haben die EU und Deutschland – neben weiteren Mitgliedstaaten – folgende Strategien und Maßnahmen definiert:

3.1 European Green Deal

Um die Zielsetzung des *Pariser Abkommens* von 2015 zu konkretisieren, hat die *Europäische Kommission* ihr strategisches Ziel, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent auszugestalten, am 11. Dezember 2019 im **European Green Deal** festgelegt.²³

Dabei handelt es sich „um eine neue Wachstumsstrategie, mit der die EU zu einer fairen und wohlhabenden Gesellschaft mit einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft werden soll, in der im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt ist“.²⁴

²¹ BMWi (2021, Energiewende).

²² BReg (2021, Nachhaltigkeitsstrategie).

²³ BReg (2021, Nachhaltigkeitsstrategie).

²⁴ Europäische Kommission (2019, Green Deal).

Die wesentlichen Ziele des Green Deal sind:

- Europa soll bis 2050 der erste treibhausgasneutrale Kontinent sein.
- Die Energieversorgung soll sauber und bezahlbar bleiben.
- Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft wird gefördert.
- Bauen und Wohnen sollen energie- und ressourcenschonend erfolgen.
- Mobilität soll zum einen intelligent, aber v.a. nachhaltig ausgestaltet werden.²⁵

3.2 Fit for 55

Der *Green Deal* wurde im *Europäischen Klimagesetz* in einen rechtsverbindlichen Rahmen gegossen und am 14. Juli 2021 im aktuellen Klimapaket „*Fit for 55*“ anhand von Maßnahmen konkretisiert. In diesem Zuge wurden die Treibhausgasminderungsziele von ursprünglich mindestens 40 % auf 55 % bis 2030 durch die Kommission verschärft und durch den Europäischen Rat bestätigt.

Abb. 6: Der europäische Grüne Deal



Quelle: Europäische Kommission (2019, Green Deal)

²⁵ BReg (2021, Nachhaltigkeitsstrategie).

Die Maßnahmen umfassen einen „Emissionshandel für neue Sektoren und strengere Auflagen im Rahmen des bestehenden Emissionshandelssystems der EU; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien; mehr Energieeffizienz; schnellere Einführung emissionsarmer Verkehrsträger und der entsprechenden Infrastruktur und Kraftstoffe; Angleichung der Steuerpolitik an die Ziele des europäischen Grünen Deals; Maßnahmen zur Prävention der Verlagerung von CO₂-Emissionen; Instrumente zur Erhaltung und Vergrößerung unserer natürlichen CO₂-Senken“.²⁶

Die Vorschläge der Kommission umfassen folgende Maßnahmen, die hier allerdings nur kurz aufgeführt werden sollen:

- Die Revision der Energiebesteuerungs-Richtlinie.
- Die Änderung der Richtlinie 2014/94/EU über Infrastruktur für alternative Kraftstoffe in eine Verordnung.
- Die Verschärfung bzw. Reduzierung der CO₂-Flottengrenzwerte für PKW auf 55 % bis 2030 sowie die Forderung, bis 2035 lediglich emissionsfreie Neuwagen zuzulassen.
- Die Neufassung der Energieeffizienz-Richtlinie, einschließlich der Ausweitung der Renovierungsrate sämtlicher Gebäude des öffentlichen Sektors von 3 %.
- Die Novellierung der *Erneuerbare-Energien-Richtlinie* (Renewable Energy Directive – RED II²⁷) mit dem EU-weiten Ziel, den Anteil der EE bis 2030 auf mindestens 40 % zu steigern und die Treibhausgasintensität des Verkehrssektors bis 2030 um 13 % zu verringern.
- Die Ausweitung des EU-Emissionshandelssystems (EU-EHS) um die Schifffahrt sowie um Kraftstoffe für den Straßenverkehr und Heizöle für den Gebäudesektor bis 2026. Zusätzlich sollen die jährlich ausgegebenen Zertifikate stärker reduziert und kostenlose Emissionszertifikate für den Luftverkehr abgeschafft werden. Die Mehreinnahmen aus der Ausweitung des EU-EHS können u.a. der Förderung des ÖPNV zukommen.
- Die Einführung eines Klimaschutz-Sozialfonds für die Zeit von 2025 bis 2032, um die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen des um Gebäude und Verkehr ausgeweiteten EU-EHS abzufedern.

- Die Einführung eines CO₂-Grenzausgleichssystems (CBAM – carbon border adjustment mechanism), um die Risiken eines unternehmerischen *carbon leakage* als Folge der ambitionierten Zielsetzung der EU gegenüber anderen Regionen zu vermeiden.
- Mehrere Initiativen zur Definition und Normierung von alternativen Kraftstoffen für Schiff- und Luftfahrt, um die Treibhausgasintensität zu reduzieren.

Carbon Leakage bezeichnet eine Situation, die eintreten kann, wenn Unternehmen aufgrund der mit Klimamaßnahmen verbundenen Kosten ihre Produktion in andere Länder mit weniger strengen Emissionsauflagen verlagern. Dies könnte zu einem Anstieg ihrer Gesamtemissionen führen. In bestimmten energieintensiven Branchen kann das Carbon-Leakage-Risiko höher sein.²⁸

3.3 Hydrogen Roadmap Europe

Europas Transformation in Richtung eines dekarbonisierten Energiesystems wurde mit der Unterzeichnung des *Pariser Klimaschutzabkommens* in die Wege geleitet. Diese drastische Transformation hat umfassende Auswirkungen auf die zukünftige Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung von Energie in allen Sektoren. Verkehr, Gebäude und Industrie sind gezwungen, ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf weniger als 770 Mt CO₂/a zu reduzieren.

Mit der *Hydrogen Roadmap* legt die EU einen strategischen Rahmen zur Erreichung der Energiewende fest, da Wasserstoff aus Sicht der EU für eine Dekarbonisierung notwendig ist.

²⁶ Europäische Kommission (2021, Fit Für 55).

²⁷ Europäische Kommission (2018, RED II).

²⁸ Europäische Kommission (2021, Carbon Leakage).

Die EU stützt ihre Überzeugung dabei auf **drei fundamentale Argumente**:

1. Wasserstoff ist die beste (oder einzige) Wahl zur **großindustriellen Dekarbonisierung** für ausgewählte Segmente in den Sektoren Transport, Industrie und Gebäudeenergieversorgung.

- Das europäische Gasnetz versorgt die Industrie und mehr als 40 % der Haushalte mit Wärme und stellt den Energieträger für 15 % der Stromerzeugung bereit. Biogas ist zwar ein wichtiger Hebel, wird aber nicht in dem erforderlichen Umfang verfügbar sein. Obwohl die Wärmepumpe eine elementare Rolle für den Neubau spielt, kann sie im (Alt-)Bestand, welcher für 90 % der gebäudebedingten CO₂-Emissionen verantwortlich ist, nur eingeschränkt eingesetzt werden. Darüber hinaus erhöhen sich durch nachträgliche Integration von Wärmepumpen die ohnehin bestehenden Herausforderungen der Überlastung des Stromnetzes. Wasserstoff – in Kombination mit Brennstoffzellen-KWK-Anlagen – kann als komplementäre Technologie zu Wärmepumpen ins Gasnetz ohne signifikanten Anpassungsbedarf eingespeist werden. Darüber hinaus können Gasnetze auf reinen Wasserstoffbetrieb umgestellt oder synthetisches Methan aus Wasserstoff und CO₂ erzeugt werden. Voraussetzung hierfür ist ein weiterer Ausbau von erneuerbaren Energien. In Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung kann folglich eine nachhaltige Versorgung mit Wärme und Strom auf Basis bestehender Infrastruktur sichergestellt werden.

- Eine ganzheitliche Betrachtung des Verkehrssektors – Nutzfahrzeuge, öffentlicher Personennah- und -fernverkehr, Schifffahrt und Luftfahrt – kommt an einem chemischen Energieträger wie Wasserstoff nicht vorbei. Die Anforderungen an Energiedichte, Ladeleistung, Infrastrukturausbau, Flexibilität, Skalierbarkeit oder Ressourcenverfügbarkeit können batterieelektrisch nicht erfüllt werden. **Da der Transportsektor für ca. 33 % der Treibhausgasemissionen der EU verantwortlich ist, ist dessen Dekarbonisierung ein elementarer Schlüssel zur systemischen Energiewende.** In der Luftfahrt und internationalen Seeschifffahrt sind Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff die einzige großtechnische Option für eine direkte Dekarbonisierung.

- In der Industrie kann Wasserstoff sowohl energetisch zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme als auch stofflich als Ausgangsmaterial oder in Verbindung mit CO₂ zur Produktion von synthetischen gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen verwendet werden. Bereits etablierte Anwendungen von Wasserstoff sind die Ammoniakproduktion oder das Hydrocracking in Raffinerien. Weitere Anwendungen ergeben sich bei der Stahlerzeugung als Reduktionsmittel, um Kohle zu ersetzen. In Kombination mit CO₂ kann Wasserstoff Kohlenwasserstoffe wie Erdgas in chemischen Prozessen wie der Herstellung von Olefinen und Kohlenwasserstofflösungsmitteln (BTX) ersetzen. Positiver Nebeneffekt hierbei ist, dass neben der stofflichen Verwertung der Wasserstoff prozessual als Treibhausgas-Senke fungiert.

Wasserstoff kann durch das **Haber-Bosch-Verfahren** in Form von Ammoniak (NH₃) gespeichert werden. Die **Ammoniakproduktion** hat mehrere Vorteile: Erstens, einen niedrigeren Siedepunkt von -33°C als reiner Wasserstoff und zweitens, eine einfachere Lagerung und Transport. Von Nachteil sind jedoch die Giftigkeit von Ammoniak und die energetischen Wandlungsverluste.

Olefine ist ein in der petrochemischen Industrie verwendeter Oberbegriff für Kohlenwasserstoffe mit einer oder mehreren Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen. Ausgenommen davon sind aromatische Verbindungen.

Hydrocracken (auch **Hydrospalten**) ist ein Verfahren der Petrochemie, um mit Hilfe von Wasserstoff höhermolekulare Kohlenwasserstofffraktionen in Zwischenprodukte zur Herstellung von Motorenbenzin, Kerosin und Dieselmotorenkraftstoff umzuwandeln. Der Prozess wird mit einem wasserstoffreichen Gas unter einem Druck von bis zu 200 bar und bei Temperaturen bis 480°C durchgeführt.

Stoffe, die energetisch, stofflich, als Speicher oder als Reaktant über die Sektoren hinaus verwendet werden können, werden als **Energievektoren** bezeichnet.²⁹

In der Umweltanalytik steht die Kurzform **BTX** für „leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe“. In der Petrochemie werden sie meist mit BTEX oder BTXE abgekürzt. Sie stehen für die aromatischen Kohlenwasserstoffe: Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol.

2. Wasserstoff wird in der globalen Energiewende eine **systemische Rolle** einnehmen, da er als Energievektor erneuerbare Energien über Sektoren hinweg zeitlich und räumlich entkoppelt zur Verfügung stellen kann.

- Die europäische Energiewende erfordert eine nahezu vollständig dekarbonisierte Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien. **Wasserstoff stellt die einzige großmaßstäbliche Energiespeicherform zur bedarfsgerechten Deckung des Endenergieverbrauchs dar.**

- Die zeitliche Diskrepanz zwischen Erzeugung volatiler erneuerbarer Energien und dem Stromverbrauch erfordert saisonale Speicheroptionen. Während Batterie-speicher und Lastmanagement notwendige kurzzeitige Flexibilisierungsoptionen ermöglichen, ist **Wasserstoff** der einzige großtechnische Langzeitenergiespeicher. Er kann im **Gasnetz, Salzkavernen und erschöpften Gasfeldern zur Überbrückung langer Perioden mit verringerter Erzeugung aus erneuerbaren Energien gespeichert werden.**
- **Wasserstoff stellt die Schnittstelle zwischen Regionen mit niedrigen Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien und Verbrauchsschwerpunkten dar.** So können beispielsweise der geothermie- oder windreiche Norden Europas sowie der solarreiche Norden Afrikas mit Zentral-Europa verbunden werden.
- **Wasserstoff kann über große Distanzen gasförmig, flüssig oder in anderen Formen leitungsgebunden oder auf unterschiedlichen bereits etablierten Verkehrsträgern, wie Wasser, Schiene oder Straße transportiert werden.**

3. Wasserstoff trägt positiv zur **Adaption** bei, indem Veränderungen für den Kunden unbemerkt bzw. ohne Komforteinbußen erfolgen.

- Im Verkehrssektor können vergleichbare Reichweiten und Tankgeschwindigkeiten wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren erreicht werden.
- Gasnetzbetreiber können Wasserstoff direkt oder synthetisches Methan auf Basis von grünem Wasserstoff in das bestehende Gasnetz einspeisen, ohne eine Veränderung beim Kunden einzufordern. Eine spätere Umstellung auf 100 % Wasserstoff erfordert zwar die Umrüstung von Geräten und Rohrleitungen, lässt aber die derzeitige Heizungsinfrastruktur in Gebäuden intakt.

²⁹ DLR (2020, Fundament der Energiewende).

3.4 Nationale Wasserstoffstrategie

Mit der im Juni 2020 veröffentlichten *Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS)* wurde von der Bundesregierung der Handlungsrahmen für die künftige Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverwendung von Wasserstoff und damit auch für entsprechende Innovationen und Investitionen abgesteckt. In Anlehnung an die *Hydrogen Roadmap Europe* definiert sie insgesamt 38 Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele, zur Entwicklung neuer Wertschöpfungsketten für die deutsche Wirtschaft und zur Weiterentwicklung der internationalen energiepolitischen Kooperation. Sie hat dabei folgenden Fokus:

Wasserstoff soll gemäß der *Nationalen Wasserstoffstrategie* gegenüber den noch günstigeren fossilen Energieträgern wirtschaftlicher werden, indem der internationale Markthochlauf für Wasserstoffproduktion und -nutzung mit entsprechender Kostendegression verfolgt und gefördert wird. Hierbei soll ein starker Heimatmarkt für die Produktion und Nutzung von Wasserstoff eine Signalwirkung im Ausland haben. Der Fokus soll auf bereits marktnahen Produkten und Dienstleistungen sowie Bereichen liegen, die sich nicht anders dekarbonisieren lassen. Analog zur europäischen Strategie werden in diesem Zusammenhang die Stahl- und Chemieindustrie sowie bestimmte Verkehrssektoren genannt – der Wärmesektor langfristig.

Erzeugungseitig wird das Ziel gefasst, bis 2030 5 GW Elektrolyseleistung zu installieren und 14 TWh Wasserstoff auf Basis von 20 TWh erneuerbaren Energien zu produzieren, ohne in eine Konkurrenz zur direkten Grünstromnutzung zu gelangen. Für den Zeitraum bis 2035 sind weitere 5 GW Elektrolyseleistung vorgesehen. Da jedoch mit einem Bedarf von 90 bis 110 TWh grünem Wasserstoff gerechnet wird, geht die NWS davon aus, dass der überwiegende Teil des Wasserstoffs importiert werden muss. Hierfür sollen **internationale Partnerschaften** in Einklang mit der europäischen Zielsetzung sowie außerhalb Europas ausgebaut werden, um Planungssicherheit zu gewährleisten.

Zur energetischen Nutzung von Wasserstoff führt die NWS aus, dass auch langfristig keine alternativen Elektrifizierungs-

optionen für bestimmte, prozessbedingte Emissionen aus der Industrie, der Seeschifffahrt, der Luftfahrt und in Teilen des Schwerlastverkehrs bestehen werden. Diese, bisher auf fossilen Energieträgern basierenden Anwendungen, sind auf Power-to-X-Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff und nachgelagerten gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen, wie synthetischem Kerosin angewiesen.

Power-to-X bezeichnet verschiedene Technologien zur Speicherung von Stromüberschüssen von variablen erneuerbaren Energiequellen wie Solar-, Wind- und Wasserkraft. Dazu zählen u.a. Wasserstoff, Ammoniak, synthetische Kraftstoffe, aber auch Wärme und Druck. Ebenfalls üblich ist die Bezeichnung **P2X**. Unter P2X werden **Power-to-Gas**, **Power-to-Liquid** und **Power-to-Heat** subsummiert.

Contracts for Difference (Differenzverträge) sind Produkte aus der Finanzwelt, welche dazu dienen, schwankende Preise beispielsweise für Aktien oder Rohstoffe abzusichern und so Investitionsrisiken abzufedern. Die **Carbon Contracts for Difference (CCfD)** werden genutzt, um treibhausgasneutrale Produktionsprozesse zu unterstützen, da diese meist teurer sind als der Einsatz herkömmlicher Technologien. Sie sind somit eine Methode um neue Technologien wettbewerbsfähig zu machen.³⁰

Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff beläuft sich aktuell auf jährlich ca. 55 TWh und basiert zum überwiegenden Teil auf fossilen Energieträgern (siehe Kapitel 4). Gleichzeitig wird mit einem grünen Wasserstoffbedarf von knapp 80 TWh zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie und weiteren 22 TWh zur Umstellung der heimischen Raffinerie- und Ammoniakproduktion in 2050 gerechnet.

³⁰ DIW (2019, Differenzverträge).

Die flächendeckende Verteilung von Wasserstoffimporten sowie der inländischen Produktion kann mit der Nutzung der bestehenden Gasnetzinfrastruktur – einschließlich angeschlossener Gasspeicher – bewerkstelligt werden. Neben der Nutzung an Wasserstoff angepasster Erdgasinfrastruktur gilt es, ebenso dedi-

zierte Wasserstoffnetze auszubauen. Insbesondere der regulatorische Rahmen für diese Transformation muss zeitnah geschaffen werden.

Tab. 1 fasst die wesentlichen Informationen aller 38 Maßnahmen der NWS überblicksartig zusammen.

Tab. 1: Maßnahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie im Überblick

Handlungsfeld	Nr.	Maßnahme
Erzeugung	1	Förderung der grünen Wasserstoff-Produktion mit Fokus auf staatlich induzierte Preisgestaltung durch Reduktion von Steuern, Abgaben und Umlagen auf grünen Wasserstoff bei gleichzeitiger CO ₂ Bepreisung auf konventionelle Verfahren
	2	Schaffung neuer Geschäfts- und Kooperationsmodelle von Elektrolysebetreibern mit Strom- und Gasnetzbetreibern
	3	Innovationspaket Klimaschutz zur Förderung der Umstellung auf Wasserstoff mit Elektrolyseure-Förderung für grünen Wasserstoff in der Industrie
	4	Förderung der Windenergie zur Erzeugung von Strom
Verkehr	5	Umsetzung der <i>EU-Erneuerbare-Energie-Richtlinie</i> (RED II ³¹), um den Einsatz von grünem Wasserstoff bei der Kraftstoffherstellung und als Alternative zu konventionellen Kraftstoffen zu fördern
	6	Fortsetzung der Fördermaßnahmen des <i>Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie</i> (NIP), des <i>HyLAND-Programms</i> und des <i>Energie- und Klimafonds</i> (EKF)
	7	Förderung von Power-to-Liquid-Anlagen aus dem EKF in Höhe von 1,1 Mrd. EUR
	8	Förderung des Aufbaus von Tankinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge, ÖPNV und SPNV aus dem EKF (3,4 Mrd. EUR)
	9	Weiterentwicklung des europäischen Infrastrukturaufbaus zur Erleichterung grenzüberschreitender Verkehre mit Brennstoffzellenantrieb und Novellierung der Richtlinie zum Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
	10	Aufbau der Zulieferindustrie für Brennstoffzellensysteme und deren Komponenten zur großskaligen Brennstoffzellen-Stack-Produktion für Fahrzeuganwendungen; Flankierung durch ein Technologie- und Innovationszentrum für Wasserstofftechnologien sowie durch den Aufbau eines deutschen Brennstoffzellensystem-Anbieters für die Logistik/Intralogistik
	11	Umsetzung der <i>Clean Vehicles Directive</i> ³² zur Förderung von Null-Emissions-Fahrzeugen im kommunalen Verkehr (<i>Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz</i>)
	12	Einsatz für eine CO ₂ -Differenzierung der Lkw- Maut zugunsten klimaschonender Antriebe im Rahmen der Eurovignetten-Richtlinie
	13	Internationale Standardisierung/Harmonisierung von Mobilitätsanwendungen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie (Betankungsstandards, Wasserstoffqualität, Eichung, Kfz-Typengenehmigung, Zulassung von Schiffen etc.)
Industrie	14	Umstellung von konventionellen fossilen Technologien mit prozessbedingten Emissionen auf treibhausgasarme oder treibhausgasneutrale Verfahren in der Industrie (Fokus auf Chemie/Stahl)
	15	Erweiterung der Investitionskostenzuschüsse auf Elektrolyseure von Stahl- und Chemieunternehmen um Betriebskostenzuschüsse im Rahmen von <i>Carbon Contracts for Difference</i>
	16	Nachfrage nach Industrieprodukten, die mittels emissionsarmer Prozesse und der Nutzung von grünem Wasserstoff hergestellt wurden, soll durch Herkunftsnachweise gestärkt werden
	17	Entwicklung langfristiger Dekarbonisierungsstrategien für energieintensive Unternehmen auf Basis von Wasserstoff (Chemie-, Stahl, Logistik- und Luftfahrtbranche)

³¹ Europäische Kommission (2018, RED II).

³² Europäische Kommission (2019, Clean Vehicle Directive).

Handlungsfeld	Nr.	Maßnahme
Wärme	18	Förderung der Anschaffung hocheffizienter Brennstoffzellenheizgeräte in Wohn- und Nichtwohngebäuden über das Anreizprogramm <i>Energieeffizienz</i>
	19	Prüfung der Förderung von <i>H2-readiness</i> -Anlagen im Rahmen des <i>Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes</i>
Infrastruktur/ Versorgung	20	Untersuchung des Gasnetzes auf Aufbau dezidiert Wasserstoff-Infrastruktur und auf <i>H2-readiness</i> des Bestands in Bezug auf Umwidmung und Nachnutzung
	21	Energiewendetaugliche, bedarfsgerechte sowie kosteneffiziente Weiterentwicklung und Verzahnung von Strom-, Wärme- und Gas-Infrastrukturen in Bezug auf Planung, Finanzierung und regulatorischen Rahmen
	22	Bedarfsgerechter Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes für Straßen-, Schienenverkehr und Wasserstraßen
Forschung, Bildung, Innovation	23	Entwicklung einer Wasserstoff-Roadmap gemeinsam mit Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft zur Positionierung Deutschlands als Leitanbieter für grüne Wasserstoff-Technologie am Weltmarkt
	24	Demonstrationsprojekte zu internationalen, idealtypischen Lieferketten von grünem Wasserstoff
	25	Strategische Bündelung der Wasserstoff-Schlüsseltechnologien in neuer ressortübergreifender Forschungs-offensive <i>Wasserstofftechnologien 2030</i>
	26	Identifizierung innovationsfreundlicher Rahmenbedingungen für den Praxiseinsatz von Wasserstoff-Technologien, um Hindernisse im nationalen und europäischen Rechtsrahmen zu identifizieren und den Transfer von der Forschung in die Praxis zu erleichtern
	27	Förderung des Wasserstoff-hybrid-elektrischen Fliegens im Einklang mit dem europäisch vereinbarten Dokuments <i>Flightpath 2050</i>
	28	Null-Emissions-Schiff mit geschlossenen Stoffkreisläufen im Rahmen von <i>Zero-Emission Waterborne Transport</i>
	29	Unterstützung und Weiterentwicklung der beruflichen und wissenschaftlichen Aus- und Weiterbildung im Bereich der Wasserstoff-Technologien zur Qualifizierung von Personal sowie Berufsausbildungsk Kooperationen mit Exportländern
Europäischer Handlungsbedarf	30	Unterstützung der Entwicklung von europäischen Regulierungen, Codes und Standards in den verschiedenen Wasserstoff-Anwendungsbereichen, um Nachhaltigkeitsstandards, anspruchsvolle Qualitätsinfrastruktur, (Herkunfts)-Nachweise für Strom aus erneuerbaren Energien sowie für grünen Wasserstoff und seine Folgeprodukte zu garantieren
	31	<i>Important Project of Common European Interest</i> für den Bereich Wasserstoff-Technologien und -systeme, um gesamte Wertschöpfungs- und Nutzungskette von Wasserstoff (Erzeugung, Transport, Verteilung, Nutzung) abzubilden
	32	Ausarbeitung eines Grünbuchs als Vorbereitung einer EU-Wasserstoff-Strategie sowie Unterstützung bei der Umsetzung der <i>EU-Wasserstoff-Initiativen</i> mit dem Ziel eines Wasserstoff-Binnenmarktes
	33	Gründung einer europäischen Wasserstoffgesellschaft zur Förderung und Erschließung gemeinsamer internationaler Produktionskapazitäten und -infrastrukturen
Internationaler Wasserstoffmarkt/ außen- wirtschaftliche Partnerschaften	34	Integration von Wasserstoff in bestehende Energiepartnerschaften und Aufbau neuer Partnerschaften mit strategischen Export- und Importländern, um nachhaltige Importpotentiale für Energieträger auf Basis von Wasserstoff und Absatzmärkte für deutsche Wasserstoff-Technologien zu erschließen
	35	Intensivierung der Zusammenarbeit mit Partnerländern im Rahmen einer Wasserstoff-Allianz in Abstimmung mit EU-Initiativen, um Kooperationen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette auszubilden und deutschen Unternehmen erleichterten Zugang zu Wasserstoff zu ermöglichen
	36	Verstärkte Zusammenarbeit im Rahmen der multilateralen Zusammenarbeit wie dem <i>International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy</i> , der <i>Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien</i> oder der <i>International Energy Agency</i> zur Identifizierung zukünftiger Lieferbeziehungen von Wasserstoff und Anlagen
	37	Pilotvorhaben in Partnerländern zur Produktion und Vermarktung von grünem Wasserstoff und dessen Folgeprodukten zum Aufbau nachhaltiger Lieferketten
	38	Dialog der Bundesregierung mit aktuellen Exporteuren fossiler Brennstoffe, um Substitution fossiler Brennstoffe durch Wasserstoff zu ermöglichen

Quelle: Hochschule RheinMain, 2021, basierend auf BMWi (2020, NWS)

4 Technologien zur Gewinnung von Wasserstoff

Der Großteil des derzeit produzierten Wasserstoffs stammt aus **fossilen Energieträgern**, primär Erdgas.

Um eine Abschätzung über Nutzen zur Erreichung der Klimaziele treffen zu können, ist eine Differenzierung notwendig. Die Farbe Grün steht im Allgemeinen für nachhaltige Erzeugung, wie beispielsweise in Form von grünem Strom oder grüner Landwirtschaft. Daher wurde die Farbsprache auch für den Wasserstoff übernommen.

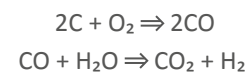
Neben grünem, also nachhaltig erzeugtem Wasserstoff, haben sich noch weitere Farben für andere Herstellungsformen und Ausgangsstoffe etabliert. Die verschiedenen Farben werden meist in Form eines Wasserstoff-Regenbogens als eine vereinfachte Übersicht über die Wasserstofferzeugungsarten dargestellt (Vgl. Abb. 7 auf S. 27). Um die verschiedenen Farben des Wasserstoffs nachvollziehen zu können, ist ein Verständnis der Herstellungsprozesse und -technologien wichtig: Grundsätzlich kann man zwischen **regenerativen** und **konventionellen** Wasserstoff-Erzeugungsmethoden unterscheiden.

Als Primär- bzw. Sekundärenergieträger kommen kurzzeitige Kohlenwasserstoffe (z.B. Methan oder Ethen), Biomasse, Kohle oder auch Strom (Elektrolyse) in Frage. Verfahren zur sekundären Wasserstoff-Erzeugung sind bspw. die Kohlenwasserstoffreformierung von Rohölraffinerien oder die Chlor-Alkali-Elektrolyse zur Gewinnung von Chlor.

4.1 Die Herstellungsverfahren von Wasserstoff

Vergasung

Bei dem Prozess der Vergasung werden flüchtige Bestandteile von organischen oder fossilen Ausgangsstoffen (z.B. Kohle oder Holz) durch Erhitzen unter Sauerstoffabschluss in brennbare Gase überführt. Ein Beispiel aus der Vergangenheit sind die Holzvergaserfahrzeuge aus der Zeit der Wirtschaftskrise oder den Nachkriegszeiten. Die Kohlevergasung zur Koksherstellung war bis 1996 ein wichtiger Erzeuger für das im damaligen Gasnetz verbreitete Stadtgas, einer Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan mit einem Wasserstoffanteil von ca. 51 %. Derzeit wird der Wasserstoff aus der Kohlevergasung zur Koksherstellung als Nebenprodukt gewonnen. Als Ausgangsstoff zur Vergasung kann neben Kohle und Holz auch andere Biomasse verwendet werden. Diese Technologie hat durch ihre lange Verwendung einen Technology-Readiness-Level (TRL) von 10³³ und ist damit ausgereift.



Die Kategorisierung durch das **Technology-Readiness-Level (TRL)** dient zur Abschätzung des Reifegrades einer Technologie. TRL 1-3 fällt in die Grundlagenforschung, 3-7 ist anwendungsnahe Forschung und 7-9 entspricht den vorseriellen Stufen zur Markteinführung. Ein TRL von 10 entspricht in der Folge einem serienreifen Produkt.³⁴

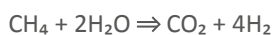
³³ Dawood et al. (2020, Hydrogen Production).

³⁴ BMWi (2018, 7. Energieforschungsprogramm).

Dampfreformierung

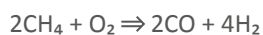
Über die Methode der Dampfreformierung wird derzeit der größte Teil des weltweit verbrauchten Wasserstoffs erzeugt.

Dabei wird aus einem kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoff unter Einsatz von Wärme und Wasserdampf bei hohem Druck Wasserstoff erzeugt. Als Hauptausgangsstoff für die Dampfreformierung wird hauptsächlich Erdgas (Methan, CH₄) verwendet. Anstatt des fossilen Grundstoffs kann auch Biogas genutzt werden. Bei diesem Prozess fällt neben Wasserstoff auch Kohlendioxid als Neben- bzw. Abfallprodukt an. Durch technisch nachgeschaltete Einrichtungen ist es bei diesem Verfahren möglich, das entstehende Kohlendioxid aufzufangen und zu speichern oder als Grundstoff für andere chemische Produkte zu verwenden. Der Prozess der Dampfreformierung wird seit 1920 eingesetzt und ist damit auch eine ausgereifte Technologie mit einem TRL von 10.³⁵



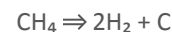
Partielle Oxidation

Bei der partiellen Oxidation werden Erdgas (CH₄) oder andere gasförmige Kohlenwasserstoffe mit einer geringen Menge Sauerstoff (O₂) verbrannt, so dass die Verbrennung nicht vollständig stattfinden kann. Statt zu CO₂ und Wasserdampf zu verbrennen, entsteht bei der partiellen Oxidation ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid (welches herausgefiltert werden kann). Die Reaktion findet bei ca. 1200°C bzw. mit Einsatz eines Katalysators bei Temperaturen von ca. 800°C bis 900°C statt.³⁶ Die partielle Oxidation ist ebenso ausgereift wie die Vergasung oder Dampfreformierung und besitzt ebenfalls einen TRL von 10.



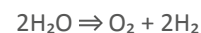
Pyrolyse

Die Pyrolyse ist eine experimentelle Herstellung von Wasserstoff, bei der ein Kohlenwasserstoff (z.B. Erdgas) unter hohen Temperaturen in seine Bestandteile gespalten wird. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 8,7 Mio. EUR geförderten Projekt Methanpyrolyse (Me²H₂), welches bis Ende Mai 2022 angesetzt ist, forscht ein Konsortium um die BASF SE an einem Verfahren, bei dem Methan bei Temperaturen von 1000°C in Wasserstoff und Kohlenstoff aufgespalten wird. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Kohlenstoff in fester Form als Graphit anfällt und daher nicht wie bei Kohlendioxid aufwendig vom erzeugten Wasserstoff abgetrennt werden muss. Das Graphit kann für eine Vielzahl weiterer Anwendungen in der Industrie verwendet werden, wie zum Beispiel als Elektrode im Lichtbogenofen zur Elektrostahlgewinnung, als Festschmierstoff oder als Kohlebürste für elektrische Motoren. Da sich das Projekt noch im Forschungsstadium befindet, wird der Reifegrad der Technologie erst mit einem TRL von 4-5 angegeben.³⁷



Wasserelektrolyse

Bei der Wasserelektrolyse wird ionenfreies Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Als Neben- bzw. Abfallprodukt fallen Sauerstoff und Wärme an, die technisch weiter genutzt werden können. Die Elektrolyse kann mit Strom aus verschiedensten Quellen betrieben werden, wobei sich die Art der Quelle auf die Treibhausbilanz des erzeugten Wasserstoffs auswirkt. Wird der Elektrolyseur mit Strom aus dem deutschen Strommix betrieben, fällt Kohlendioxid an. Bei der Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien wie Wind und Solar zur Wasserstoffherzeugung spricht man von grünem Wasserstoff. Der erzeugte Wasserstoff nimmt im übertragenen Sinn die Farbe der bezogenen elektrischen Energie an. Der physikalische/chemische Vorgang der Wasserstoffherzeugung innerhalb des Elektrolyseurs wird nicht von der Art des Strombezuges beeinflusst.



³⁵ Dawood et al. (2020, Hydrogen Production).

³⁶ Hartmann et al. (2003, Reforming Technologies).

³⁷ Fraunhofer (2019, Roadmap).

Elektrolyseure sind Vorrichtungen, die mit Hilfe von elektrischem Strom eine chemische Reaktion, also eine Stoffumwandlung, herbeiführen.

Der **deutsche Strommix** bestand 2020 zu 51 % aus erneuerbaren Energien, zu 17 % aus Braunkohle, zu 7 % aus Steinkohle, zu 12 % aus Erdgas und zu 13 % aus Kernenergie.³⁸

Derzeit werden drei verschiedene Elektrolyseverfahren verwendet:

- a. PEM-Elektrolyseure (Protonen-Austausch-Membran)
- b. Alkalische Elektrolyseure
- c. Festoxid-Elektrolyseure

Allen Elektrolyseverfahren ist gemein, dass sie zur Produktion von Wasserstoff ionenfreies Wasser benötigen, welches durch geeignete Filtermethoden wie Umkehrosmose oder Ionentauscher erzeugt wird.

PEM steht für **Proton-Exchange-Membrane (Protonen-Austausch-Membran)**. Dies ist eine Membran, welche nur für Wasserstoffatomkerne (also Protonen), nicht aber für Elektronen, Wasser oder Sauerstoff durchlässig ist.

Der *PEM-Elektrolyseur* nutzt eine Membran, die nur für Protonen, also positiv geladene Wasserstoffatomkerne durchlässig ist. Diese Wasserstoffatomkerne rekombinieren sich dann auf der anderen Seite der Membran zu Wasserstoff. Wasser und Sauerstoff bleiben zurück und der so entstandene Wasserstoff besitzt eine hohe Reinheit. Von Vorteil ist, dass PEM-Elektrolyseure schnell auf Lastwechsel reagieren und kurzzeitig bei Überlast betrieben werden können. Dadurch eignen sie sich hervorragend zur Entlastung des Stromnetzes durch Peak-Shaving oder andere Netzdienstleistungen. PEM-Elektrolyseure befinden sich je nach Hersteller und Anwendungsfall bei einem TRL von 6-8.³⁹

Peak Shaving ist eine Methode in der Energiewirtschaft, bei der Leistungsspitzen (Peaks) mittels Energiespeicher gekappt (shaved) und bei Bedarf wieder an das Netz abgegeben werden.

Ein *alkalischer Elektrolyseur* arbeitet auf Grundlage einer Lauge, meist Kaliumhydroxid. Der entstehende Wasserstoff und Sauerstoff werden mit einem Diaphragma getrennt, welches für Gase undurchlässig ist, Ionen und Wasser aber durchlässt. Alkalische Elektrolyseure sind bei Effizienz und Gasreinheit genauso wettbewerbsfähig oder besser als PEM-Elektrolyseure. Ein Betrieb bei hohen Stromdichten ist möglich, wie die Einbeziehung von Spitzenwerten bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Die Technologie ist weit verbreitet und wird schon seit längerem in der großtechnischen Industrie eingesetzt, weswegen sie einem Reifegrad von 9 entspricht.⁴⁰

Festoxid-Elektrolyseure befinden sich noch in einem Forschungs- und Entwicklungsstadium. Die Wasserstoffspaltung wird bei hohen Temperaturen mit Hilfe einer Festoxid-Membran, meist Keramik, durchgeführt. Der technologische Reifegrad liegt bei TRL 4-6.⁴¹

³⁸ Strom Report (2021, Strommix); vgl. dazu auch Abb. 4.

³⁹ Fraunhofer (2019, Roadmap).

⁴⁰ Fraunhofer (2019, Roadmap).

⁴¹ Fraunhofer (2019, Roadmap).

Chlor-Alkali-Elektrolyse

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse wird zur Erzeugung der Grundchemikalien Chlor und Natron- bzw. Kalilauge genutzt. Dabei wird das zu verarbeitende Salz in Wasser gelöst und durch Einsatz von Strom an den Elektroden gespalten. Ausgangsstoff ist hier statt hochreinem Wasser eine Salzlösung. Wasserstoff entsteht bei dieser Methode, welche der alkalischen Elektrolyse gleicht, als Nebenprodukt.

Weitere Methoden im Forschungsstadium

Darüber hinaus gibt es weitere Methoden, die sich in der Forschung und Entwicklung befinden aber eine bislang technisch untergeordnete Relevanz besitzen. Der technologische Reifegrad liegt bei 2-4. Dazu gehören die **thermochemischen (TWS)** sowie **photobiologischen** und **photoelektrochemischen (PEC) Wasserspaltungsverfahren** zur Wasserstoffproduktion:

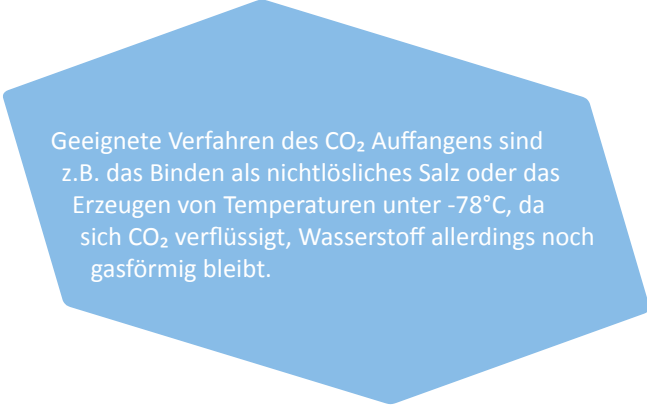
Thermochemical water splitting (TWS) nutzt Hochtemperaturwärme aus Solarenergie oder nuklearer Abwärme, um aus Wasser Wasserstoff zu erzeugen. Dabei ähnelt der Prozess dem der Pyrolyse von Methan, nur dass stattdessen Wasser als Grundstoff verwendet wird. Bei diesem Prozess wird kein CO₂ emittiert. Die *photobiologische Methode* nutzt Mikroben und Sonnenlicht zur Herstellung von Wasserstoff. Der *PEC-Wasserspaltungsprozess* erzeugt Wasserstoff unter Verwendung von speziellen Halbleitern und unter Einbeziehung des Sonnenlichts.⁴²

4.2 Abscheidung, Speicherung und Nutzung von Kohlenstoff

Durch technische Einrichtungen ist es möglich, CO₂ bei der Produktion von Wasserstoff aus kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern wie fossilen Kraftstoffen oder Biomasse abzuscheiden. Dabei wird zwischen der Speicherung und der weiteren Nutzung als Rohstoff unterschieden.

Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage – CCS)

Kohlendioxid, welches bei der Erzeugung von Wasserstoff anfällt, wird durch geeignete Verfahren aufgefangen und im Untergrund gespeichert. Ziel ist die Verringerung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre. Eine Speicherung ist in ausgebeuteten Gas- oder Erdöllagerstätten oder ähnlichen Orten möglich. Ein vollständiges Auffangen des CO₂ ist technisch allerdings nicht möglich, so dass noch immer Restmengen in die Atmosphäre entweichen. Problematisch ist der enorme zusätzliche Energieaufwand für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung. Einen effektiven Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels kann die Speicherung von CO₂ nur leisten, wenn das eingelagerte CO₂ dauerhaft und vollständig in den Speichern verbleibt.⁴³



Geeignete Verfahren des CO₂ Auffangens sind z.B. das Binden als nichtlösliches Salz oder das Erzeugen von Temperaturen unter -78°C, da sich CO₂ verflüssigt, Wasserstoff allerdings noch gasförmig bleibt.

Kohlenstoffabscheidung und -nutzung (Carbon Capture and Utilization – CCU)

Wie bei der CCS wird bei der CCU das entstehende CO₂ oder Kohlenstoff aufgefangen. Doch statt es in Kavernen zu speichern, wird es als Rohstoff für weitere Anwendungen genutzt. So z.B. für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (SNG, *Synthetic Fuels*, *e-fuels*, etc.) oder weiteren Chemikalien. Allerdings wird das so gebundene CO₂ bei einer Verwendung anschließend wieder freigesetzt. Dadurch hat der CCU Prozess einen geringeren Klimaschutzeffekt.

CCS- und CCU-Verfahren zusammen können auch als „CCSU“ bezeichnet werden.⁴⁴

⁴² DLR (2020, Fundament der Energiewende).

⁴³ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

⁴⁴ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

4.3 Die verschiedenen Farben von Wasserstoff

Um die Erzeugungsart des Wasserstoffs und damit seinen Beitrag zum Klimaschutz und der CO₂-Reduktion genauer bestimmen zu können, wird Wasserstoff in Farbklassen eingeteilt. Dabei bezieht sich die Farbe nur auf die **Art der Erzeugung**, nicht auf unterschiedliche Qualitäten oder chemische Eigenschaften des daraus entstehenden Produktes Wasserstoff.

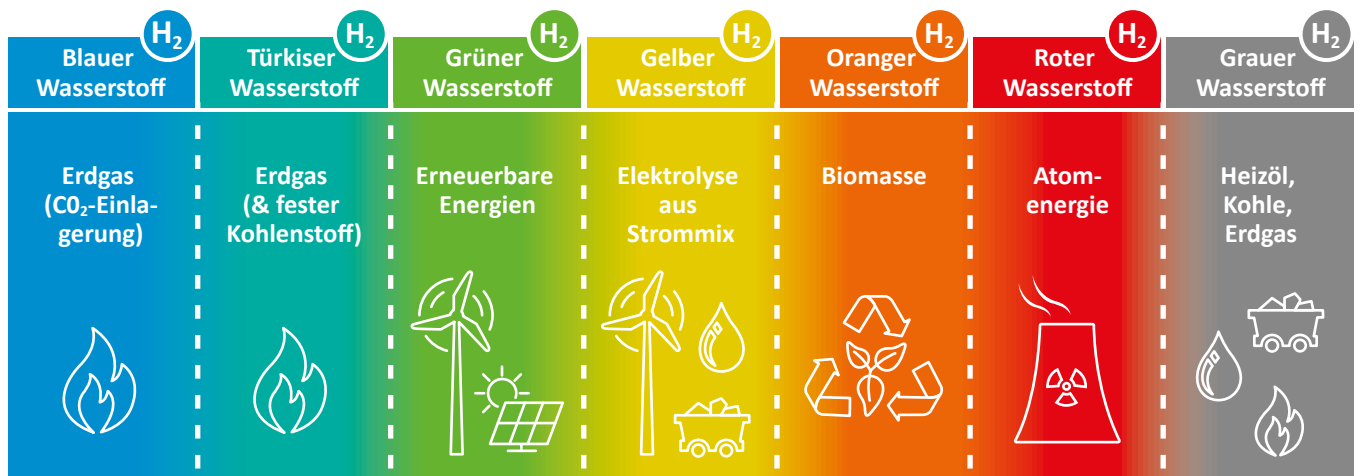
Die Farblehre des Wasserstoffs unterliegt keiner Norm. Die Bedeutung einiger Farben hat sich mit der Zeit verändert. So wurde es durch neue Technologien bzw. feinere Unterscheidungen innerhalb einer Farbe notwendig, weitere Farben zu definieren oder alte Farben neuen Produktionstechniken zuzuweisen.

Blauer Wasserstoff: Das CO₂, welches bei der konventionellen Erzeugung von Wasserstoff wie der Dampfreformierung anfällt, wird gespeichert (CCS) oder weiterverwendet (CCU). Der Wasserstoff wird durch diese Verfahren von seiner ursprünglichen Farbe wie schwarz oder grau in blau umgefärbt.⁴⁵

Dem blauen Wasserstoff wird eine große Rolle bei der Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft zugesprochen, da er laut NWS als CO₂-neutral angesehen wird.⁴⁶

Türkiser Wasserstoff wird durch die Methanpyrolyse bei hohen Temperaturen von 1000°C gewonnen.⁴⁷ Hierbei wird das Methan in seine Bestandteile Wasserstoff und Kohlenstoff aufgespalten, wobei der Kohlenstoff in fester Form als Grafit vorliegt. In dieser festen Form ist er deutlich stabiler und einfacher zu lagern als gasförmiges CO₂, welches eventuell aus Lagerstätten entweichen kann. Daher wird diesem Wasserstoff eine eigene Farbe zwischen grün und blau zugewiesen.

Abb. 7: Der Wasserstoff-Regenbogen



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021

⁴⁵ BMBF (2021, Wissenswertes).

⁴⁶ BMWi (2020, NWS).

⁴⁷ BMBF (2021, Wissenswertes).

Grüner Wasserstoff wird durch Wasserelektrolyse gewonnen, welche ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird.⁴⁸ Es ist eine deutliche Reduktion der Betriebskosten notwendig, um mit der Erzeugung aus fossilen Quellen konkurrieren zu können.⁴⁹ In den letzten Jahren sind die Kosten für Elektrolyseure gesunken und es wird davon ausgegangen, dass die Herstellungskosten noch weiter sinken werden.⁵⁰

Die deutsche Wasserstoffstrategie sieht in dieser Technologie derzeit die einzige Möglichkeit, nachhaltig Wasserstoff herzustellen, wobei durch die Nutzung erneuerbarer Energien wie Wind und Solar die CO₂-Produktion auf null Emissionen reduziert werden kann.⁵¹

Von **gelbem Wasserstoff** wird gesprochen, wenn Wasserstoff durch Wasserelektrolyse mit Strom aus dem deutschen Strommix erzeugt wird, welcher fossile-, regenerative- und Kernenergie in schwankenden Anteilen enthält.⁵²

Von **orangefarbenem Wasserstoff** ist die Rede, wenn dieser aus CO₂-neutralen Stoffen oder Energien gewonnen wird.⁵³ Dazu zählen Verfahren wie die Vergasung von Biomasse, Dampfreformierung von Biogas und Biomethan oder Elektrolyse mit Strom aus biologischen Grundstoffen. Das in der organischen Materie gespeicherte CO₂ wird auf diesem Weg wieder freigesetzt, wobei der CO₂-Fußabdruck geringer ist als bei Wasserstoff aus fossilen Quellen. Doch anders als bei erneuerbaren Energien ist der Grundstoff nicht unbegrenzt, sondern abhängig vom Vorhandensein organischer Materie. Die Biomasse kann aus Abfällen und Reststoffen aus Land- und Forstwirtschaft, Haushalten und Industrie bestehen.

Roter Wasserstoff wird mit Hilfe von Kernenergie gewonnen.⁵⁴ Manchmal wird diesem Wasserstoff auch die Farbe pink zugewiesen.⁵⁵ Kernenergie erzeugt keine Netto-CO₂-Emissionen und gilt als stabile und grundlastsichere Energieversorgung; jedoch ist der Kernbrennstoff selbst keine erneuerbare Quelle, muss wie fossile Energieträger abgebaut und verarbeitet werden, was mit CO₂ Emissionen einhergeht.⁵⁶ Auch der CO₂-Fußabdruck der Stilllegung von Kernkraftwerken und die atomaren Abfälle sind schwer abzuschätzen. Zudem ist noch immer keine überzeugende Lösung für die langfristige Lagerung von ausgebranntem Brennmaterial gefunden.⁵⁷

Brauner Wasserstoff wird durch die Vergasung von Braunkohle gewonnen⁵⁸ und **grauer Wasserstoff** aus der Dampfreformierung von Erdgas.⁵⁹

Schwarzer Wasserstoff wird durch die Vergasung von Steinkohle gewonnen.⁶⁰ Sofern ausschließlich Strom aus der Nutzung von Steinkohle oder Öl verwendet wird, kann auch bei Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse von schwarzem Wasserstoff gesprochen werden. Diese Bezeichnung ist allerdings eher ungewöhnlich.

Diese Ausführungen zeigen: Wasserstoff ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer erneuerbaren und CO₂-freien Wirtschaft. Allerdings wird Wasserstoff derzeit nur in einem geringen Umfang regenerativ und nachhaltig erzeugt. Das liegt zum einen daran, dass andere Erzeugungsarten etabliert und damit günstig sind, zum anderen auch daran, dass notwendige regenerative Kapazitäten noch nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind.

⁴⁸ BMBF (2021, Wissenswertes).

⁴⁹ IKEM (2020, Farbenlehre).

⁵⁰ IRENA (2020, Cost Reduction).

⁵¹ BMWi (2020, NWS).

⁵² BMWi (2020, NWS).

⁵³ Fraunhofer (2019, Roadmap).

⁵⁴ DIN (2021, Wasserstoff).

⁵⁵ EnergyCities (2020, 50 Shades of Hydrogen).

⁵⁶ Öko-Institut (2007, Treibhausgasemissionen).

⁵⁷ IKEM (2020, Farbenlehre).

⁵⁸ IKEM (2020, Farbenlehre).

⁵⁹ DIN (2021, Wasserstoff).

⁶⁰ IKEM (2020, Farbenlehre).

Beim Übergang zur grünen Wasserstoffwirtschaft nimmt der **blaue Wasserstoff** eine wichtige Rolle ein. Durch das Auffangen der Treibhausgase ist er nämlich CO₂-neutral. Nur leider ist er aufgrund der fossilen Grundstoffe nicht nachhaltig genug. Bis grüne Technologien und Kapazitäten den Wasserstoffbedarf decken können, ist insofern eine Kombination notwendig. Hier kommen die Techniken von blauem und – sobald die Technologie ausgereift ist – auch türkisem Wasserstoff in Frage, um die Klimaziele schnellstmöglich zu erreichen. Auf lange Sicht bietet jedoch allein **grüner Wasserstoff** die einzige Technologie, um nachhaltigen Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien zu erzeugen.

- Konkret bedeutet das: Grüner Wasserstoff ist das mittel- bis langfristige Ziel.

5 Aufbereitung und Distribution von Wasserstoff

Die nachhaltige Produktion von Wasserstoff wird durch das Konzept Power-to-Gas (PtG) gewährleistet. Es sieht vor, Energieüberschüsse bei geringer Stromnachfrage auf dem Markt zur elektrolytischen Spaltung von Wasser zu nutzen.

Wird der Elektrolyse eine Methanisierung nachgeschaltet, kann unter Zugabe von CO₂ im sogenannten *Sabatier-Prozess* synthetisches Erdgas, also Methan, erzeugt werden. Kritische Faktoren sind v.a. die Minderung des Wirkungsgrades durch die zusätzliche Konversion und die Notwendigkeit von nachhaltigen CO₂-Quellen. Potentielle CO₂-Quellen sind die Atmosphäre, die Industrie (chemische- oder Zementindustrie) sowie Biogasanlagen mit Gasaufbereitung und Einspeisepunkt ins Erdgasnetz.

Die **Methanisierung** ist eine chemische Reaktion, bei der Wasserstoff und Kohlendioxid in Methan umgewandelt werden. Die Reaktion wird auch als **Sabatier-Prozess** bezeichnet.

Der Vorteil der Methanisierung liegt in der bereits flächendeckend bestehenden Gasinfrastruktur, durch welche die Verteilung gewährleistet wird. Darüber hinaus stellt das Gasnetz das einzige Langzeitspeicherkonzept mit Speicherkapazitäten im TWh-Bereich dar.

5.1 Die Aufbereitung von Wasserstoff

Wasserstoff weist unter Normbedingungen eine **geringe volumetrische Energiedichte** auf, was eine der zentralen Herausforderung der Wasserstoffwirtschaft ist. Eine Komprimierung des Wasserstoffs und anschließende Speicherung bzw. Lagerung in Druckgasbehältern ermöglicht eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte, wobei der Energieverbrauch für die Komprimierung den systemischen Wirkungsgrad der Wasserstoff-Wertschöpfungskette mindert.

Je nach Temperatur und Druckbereich ergeben sich unterschiedliche Aggregatzustände mit verschiedenen Wasserstoffdichten. Bei einer Temperatur von 0 °C liegt es gasförmig vor und weist eine Dichte von 0,089886 kg/m³ auf. Das Kühlen des Wasserstoffs auf -253 °C führt zur Verflüssigung, was mit einem Anstieg der Dichte auf 70,8 kg/m³ einhergeht.

Derzeitige Druckwasserstoffspeicher bestehen aus Stahl und/oder Kompositwerkstoffen und sind von zylindrischer Form. Das gilt für Nieder- als auch Hochdruckspeicher. Aufsteigend von Typ 1 bis Typ 4 Tanks sinkt das Systemgewicht und der Betriebsdruck steigt, während sich die Komplexität der Fertigung und damit die spezifischen Kosten erhöhen. Bei Typ-I-Behältern handelt es sich um (Industrie-) Gasflaschen, die aus Stahl bestehen und somit ein sehr hohes Gewicht, aber gleichzeitig eine hohe Sicherheit und Festigkeit aufweisen. Die Drücke variieren zwischen 200 und 300 bar. Für Typ-II-Behälter wird der zylindrische Teil mittels gewickelten Kohlefasern verstärkt. Dadurch besitzen sie ein geringeres Systemgewicht. Typ-III- sowie Typ-IV-Behälter sind vollständig mit einem hochfesten Faserverbundwerkstoff umhüllt, unterscheiden sich aber in Bezug auf das verwendete Material. Typ-III-Behältern liegt ein metallischer Liner (Absperr-

Tab. 2: Wasserstoff-Druckspeicher-Typen

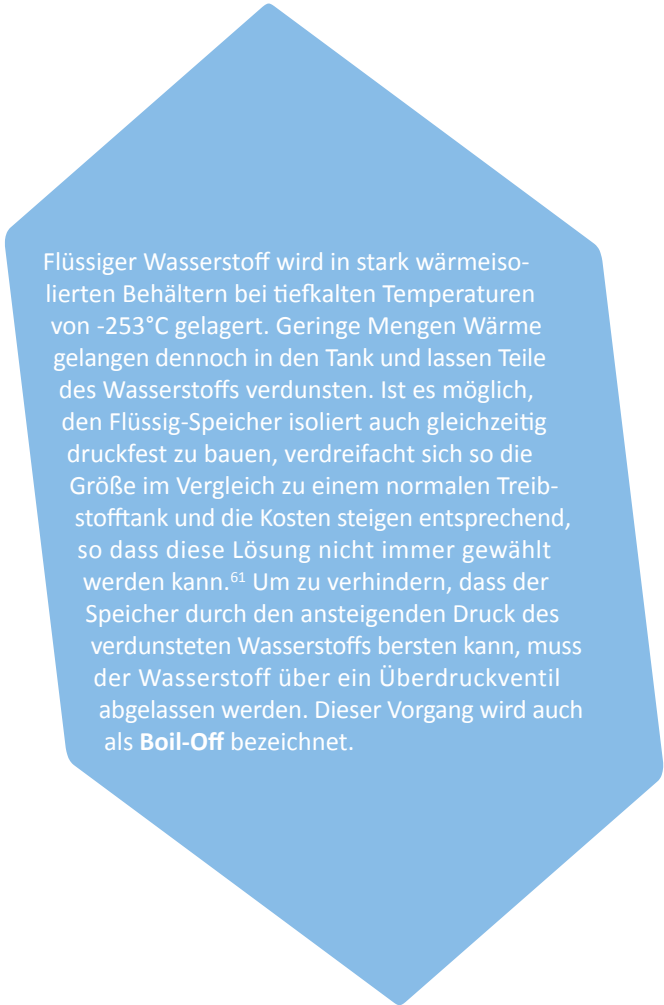
Typ I	Metalldruckbehälter
Typ II	Metalldruckbehälter mit Verstärkung durch Faserwicklung in Umfangsrichtung
Typ III	Metalldruckbehälter mit Verstärkung durch Faserwicklung in Umfangsrichtung und Längsrichtung
Typ IV	Kunststoff-Innenbehälter mit Verstärkung durch Faserwicklung in Umfangsrichtung und Längsrichtung

Quelle: Hochschule RheinMain, 2021

schicht zur Permeationsvermeidung) zugrunde, während Typ-IV-Tanks einen Kunststoffliner verwenden. Gegenüber herkömmlichen Stahlbehältern wird durch Typ IV eine Gewichtsreduzierung von knapp 70 % ermöglicht.

Eine gesteigerte Speicherdichte mit erheblich reduziertem Druck ermöglicht die Speicherung von verflüssigtem Wasserstoff (-253 °C). Eine der Herausforderungen ist das langsame Verdampfen des Inhalts durch äußere Wärmeeinflüsse und einem damit verbundenen Druckanstieg. Zum sogenannten *Boil-off* kommt es, wenn über einen längeren Zeitraum keine Entnahme erfolgt. Zu einer Verzögerung dieses Effekts werden vakuumisolierte Behälter, eine komplexe aktive Kühlung oder eine Kombination von Flüssig- sowie Druckgasspeichern eingesetzt. Ebenfalls möglich ist eine direkte energetische Nutzung des abdampfenden Gases mit einer Brennstoffzelle oder Speicherung zur späteren Verwendung.

Wasserstoff kann aber auch mit Hilfe von unterschiedlichen **Wasserstoffträgern** gespeichert werden. Dies können feste oder flüssige Substanzen sein, an denen große Wasserstoffmengen an- bzw. eingelagert werden können. Neben der volumetrischen und gravimetrischen Speicherdichte unterscheiden sie sich in ihren technischen Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur) z.T. sehr stark. Darüber hinaus spielen Aspekte der Zyklenfestigkeit, der Brennbarkeit, Umweltverträglichkeit und Toxizität hierbei eine wesentliche Rolle.



Flüssiger Wasserstoff wird in stark wärmeisolierten Behältern bei tiefkalten Temperaturen von -253°C gelagert. Geringe Mengen Wärme gelangen dennoch in den Tank und lassen Teile des Wasserstoffs verdunsten. Ist es möglich, den Flüssig-Speicher isoliert auch gleichzeitig druckfest zu bauen, verdreifacht sich so die Größe im Vergleich zu einem normalen Treibstofftank und die Kosten steigen entsprechend, so dass diese Lösung nicht immer gewählt werden kann.⁶¹ Um zu verhindern, dass der Speicher durch den ansteigenden Druck des verdunsteten Wasserstoffs bersten kann, muss der Wasserstoff über ein Überdruckventil abgelassen werden. Dieser Vorgang wird auch als **Boil-Off** bezeichnet.

⁶¹ El-Eskandarany (2020, Storage Materials).

Die chemische Einbindung in flüssige Wasserstoffträger erscheint aufgrund des internationalen Wasserstoffbedarfs zunehmend interessant. In Abgrenzung zum Flüssigwasserstoff wird der Wasserstoff hierbei in chemisch gebundener Form transportiert.

Am interessantesten sind aktuell die Wasserstoffträger Ammoniak (NH_3), Methanol (CH_3OH) und organische Materialien – die sogenannten LOHCs (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*). In Verbindung mit Stickstoff wird Wasserstoff im Rahmen des industriellen *Haber-Bosch-Verfahrens* zu Ammoniak synthetisiert und bei ca. -30°C verflüssigt, um transportiert zu werden. Methanol ist ein einfacher, sehr giftiger Alkohol, der unter Standardbedingungen als farblose Flüssigkeit vorliegt. Herausfordernd ist die sehr gute Löslichkeit mit Wasser. Seine Energiedichte beträgt $22,7 \text{ MJ/kg}$, knapp die Hälfte von Benzin. Bei LOHC wird Wasserstoff in einer reversiblen, exothermen, katalytischen Hydrierreaktion an ein aromatisches Trägerfluid gebunden. Hierbei wird Wärme frei. Die Ausspeisung erfolgt umgekehrt in einer endothermen Dehydrierungsreaktion und es wird Wärme benötigt. Oftmals wird Dibenzyltoluol verwendet, was bereits industriell als Wärmeträgeröl Anwendung findet.⁶²

Das **Haber-Bosch-Verfahren** ist ein großindustrielles chemisches Verfahren zur Herstellung von Ammoniak, entwickelt von den deutschen Chemikern Fritz Haber und Carl Bosch. Dabei wird Ammoniak aus atmosphärischem Stickstoff und Wasserstoff an einem Katalysator bei Drücken von ca. 150 bis 350 bar und Temperaturen von ca. 400 bis 500°C synthetisiert.⁶³

Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), auf Deutsch flüssige organische Wasserstoffträger, sind organische Verbindungen, welche Wasserstoff durch chemische Reaktion aufnehmen und wieder abgeben können. Der Vorgang der Wasserstoffaufnahme in das LOHC wird als Hydrierreaktion bezeichnet.

5.2 Die Distribution von Wasserstoff

Wasserstoff wird aktuell in reiner Form transportiert, kann aber auch in Kombination bzw. gebunden an andere Materialien transportiert werden. So etwa durch das Beimischen von Erdgas oder chemisch gebunden in LOHC. Großtechnisch dominieren heute hauptsächlich die physikalischen Transportoptionen unter Druck, gefolgt vom Transport in verflüssigter Form.

Transport von gasförmigem Wasserstoff

Gasförmiger Wasserstoff kann in komprimierter Form in Druckgasbehältern gespeichert und via Trailer transportiert werden. Diese physikalische Speicher-methode ist weit entwickelt und wird am häufigsten angewendet.

Bei der Wasserstofferzeugung, dem Transport und der Zwischenlagerung wird mit unterschiedlichen Druckniveaus gearbeitet. Auch der Transport erfolgt je nach Trailer auf verschiedenen Druckniveaus. Es kommen heute vor allem 200 bar, vereinzelt 300 bar oder 500 bar Trailer zum Einsatz. Generell gilt: Je höher der Druck, desto mehr Wasserstoff kann pro Gefäß transportiert werden. So können je nach Trailer-Modell heute von 400 kg bis zu etwa 1000 kg transportiert werden.⁶⁴

⁶² Sterner (2017, Energiespeicher).

⁶³ Mittasch (1951, Ammoniaksynthese).

⁶⁴ FCH 2 JU (2017, ReFuelling).

Der Transport von komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff erfolgt in verschiedenen Bauformen von Trailern. Der Wasserstoff kann in kleinen bis mittleren Mengen in Druckgasbehälter gefüllt und straßengebunden per Lkw transportiert werden. Es können dabei sogenannte *Tube Trailer* oder *Container Trailer* genutzt werden. Die in Bündeln zusammengefassten zylindrischen Gasflaschen werden in einem Schutzrahmen zusammengefasst und so kompakt transportiert. Es werden entweder Tubes aus Stahl oder den leichteren Composite-Speichern eingesetzt, die das Eigengewicht der Trailer deutlich verringern können.

Für kurze Distanzen und kleine Wasserstoffmengen sind Trailer für komprimierten gasförmigen Wasserstoff (*GH₂-Trailer*) die aktuell etablierte Transportvariante.⁶⁵

Transport von flüssigem Wasserstoff

Neben der gasförmigen Speicherung kann Wasserstoff bei -253 °C verflüssigt und mit einem Trailer für tiefkalten, verflüssigten Wasserstoff (*LH₂-Trailer*) transportiert werden. Ein großer Vorteil liegt hierbei in der höheren Energiedichte verglichen mit komprimiertem Wasserstoff.

Durch die Verflüssigung können in einem Trailer rund 3.500 kg Wasserstoff transportiert werden. Die Verflüssigung verbraucht in etwa ein Drittel des Energiegehaltes des Wasserstoffes.⁶⁶

Pipeline

Mit steigender Wasserstoffnachfrage wird der leitungsgebundene Transport über Pipelines zunehmend relevant.

Dabei besteht die Möglichkeit, Wasserstoff anteilig in das bestehende Erdgasnetz einzuspeisen (sogenanntes *blending*), und zwar chemisch vollständig gebunden via Methanisierung. Nicht mehr benötigte Netzabschnitte (z.B. L-Gas) können auf Wasserstoff umgestellt oder ein dezidiertes Wasserstoffpipelinennetz aufgebaut werden. Die Beimischung zum Erdgas wird bereits in mehreren Projekten praktiziert, um Auswirkungen auf Infrastrukturbestandteile sowie Endkunden zu analysieren.

Hervorzuheben ist die Demonstrationsanlage der *Thüga Gruppe*, welche 2014 erstmalig Strom in Wasserstoff umgewandelt und in das kommunale Erdgasnetz eingespeist hat.⁶⁷ Die bis 2019 größte Power-to-Gas-Anlage auf PEM-Basis mit Gasnetzeinspeisung ist der *Energiepark Mainz*.⁶⁸ Besonderes Interesse besteht hinsichtlich des Aufbaus eines eigenen Pipelinennetzes, v.a. für große industrielle Abnehmer.⁶⁹

In Deutschland gibt es zwei verschiedene Erdgasarten: L-Gas und H-Gas. **L-Gas (Low calorific gas)** hat einen geringeren Methangehalt und damit auch einen geringeren Brennwert als **H-Gas (High calorific gas)**. Im Zuge der Gasmarktumstellung wird L-Gas zukünftig sukzessive aus dem Markt genommen.

Abbildung 8 fasst die Wertschöpfungsstufen der Erzeugung, Aufbereitung sowie Distribution von Wasserstoff zusammen. Darüber hinaus gibt sie einen Einblick in die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff, die im nachfolgenden Kapitel punktuell vertieft werden sollen.

⁶⁵ Ochoa Robles et al. (2018, Supply Chain Design).

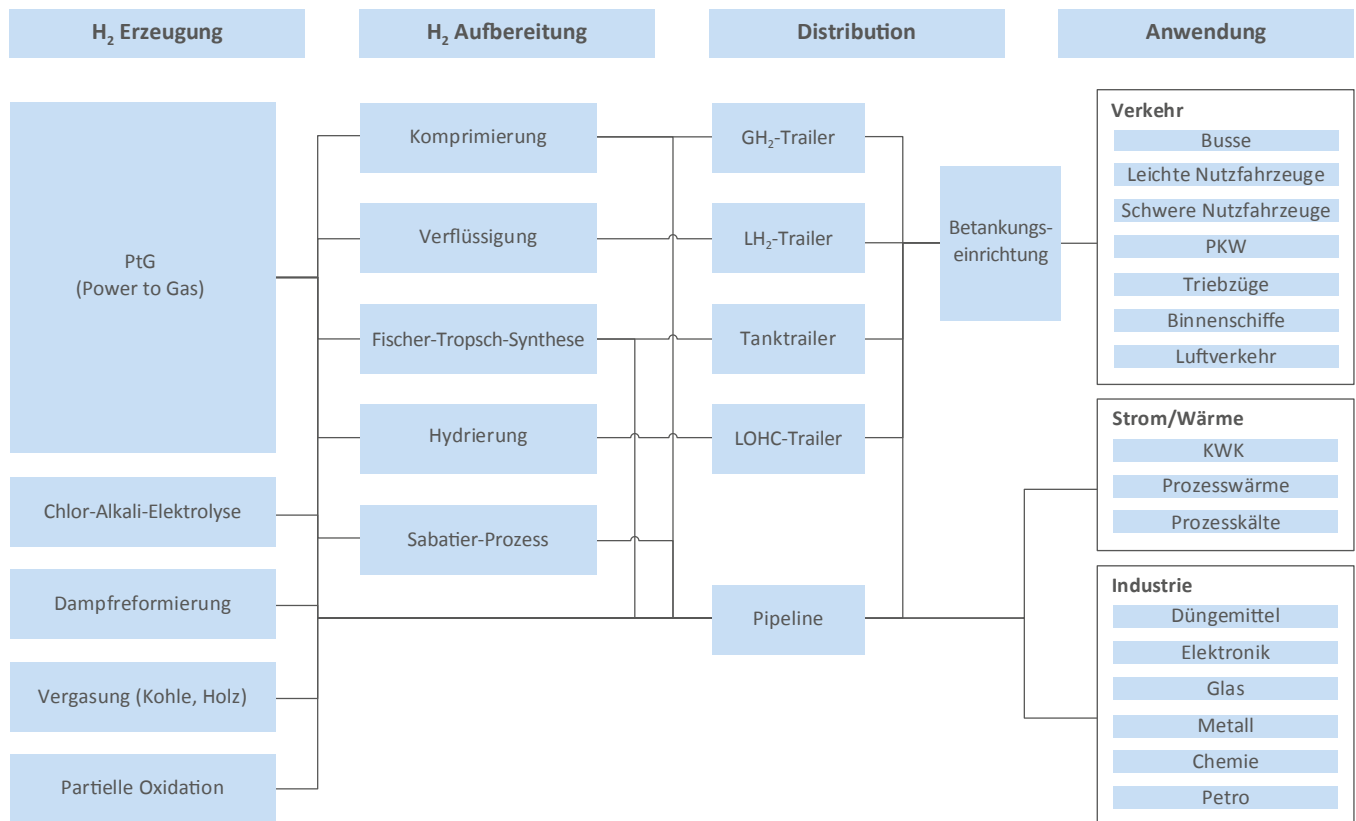
⁶⁶ Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft).

⁶⁷ Thüga (2017, Strom zu Gas).

⁶⁸ Energiepark Mainz (2021, Wind zu Gas).

⁶⁹ ENTSOG AISBL (2021, Transport and Store).

Abb. 8: Erzeugung, Aufbereitung, Distribution und Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021

6 Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff

Die Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff sind sehr vielfältig. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung.



Mit Hilfe des Wasserstoffs lassen sich Industrieprozesse dekarbonisieren, die aktuell mittels Erdgas-Verbrennung angetrieben werden und sich nicht durch Elektrifizierung mit EE-Strom umstellen lassen. Außerdem lassen sich mit Wasserstoff die geforderten CO₂-Emissionseinsparungen auch im Gebäudesektor realisieren.

Ostermann (2021, Hydrogen)



Die **stoffliche Nutzung** umfasst alle Nutzungsformen, die Wasserstoff als Ausgangs- oder Hilfsstoff verwenden. Die Zugabe von Wasserstoff ermöglicht eine Weiterverarbei-

tung bzw. eine Veredelung anderer Stoffe. Hierbei handelt es sich meist um katalytisch oder thermodynamisch induzierte Prozesse.

Die **energetische Verwendung** von Wasserstoff zielt auf die Konversion der chemisch gebundenen Energie in thermische oder elektrische Energie ab. Je nach Umwandlungstechnologie werden die Nutzenergien Licht, Wärme oder Kraft erzeugt.⁷⁰ Im Folgenden werden diverse Anwendungsmöglichkeiten aufgeführt und erläutert.

6.1 Stoffliche Nutzung

Trotz zahlreicher Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Energiesektoren wird Wasserstoff aktuell hauptsächlich stofflich genutzt.⁷¹

Tabelle 3 bildet nicht-energetische Anwendungen ab – sortiert nach Industriezweigen. Ihren Bedarf decken diese Anlagen durch on-site Produktion per Dampfreformierung (SMR) oder per Pipeline, wogegen kleinere Anlagen ihren Wasserstoff über LKW-Trailer oder kleinere on-site SMR bereitgestellt bekommen.⁷²

Tab. 3: Stoffliche Anwendungen von Wasserstoff

Industrie	Anwendung
Rohöl	<ul style="list-style-type: none"> Hydrotreating: Entfernung von Schwefel und anderen Verunreinigungen Hydrocracking: Umwandlung von höhermolekularen Kohlenwasserstoffketten in kurzkettige Kohlenwasserstoffe zur Herstellung von Benzin, Kerosin und Diesel
Chemie	<ul style="list-style-type: none"> Ammoniaksynthese zur Düngemittelherstellung (Haber-Bosch-Verfahren) Fischer-Tropsch-Verfahren Methanolherstellung Analytische Chemie Lebensmittelchemie (z.B. Fetthärtung) Wasseraufbereitung

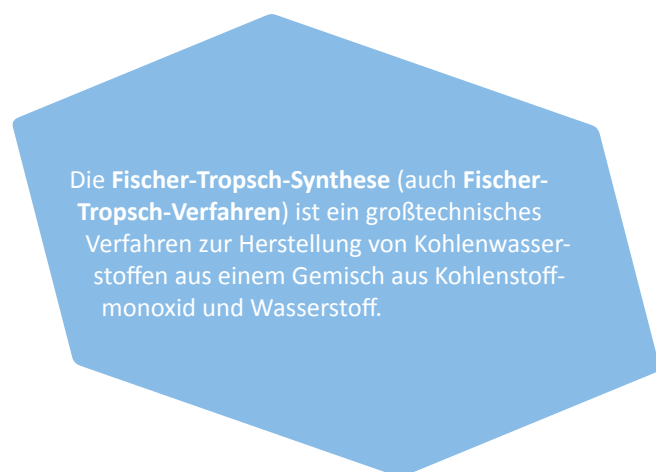
⁷⁰ Lehmann et al. (2014, H₂ und BZ).

⁷¹ Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

⁷² FCH 2 JU (2017, Roadmap Europe).

Industrie	Anwendung
Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> • Herstellung von Nylon, Polyester, Polyurethanen, Polyolefinen • <i>Cracking</i> von gebrauchten Kunststoffen zur Herstellung von einfacheren Molekülen, welche zu neuen Polymeren recycelt werden können
Metall	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion und Behandlung von Metallen, u.a. Eisen, Magnesium, Molybdän, Nickel und Wolfram • Schweißen und Schneiden
Elektronik	<ul style="list-style-type: none"> • Kristallwachstum von Polysilizium • Herstellung von Vakuumschläuchen und Glühbirnen • Löten
Glas	<ul style="list-style-type: none"> • Hochtemperatur-Schneidbrenner • Reduktive Atmosphäre (Schutzgas) für den <i>Flachglas</i>-Prozess • Wärmebehandlung von Glasfasern
Energietechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlmittel für Generatoren und Motoren • Kernbrennstoffverarbeitung

Quelle: Hochschule RheinMain, 2021, basierend auf Ball (2009, Economy); Kell et al. (2012, Fahrzeugtechnik)



2019 wurden weltweit 3899,6 TWh Wasserstoff produziert. In Europa sind 339 TWh verwendet worden (vgl. Abb. 9). Größter Verbraucher war die Raffinerie mit 153 TWh, gefolgt von der Ammoniaksynthese mit 129 TWh und der Methanolherstellung mit 27 TWh (vgl. Abb. 9).⁷³

Die bedeutendsten Verbrauchszweige sind die Mineralöl- und die Düngemittelindustrie in Form von Raffinerie und Ammoniaksynthese. Zusammen verbrauchen sie ca. 80 % des in Europa genutzten Wasserstoffs.

Zu den sonstigen Verbrauchern zählen im Wesentlichen industrielle Anwendungen, darunter die Metallverarbeitung, die Flachglas-Herstellung, die Elektronikindustrie sowie die Energietechnik.

Die relevantesten Verbrauchspfade von Wasserstoff werden im Folgenden genauer beschrieben:

Ammoniakherstellung

Ammoniak (NH₃) ist ein bedeutsamer Grundstoff in der chemischen Industrie, insbesondere für die Herstellung von Düngemitteln. Die Nachfrage ist durch den gestiegenen Wohlstand in den letzten 60 Jahren gestiegen.⁷⁴ Über das sogenannte *Haber-Bosch-Verfahren* wird molekularer Stickstoff unter Zugabe von Wasserstoff in Ammoniak umgewandelt.

Der Wasserstoff wird in der Regel durch die Erdgas-Dampfreformierung bereitgestellt. Ammoniakproduktionen befinden sich häufig neben Cracking- bzw. Dampfreformierungsanlagen, um weite Transportstrecken zu vermeiden und inhärente Verluste sowie Kosten möglichst gering zu halten. Die Zulieferung erfolgt über Pipelines. Das produzierte Ammoniak wird zu 90 % zu Düngemittel weiterverarbeitet. Zu diesem Zweck wird es in feste Düngesalze oder in Salpetersäure (HNO₃) sowie deren Nitrate überführt.⁷⁵ Ammoniak wird auch als Kühlmittel in Kälteanlagen eingesetzt.⁷⁶

⁷³ statista (2019, Verwendungszweck).

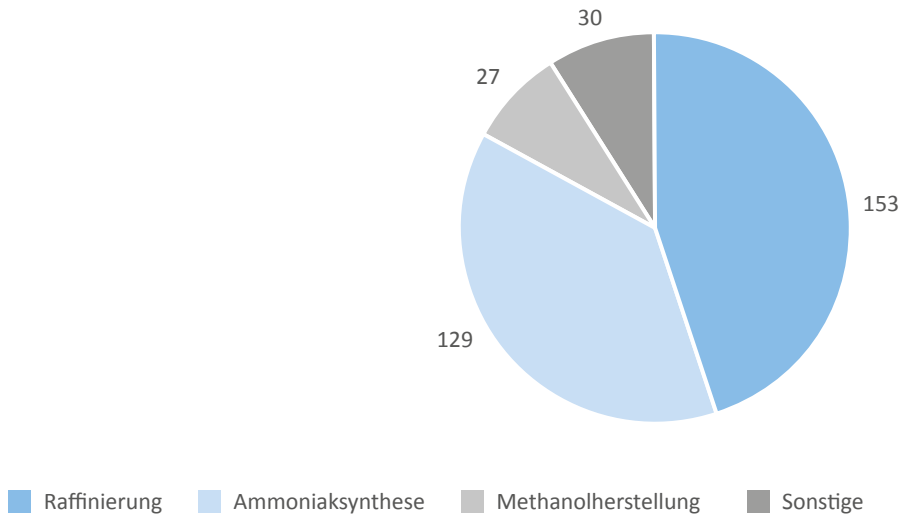
⁷⁴ Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

⁷⁵ Mortimer et al. (2010, Basiswissen).

⁷⁶ Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft).

Abb. 9: Europäischer Verbrauch von Wasserstoff

Verwendung von Wasserstoff in Europa 2019 [TWh]



Quelle: Hochschule RheinMain, 2021, basierend auf statista (2019, Verwendungszweck)

Petrochemische Industrie

Analog zur steigenden Ammoniakproduktion entwickelt sich der Wasserstoffbedarf in Raffinerien. Hauptverantwortlich sind die strengeren Umweltauflagen, die zum einen – insbesondere in Schwellenländern – für eine stärkere Abtrennung von Schwefel und Stickstoff, und zum anderen für den vermehrten Einsatz von Schwerölen mit höherem Kohlenstoffanteil sorgen.⁷⁷ Die petrochemische Industrie nutzt Wasserstoff überwiegend zur Veredelung und Aufwertung von Rohöl. Repräsentativ sind die Prozesse Hydrocracking sowie Hydrotreating.

Methanol

Methanol gilt als wichtiger Ausgangsstoff für Synthesen in der chemischen Industrie, z.B. für die Synthese von Essigsäure (CH_3COOH) oder Formaldehyd (CH_2O). Außerdem kann es als Kraftstoff vielseitig eingesetzt werden. Darüber hinaus könnte Methanol, ebenso wie Methan, eine wichtige Rolle bei der Energiespeicherung einnehmen.⁷⁹

Hydrocracking beschreibt ein Verfahren, bei dem innerhalb eines *Crackers* aus Schwerölen leichtere Öle gebildet werden. Bei erhöhten Temperaturen und Addition von Wasserstoff werden aus langkettigen Kohlenwasserstoffen kurzkettige Kohlenwasserstoffe gewonnen. Durch diesen Prozess erhöht sich das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff. Das Rohöl wird zu Diesel, Benzin oder Kerosin umgesetzt.

Beim **Hydrotreating** werden die nach der Destillation noch schwefelhaltigen Ölprodukte entschwefelt, indem sie zusammen mit Wasserstoff und unter Beteiligung eines Katalysators erhitzt werden und Schwefelwasserstoff erzeugen. Dieser kann dem Prozessstrom entzogen werden. In einem nachgelagerten Schritt kann der Wasserstoff teilweise zurückgewonnen und wiederverwendet werden.⁷⁸

⁷⁷ Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

⁷⁸ Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft); Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

⁷⁹ Genter (2015, H₂ in Hessen); Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft); Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

Die kommerzielle Methanolerzeugung läuft in der Regel zweistufig ab. Sie setzt sich aus der Erdgas-Dampfreformierung und der Hydrierung von Kohlenstoff zusammen. Zuerst wird Erdgas im Zuge einer Dampfreaktion mit Hilfe eines Nickel-Katalysators zwischen 700 und 900°C und erhöhtem Druck (20 bis 40 bar) in ein Synthesegas umgewandelt. Das aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff zusammengesetzte Synthesegas kann zur Synthese verschiedener Verbindungen wie Methanol, Formaldehyd oder Polycarbonate verwendet werden. Bei Gebrauch des entsprechenden CO/H-Verhältnisses und eines geeigneten Katalysators wird das Synthesegas in Methanol konvertiert.⁸⁰

Polycarbonate sind transparente und farblose Kunststoffe, welche durch ihre hohe Kratzfestigkeit u.a. als Glasalternative oder bei der Herstellung von CD-Rohlinge verwendet werden.

Chemische Industrie

(ohne Ammoniak- und Methanolherstellung)

In der chemischen Industrie wird Wasserstoff als Roh- oder Hilfsstoff für Farben und Kunstfasern, Rohmaterialien und Zwischenprodukte der Nylonproduktion sowie für die Polyurethan- und Elastomer-Fertigung, die Plastifizierung sowie Elastifizierung verwendet.⁸¹

Stahl-/Metallindustrie

In Europa beansprucht die Stahl- bzw. Metallindustrie etwa 4 % des Wasserstoffs für sich.⁸²

In der Regel wird Wasserstoff zur Erzeugung einer reduktiven Schutzatmosphäre verwendet.⁸³ In der Stahlproduktion in Hochöfen werden große Mengen an Koks bei der Reduktion von Eisenerzen zu Roheisen benötigt. In der sogenannten Direktreduktion können Eisenerze durch Wasserstoff reduziert werden. Der entstehende Eisenschwamm wird in Elektrolichtbögenöfen zu Stahl weiterverarbeitet. Die Direktreduktions-Route wird von großen Metallunternehmen zur CO₂-freien Stahlproduktion favorisiert.⁸⁴

Im Zusammenhang mit Wasserstoff wird eine Schutzgasatmosphäre genutzt, um Sauerstoff zu verdrängen, welcher sich ansonsten ungewünscht mit dem zu schützenden Produkt verbinden könnte. Zusätzlich kommt hinzu, dass der Sauerstoff nicht nur verdrängt wird, sondern mit dem Wasserstoff zu harmlosem Wasser reagiert, der Wasserstoff den Sauerstoff also chemisch reduziert. Es entsteht eine **reduktive Schutzatmosphäre**.

Um Eisen aus Eisenerz (Eisenoxid, Fe₃O₄) zu gewinnen, muss dieses reduziert, sprich, von seinem Oxid, dem Sauerstoff getrennt werden. In einem Hochofen läuft dieser Prozess zweistufig ab: zuerst wird Koks unter Luftmangel zu Kohlenmonoxid (CO) verbrannt, welches dann in der Lage ist, das Eisenerz zu Eisen zu reduzieren. In dem **Direktreduktionsverfahren** wird statt Kohlenmonoxid, welches im Hochofen erst aus Koks entsteht, als Reduktionsmittel Wasserstoff und Kohlenmonoxid verwendet, welches außerhalb des Hochofens erzeugt wird. Dabei wird insgesamt weniger CO₂ freigesetzt als im traditionellem Hochofenprozess.⁸⁵

⁸⁰ Kell et al. (2012, Fahrzeugtechnik); Sterner (2017, Energiespeicher).

⁸¹ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

⁸² Genter (2015, H₂ in Hessen).

⁸³ FCH 2 JU (2017, Business Cases).

⁸⁴ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

⁸⁵ TECS (2018, Direktreduktionsverfahren).

Glasherstellung

Im Bereich der Glasherstellung hat sich der kontinuierliche Flachglas-Prozess etabliert. Die aufgeheizte, flüssige Glasschmelze wird zur Abkühlung auf ein Zinnbad geführt. Bei Temperaturen um 600°C verfestigt sich das Glas. Um Verunreinigungen wie Lufteinschlüsse zu vermeiden, darf das Zinn nicht mit Sauerstoff oxidieren. Die Zugabe von Wasserstoff stellt eine reduktive Schutzatmosphäre her.⁸⁶

6.2 Energetische Nutzung

Prinzipiell ist die energetische Verwendung von Wasserstoff überall dort vorstellbar, wo Erdgas, Mineralölprodukte und Kohle als Energieträger Gebrauch finden. Wasserstoff kann in thermisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen oder in galvanischen Zellen in die End- bzw. Nutzenergien Strom, Wärme und mechanische Energie konvertiert werden.⁸⁷

Stationäre Anwendungen

Stationäre Brennstoffzellensysteme machen (noch) einen Großteil der weltweiten Brennstoffzellen-Industrie aus. Japan, Südkorea, Nordamerika und Europa sind Marktführer der stationären Brennstoffzellenindustrie.⁸⁸

Für stationäre Anwendungen eignen sich insbesondere Brennstoffzellen, die auf einem konstanten Leistungsniveau Strom und Wärme produzieren. Darunter fallen die Hochtemperaturbrennstoffzellen SOFC, MCFC und PAFC. Anwendungsgebiete reichen von der dezentralen Stromerzeugung in netzfernen Gebieten bis hin zur privaten Hausenergieversorgung. Diese und weitere werden im Folgenden beleuchtet.⁸⁹

Hausenergieversorgung

In der Hausenergieversorgung werden Brennstoffzellensysteme größtenteils als Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) genutzt. Je nach Bedarf können diese strom- oder wärmegeführt gefahren werden. Der stromgeführte Betrieb ermöglicht eine (netz-) unabhängige Stromversorgung.

Wärmegeführt können Brennstoffzellensysteme den Heizenergiebedarf im Neubau, v.a. aber in Bestandsimmobilien als Ersatz für konventionelle Heizungsanlage vollständig decken.

SOFC, MCFC und PAFC sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen. **Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)** oder Festoxid-Brennstoffzellen werden mit keramischem Elektrolyt bei 600 bis 1000°C betrieben. **Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)**, also Schmelzkarbonatbrennstoffzellen, nutzen eine Alkalicarbonat-Mischschmelze aus Lithium- und Kaliumcarbonat als Elektrolyt und arbeiten bei einer Betriebstemperatur zwischen 580°C und 675°C. Die Phosphorsäurebrennstoffzelle (engl. **Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC**) arbeitet mit hochkonzentrierter Phosphorsäure, welche in einer Polymer-Struktur fixiert ist. Sie arbeitet bei einer Temperatur von 160°C bis 220°C.

⁸⁶ FCH 2 JU (2017, Business Cases).

⁸⁷ Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft).

⁸⁸ FCH 2 JU (2017, Business Cases).

⁸⁹ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen).

Oftmals ist der Wärmebedarf des Gebäudes höher als die Produktion in der Brennstoffzelle. Daher kommen überwiegend Hybrid-Brennstoffzellenheizungen zum Einsatz, bestehend aus einer Brennstoffzelle und einem Zusatzbrenner. Die Kraft-Wärme-Kopplung ermöglicht eine sehr effiziente Ausnutzung des Energieträgers, wodurch Energiekosten und CO₂-Emissionen reduziert werden. Der für die Hausenergieversorgung typische Einsatzbereich erstreckt sich von 1 bis 5 kW elektrischer Leistung. In diesem Leistungsbereich werden größtenteils SOFCs und PEMFCs verwendet. Energieträger ist in der Regel Erdgas, welches über das in Deutschland gut ausgebaute Erdgasnetz transportiert wird und vor der Verwendung entweder intern oder extern reformiert, also mit Wasserdampf und Hitze zu Wasserstoff umgewandelt werden muss.

PEMFC steht im Englischen für **Proton Exchange Membrane Fuel Cell**. Wörtlich übersetzt bedeutet das Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle. Die Bezeichnung Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle ist in deutschsprachigen Ländern allerdings gebräuchlicher. Kernelement der PEMFC ist eine sehr dünne Membran mit dem Handelsnamen *Nafion*, welche die beiden Reaktionspartner Wasserstoff und Sauerstoff voneinander trennt und nur Protonen, also elektrisch positiv geladene Teilchen, passieren lässt.

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) oder Direktmethanolbrennstoffzelle nutzt statt Wasserstoff Methanol als Brennstoff. Von Vorteil ist die einfache Lagerung und der Transport des Methanols als Methanol-Wasser-Gemisch. Von Nachteil ist der mit 10 bis 30 % relativ geringe elektrische Wirkungsgrad der Brennstoffzelle und die Toxizität von Methanol.

Brennstoffzellen als Teil der Hausenergieversorgung erreichen elektrische Wirkungsgrade bis zu 45 %, der Systemwirkungsgrad kann sogar bis zu 95 % betragen.⁹⁰

Der Systemwirkungsgrad bezieht sich hierbei auf die Nutzung der gesamten Energie, also Elektrizität und Wärme, welche durch Kraft-Wärme-Kopplung erreicht wird.⁹¹

Notstromversorgung/Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Der Markt der Notstromversorgung bzw. der unterbrechungsfreien Stromversorgung befindet sich im Aufschwung.

Zu den Anwendungsfeldern zählen exemplarisch Krankenhäuser, Feuerwehr, Technisches Hilfswerk, Bundeswehr, Sicherheitsbehörden, Telekommunikation (DSL-Stationen, Mobilfunkzentren, Behördenfunk), Rechenzentren, Verkehrsleittechnik (Straßenverkehr, Luftverkehr, Bahn), Brennstoffversorgung (z.B. Pumpen bei Tankstellen) oder Prozesse in der Lebensmittelversorgung (z.B. Kühlung).

Allein in der Telekommunikation ist das Marktpotential gewaltig. Weltweit gibt es mehr als 4,5 Mio. Basisstationen mit jährlichem Wachstum von ca. 10 %. Die *European Telecommunications Network Operators Association* beziffert die CO₂-Belastung durch IT- und Kommunikationstechnik auf 4,73 Mio. t, die durch den Einsatz effizienter und emissionsarmer Technologien wie z.B. die Brennstoffzellen reduziert würden.⁹²

⁹⁰ Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft).

⁹¹ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen); NOW (2016, H₂ für die Schiene); Shell Deutschland Oil (2017, Energie der Zukunft); Töpler et al. (2017, Wasserstoff).

⁹² NIP (2011, Entwicklungsplan).

Grundsätzlich werden zwei Anwendungsgebiete unterschieden:

- **Netzersatzanlagen** bei längeren Ausfallzeiten der Stromversorgung von Anlagen und Liegenschaften. Der Übergang läuft in der Regel nicht unterbrechungsfrei ab.
- **Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)** bei kurzfristigen Netzschwankungen und Netzausfällen als Schutzvorrichtung für hochsensible Systeme, wie z.B. Großrechner, Server und Telefonanlagen. USV-Anlagen sind lediglich für eine kurze Überbrückungszeit ausgelegt, um den störungsfreien Übergang zur Notstromversorgung oder das Erreichen eines sicheren Betriebszustandes sensibler technischer Systeme zu gewährleisten.⁹³

Stationäre Brennstoffzellensysteme sind grundsätzlich geeignet, beide Anwendungsfelder zu bedienen, da das Leistungsspektrum sehr breit ist. In Deutschland werden gewöhnlich PEMFC und DMFC eingebaut.⁹⁴

Gegenüber Akkumulatoren und Dieselgeneratoren bietet die Notstromversorgung mit Brennstoffzellen folgende Vorteile:

- längere Autonomiezeiten und Skalierbarkeit der Autonomiezeit durch die Gasversorgung
- deutlich längere Lebensdauer (bis zu zehn Jahre)
- breiterer Bereich an Betriebsbedingungen
- geringere Gesamtkosten (total cost of ownership)
- höhere Betriebszuverlässigkeit
- leise, emissionsfreie Stromerzeugung

Dezentrale Stromerzeugung im industriellen Maßstab

Brennstoffzellensysteme können auch zur Stromversorgung in netzfernen Gebieten eingesetzt werden. Der Ersatz von Dieselgeneratoren in Schwellenländern ist denkbar.⁹⁵

In Europa wird das Potential von Brennstoffzellen-KWK-Industrieanlagen (einige 10 kW bis mehrere MW) auf über 1 GW jährlich installierte Leistung geschätzt. Daraus ergibt sich ein immenser Markt für Deutschland und Europa. Weltweit sind mehrere hundert Brennstoffzellen-KWK-Anlagen ab 100 kW in Betrieb.⁹⁶

Im Gegensatz zu Anwendungen der Hausenergieversorgung kann bei ausreichend hohen Abwärmertemperaturen über Absorptionskältemaschinen zusätzlich Kälte erzeugt werden.⁹⁷

Es werden elektrische Wirkungsgrade von über 50 % erreicht. Im Zuge besagter Dreifach-Nutzung von Strom, Wärme und Kälte spricht man von KWKK (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung). Daraus ergeben sich **Systemwirkungsgrade von über 90 %**.⁹⁸

In besonderen Anwendungen, wie Rechenzentren oder Tiefkühlagern, kann als weiterer Mehrwert die sauerstoffarme Kathodenabluft zu Brandschutzzwecken verwendet werden.⁹⁹

⁹³ e-mobil BW (2014, Energiewende).

⁹⁴ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen).

⁹⁵ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen).

⁹⁶ NIP (2011, Entwicklungsplan).

⁹⁷ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen).

⁹⁸ NIP (2011, Entwicklungsplan).

⁹⁹ HA Hessen Agentur (2016, Stationäre Anwendungen).

Die Nachfrage nach dezentraler Stromversorgung stieg in letzter Zeit stark an. Die Einführung von Marktanzreizsystemen sowie eine niedrigere Stromversorgungssicherheit, insbesondere nach Naturkatastrophen, ließen die Nachfrage nach dezentraler Stromversorgung jedoch zuletzt stark ansteigen.¹⁰⁰

Mobilitätsanwendungen

Neben den Herausforderungen der Industrie und Gebäudeenergiebereitstellung, gilt es, im Zuge der Energiewende den Verkehrssektor zu dekarbonisieren.

Für „leichte“ Verkehrsmittel bis ca. 10 t und in speziellen Nutzungsformen auch bis zu 40 t gilt die Batterie als Energiespeicher als gesichert. Darüber hinaus muss der Verkehrssektor ganzheitlich betrachtet werden: für Straße, Schiene, Luft und Wasser sind systemische Lösungen zu erarbeiten.

Fakt ist, dass die einzige nachhaltig auszugestaltende Möglichkeit eines vollständig dekarbonisierten Verkehrssektors durch **grünen Wasserstoff** und mit darauf basierenden synthetischen Kraftstoffen gewährleistet werden kann.

6.2.1 Wasserstoff als Grundlage für klimaneutrale Mobilität

Grüner Wasserstoff kann direkt verbrannt werden, um ein Fahrzeug anzutreiben. Er kann aber auch für die Herstellung von synthetischem Kraftstoff für konventionelle Verbrennungsmotoren genutzt werden. Verbreiteter ist das Wasserstoff-Antriebskonzept auf Basis von **Brennstoffzellen**.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind als Elektrofahrzeuge anzusehen, da sie von einem Elektromotor angetrieben werden, nur wird die Energie nicht von einer Traktionsbatterie, sondern von einer Brennstoffzelle bereitgestellt, welche Wasserstoff in einem Speicher mitführt und reinen Wasserdampf als Abgas freisetzt.

Brennstoffzellen für elektrische Antriebe

Eine Brennstoffzelle erlaubt es, Wasserstoff in einem elektrochemischen Prozess kontrolliert mit Sauerstoff reagieren zu lassen, um die im Wasserstoff gespeicherte Energie in elektrische Energie umzuwandeln und diese für den Antrieb eines Elektrofahrzeugs zu nutzen.

Die PEM-Brennstoffzelle eignet sich für Fahrzeugantriebe, da sie schnell auf veränderte Leistungsanforderungen reagieren kann. Die einzelne PEM-Brennstoffzelle ist flach aufgebaut, so dass sich eine große Anzahl von Zellen zu Stacks übereinander stapeln lassen, um die gewünschte elektrische Spannung zu realisieren und bestimmte Leistungen zu ermöglichen.

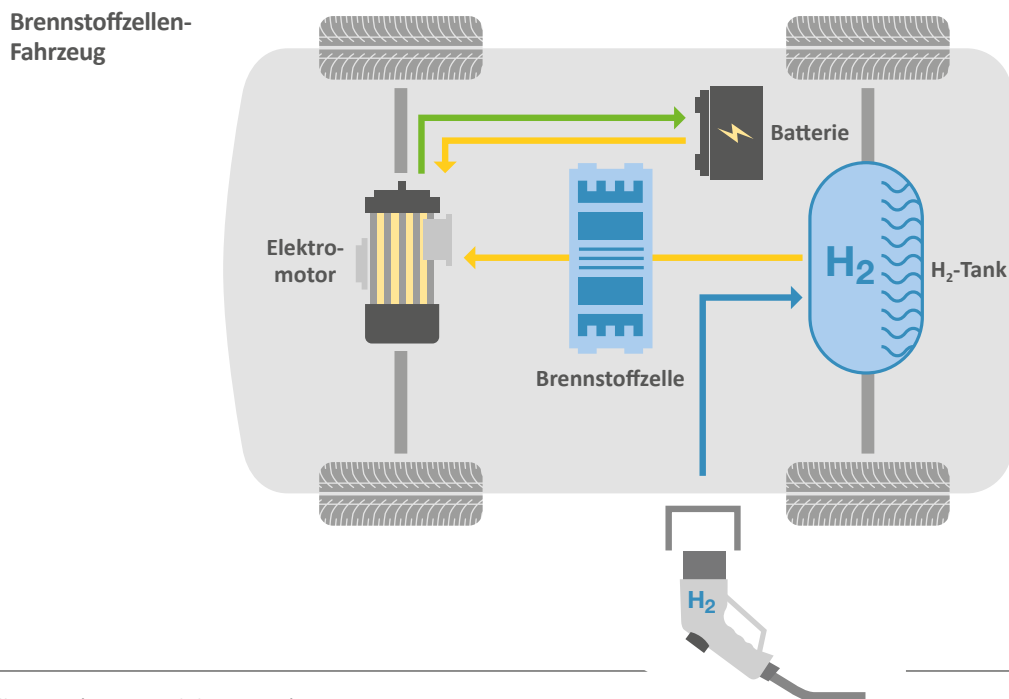
Um die Eigenschaften der beiden Komponenten Brennstoffzelle und Batterie optimal zu nutzen, macht es Sinn, für den Beschleunigungsvorgang eine Puffer-Batterie einzusetzen, wie in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

Mit dem unter Druck stehenden oder verflüssigten Wasserstoff im Tank kann ein Brennstoffzellen-Fahrzeug wesentlich mehr Energie mitführen, als es mit einer Lithium-Ionen-Traktionsbatterie möglich wäre.

Die **Traktionsbatterie**, auch **Antriebsbatterie** genannt, ist ein elektrischer Energiespeicher der in Elektrofahrzeugen als Hauptenergiequelle, aber auch als Pufferbatterie in Brennstoffzellenfahrzeugen verwendet wird. Sie besteht in der Regel aus klassischen Akkumulatoren, wie Lithium-Polymer, oder Nickel-Metallhydrid-Zellen.

¹⁰⁰ e-mobil BW (2014, Energiewende).

Abb. 10: Schematische Übersicht des Antriebsstranges eines Brennstoffzellenfahrzeugs



Quelle: VDE (2021, Mobilität 2030)

Die damit verbundene höhere Reichweite von Brennstoffzellen-Fahrzeugen bei gleichem oder geringerem Gewicht ist ein entscheidender Vorteil gegenüber reinen Batteriefahrzeugen. Mit einer typischen Tankfüllung von 5 kg Wasserstoff, bei einer Betankungszeit von bis zu 5 Minuten, verfügt ein Brennstoffzellen-Pkw über eine Reichweite von mehr als 500 Kilometern.¹⁰¹

Ein weiterer Vorteil ist, dass zusätzlicher Energiebedarf für die Heizung über die Abwärme der Brennstoffzelle zu realisieren ist, während dies bei einem rein batterieelektrischen Fahrzeug häufig zu Lasten der Reichweite geht.

Wasserstoff im Verbrennungsmotor

Mit Wasserstoff als Kraftstoff wurden in den 1930er-Jahren erste Anwendungsversuche an Hubkolbenmotoren durchgeführt. Seit dieser Zeit wurden verschiedene Konzepte analysiert und Prototypenfahrzeuge von verschiedenen Herstellern wie *BMW*¹⁰², *Ford*¹⁰³, *Mazda* und *MAN* aufgebaut. Der Aufbau unterscheidet sich nicht allzu sehr von einem konventionellen Fahrzeug, wie in Abbildung 11 zu sehen ist, nur dass statt des Kraftstofftanks für fossile Brennstoffe ein Wasserstoffspeicher nebst Ventiltechnik verbaut ist.

Jedoch kam es bis heute nicht zu einer serienreifen Entwicklung eines Wasserstoffmotors. In den vergangenen Jahren wurden im Bereich Wasserstoffantrieb fast ausschließlich Brennstoffzellen entwickelt.¹⁰⁴

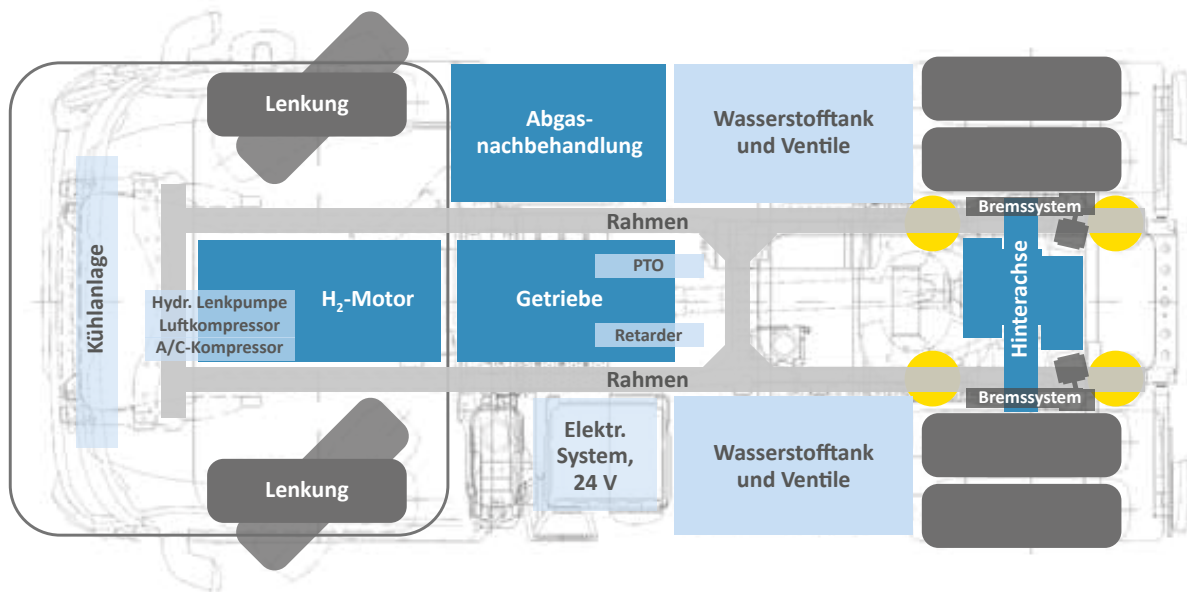
¹⁰¹ e-mobil BW (2021, Systemvergleich).

¹⁰² Enke (2007, BMW Hydrogen 7).

¹⁰³ Natkin et al. (2007, Ford Hydrogene Engine).

¹⁰⁴ e-mobil BW (2021, Systemvergleich).

Abb. 11: Schematische Darstellung eines Wasserstoffmotor-Antriebsstranges



Quelle: e-mobil BW (2021, Systemvergleich)

Der Wasserstoffmotor bietet als Ottomotor die Möglichkeit, ohne Ausstoß von CO₂ betrieben zu werden, allerdings kommt es zu CO₂-Emissionen aus verbranntem Schmieröl und SCR-Reduktionsmitteln.¹⁰⁵

SCR (Selektive katalytische Reduktion) Reduktionsmittel sind Mittel zur Abgasnachbehandlung, wie die bei Dieselfahrzeugen eingesetzte Harnstofflösung *AdBlue*.

Wasserstoffmotoren erzeugen im Vergleich zu Dieselmotoren niedrigere Schadstoffemissionen. Neben geringen Mengen CO₂ fallen Stickoxidemissionen durch die hohen Temperaturen des Verbrennungsprozesses an. Durch die Nutzung aktuell verfügbarer Abgasnachbehandlungstechnologien werden Grenzwerte der Emissionsgesetzgebung allerdings unterschritten.¹⁰⁶

Diese Beispiele zeigen die Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff. Neben den klassischen Einsatzgebieten von Wasserstoff in der stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie, in der Wasserstoff als Grundstoff für verschiedenste Chemikalien benötigt wird, werden auch solche Anwendungsfelder interessant, die bei der Dekarbonisierung ganzer Industriezweige unterstützen können. Energetisch entwickeln sich immer neue Anwendungsfelder, die auf den Rohstoff Wasserstoff zugreifen – nicht zuletzt im Verkehr als Wasserstoff-Verbrenner oder über Wasserstoff-Brennstoffzellen mit elektrischem Antrieb.

Die Absatzmenge von Wasserstoff wird sich dadurch in naher Zukunft zwangsläufig weit über die derzeitigen Produktionsmengen erhöhen und in Industriebereiche vorstoßen, die zurzeit noch als Wasserstoff-fern angesehen werden. Die damit einhergehenden Herausforderungen lassen sich allerdings nur durch eine **integrierte Wasserstoffwirtschaft** lösen, die sich auf den Energieträger Wasserstoff als Grundbaustein verständigt.

¹⁰⁵ e-mobil BW (2021, Systemvergleich).

¹⁰⁶ e-mobil BW (2021, Systemvergleich).

7 Konzepte für eine integrierte Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff, seit über 100 Jahren ein relevantes Ausgangsprodukt für die Chemie, Stahlerzeugung und andere, bietet demzufolge die Chance eines einzigartigen Umbaus der Industrie, des Verkehrs und des Wärme-sektors. Wasserstoff ermöglicht es, zahlreiche Industrien zu dekarbonisieren und die Erzeugung von schädlichen Beiprodukten (darunter CO₂) zu vermeiden.

Dies wird allerdings nur dann der Fall sein, wenn es gelingt, nicht nur national, sondern im gesamten Wirtschaftsraum der EU geeignete Wasserstoffquellen und Wasserstoffverbraucher (sogenannte Wasserstoffsenken) aufzubauen, miteinander zu vernetzen und den Zugang zum Grundstoff Wasserstoff auf eine breite wirtschaftliche Basis zu stellen. Dabei ist es nicht nur notwendig, zu klären, wie Wasserstoff erzeugt wird, sondern auch wie Transport und Verteilung erfolgen können und sollen.

Eine **Wasserstoffsenke** ist eine garantierte, konstante Wasserstoffabnahme z.B. in Form einer Wasserstoff-Tankstelle oder eines chemischen Betriebes.

Viele Länder in der EU (u.a. Frankreich, Österreich, Portugal) haben inzwischen nationale Wasserstoff-Roadmaps erarbeitet, die mit der Roadmap für die EU einen langfristigen Plan für Europa aufzeichnen. Darüber hinaus gibt es weltweite Anstrengungen, die notwendige Infrastruktur aufzubauen bzw. Möglichkeiten zu schaffen, wie Wasserstoff erzeugt und genutzt werden kann.

Im Folgenden wird der Weg Europas beleuchtet. Für die außer-europäischen Anstrengungen sind einige Literaturquellen im Anhang hinterlegt. Insbesondere in Asien sind Länder wie Korea, Japan und China bereits sehr weit in ihren Überlegungen fortgeschritten und haben diese für die nächsten Jahre detailliert beschrieben.¹⁰⁷ Aber auch in Europa gibt es bereits eine Reihe beschlossener Maßnahmen, die in verschiedenen Dokumenten (RED II¹⁰⁸, CVD¹⁰⁹, H₂-Roadmap¹¹⁰) veröffentlicht sind. Der Weg in ein dekarbonisiertes Europa ist folglich vorgezeichnet.

Doch was bedeutet dies hinsichtlich einer integrierten Wasserstoffwirtschaft mit den jeweils national verschiedenen Verständnissen der europäischen Nationen und ihren zum Teil sehr unterschiedlichen Ansichten, wie die Dekarbonisierung und die Einhaltung der Klimaziele erreicht werden können?

¹⁰⁷ Hydrogen Central (2021, China Roadmap); IEA (2020, Korea Roadmap); New Zealand Ministry of Foreign Affairs (2020, Japan Roadmap).

¹⁰⁸ Europäische Kommission (2018, RED II).

¹⁰⁹ Europäische Kommission (2019, Clean Vehicle Directive).

¹¹⁰ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

Der Prozess als solches ist noch nicht vollständig beschlossen. Es zeichnen sich aber bereits erste Randparameter und Bedingungen des zukünftigen Systems ab:

Es ist geplant, bis 2030 eine Elektrolyseleistung von zweimal 40 GW aufzubauen.¹¹¹ 26 Mitgliedstaaten der EU haben sich zu einer *Wasserstoffinitiative* zusammengeschlossen. 14 Mitgliedstaaten haben bereits Wasserstoff in einem nationalen Strategieplan für den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe vorgesehen.

Wie kann dadurch der europäische Wirtschaftsraum erschlossen werden? Zunächst werden Wasserstofferzeugung, Distribution und Nutzung im industriellen Maßstab inklusive Infrastruktur aufgebaut – ausgehend von einzelnen Zentren. Genannt werden z.B. Städte wie Rotterdam, Hamburg, Bordeaux oder Marseille bzw. einzelne Unternehmen wie *Shell* und *TotalEnergies*.¹¹²

So startete *Shell* mit einer 10 MW-PEM-Elektrolyse in Wesseling Deutschland (Rehfyne),¹¹³ plant aber bereits in der Nordsee mit den Niederlanden eine 1 GW-Anlage, die beginnend beim Aufbau der Windenergieanlagen und der notwendigen Infrastruktur bis zum Jahr 2035 entsprechende Mengen an Wasserstoff aus der Nordsee liefern soll. An den verschiedensten Standorten in Europa sind erste Anlagen geplant – meist in der Nähe von Off-Shore- oder On-Shore-Windanlagen, die den erforderlichen grünen Strom zur Verfügung stellen und industrielle Zentren in der Nähe haben, die die drei Produkte Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme nutzen können.

Einen wesentlichen Impuls werden diese Ansätze in den kommenden Jahren erfahren, wenn die IPCEI-Auswahl (*Important Projects of Common European Interest*) definiert und genehmigt sind. Im Rahmen dieser Maßnahme geht es darum, gezielt komplementäre Strukturen aufzubauen, die einen langfristigen Roll-out der Technologien in Europa ermöglichen.

Die genannten IPCEI-Projekte – die bis Mitte 2022 definiert sein sollen – werden sogenannte Trittsteine sein, um die verschiedenen Aspekte der Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Zum Beispiel plant die BASF in Ludwigshafen ein Wasserstoff-Großprojekt im Umfang von 1 Mrd. EUR Investitionssumme, im Wesentlichen für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur.¹¹⁴

Damit Anlagen dieser Größenordnung genutzt werden können, braucht es ein zweites, bereits gestartetes und ausformuliertes Projekt: den *European Hydrogen Backbone*.¹¹⁵

Der *Hydrogen Backbone* (vgl. Abb. 12.) – mit einer geplanten Gesamtlänge von 11.600 km in 2030 und 39.700 km im Jahr 2040 – verbindet alle wichtigen Industriezentren in Europa mit den erforderlichen Wasserstoffgasleitungen. Wasserstoffpipelines sind bereits über viele Jahre im Gebrauch und werden zum energetischen Rückgrat der EU. Die Kosten für den Transport von 1 kg Wasserstoff würden laut Abschätzungen bei bis zu 0,21 EUR pro 1.000 km liegen – bei einer Gesamtinvestitionssumme von rund 80 Mrd. EUR. Diese Leitungen entsprechen rund zwei Drittel der heutigen Erdgasleitungskapazität in Europa.

Dabei sollte an dieser Stelle nochmals betont werden, dass es keine noch zu lösenden technologischen Hürden gibt. Selbstverständlich müssen die Kosten noch gesenkt werden und der Aufbau der Infrastruktur ruft sicherlich weiterhin rechtliche und ökonomische Schwierigkeiten hervor, insbesondere wenn die Kosten für fossile Brennstoffe ohne einen gerechten CO₂-Rucksack weiterhin so niedrig bleiben.

Die kumulierten Investitionen in erneuerbaren Wasserstoff könnten sich in Europa bis 2050 auf 180 bis 470 Mrd. EUR belaufen und sich für CO₂-armen Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen in der Größenordnung von 3 bis 18 Mrd. EUR bewegen.¹¹⁶

Diese ersten Wasserstofferzeugungszentren im großen Maßstab – v.a. mittels Windenergie – sollen den Roll-out der

¹¹¹ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe).

¹¹² Shell Deutschland Oil (2020, Wasserstoff Groningen).

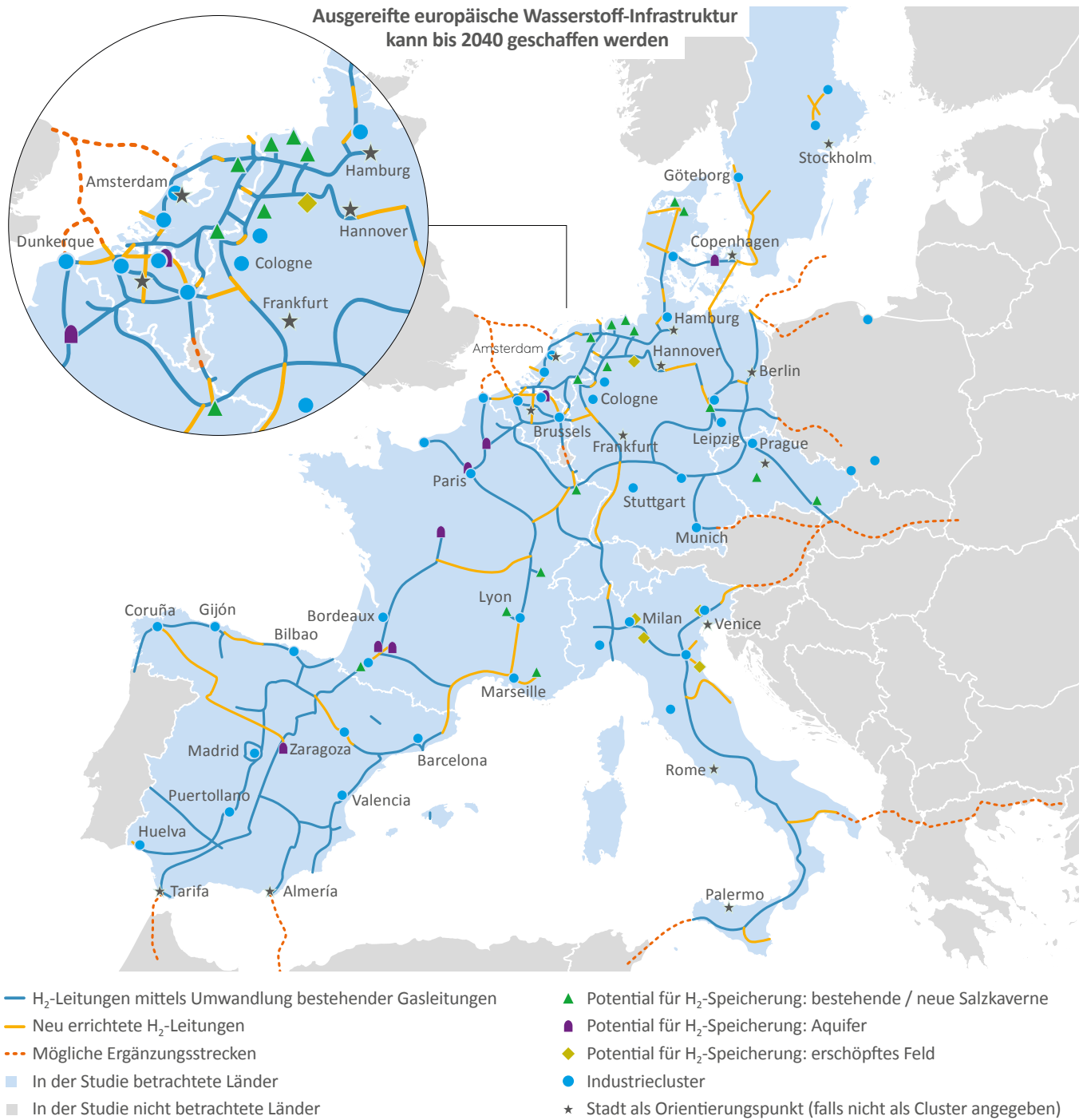
¹¹³ MWIDE (2021, REFHYNE).

¹¹⁴ Landesregierung RLP (2021, BASF).

¹¹⁵ Enagás (2020, Hydrogen Backbone); Siemens Energy (2020, Wasserstoffinfrastruktur); Vision Mobility (2020, Hydrogen Backbone).

¹¹⁶ FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe); Atanasiu (2020, FCH JU Status).

Abb. 12: Europäischer Infrastrukturplan (European Hydrogen Backbone)



Quelle: Enagás (2020, Hydrogen Backbone)

Technologien einleiten. Im September 2021 veröffentlichte die EU die Sieger der Ausschreibung 100 MW Elektrolyse: die Projekte GREENH2ATLANTIC¹¹⁷ in Spanien, GreenHyScale¹¹⁸ in Dänemark und REFHYNE II¹¹⁹ in Norwegen. Im Rahmen dieser Ausschreibung wurde neben der CO₂-freien bzw. grünen Erzeugung von Wasserstoff auch verlangt, alle Wertschöpfungsketten inklusive Wärme und Sauerstoff zu nutzen. Preise für den Wasserstoff wurden vorgeschrieben (< 4,8 EUR) sowie weitere Parameter. Damit wird es erstmals möglich sein, Erfahrungen für den systematischen Aufbau der Technologien im industriellen Maßstab aufzubauen. Von den Gewinnern wird verlangt, dass beispielsweise ein kompletter Standort mit Wasserstoff umgerüstet werden muss und falls möglich ein kompletter Verzicht auf fossilen Brennstoff bzw. der Aufbau von alternativen Kraftstoffen zu erfolgen hat.

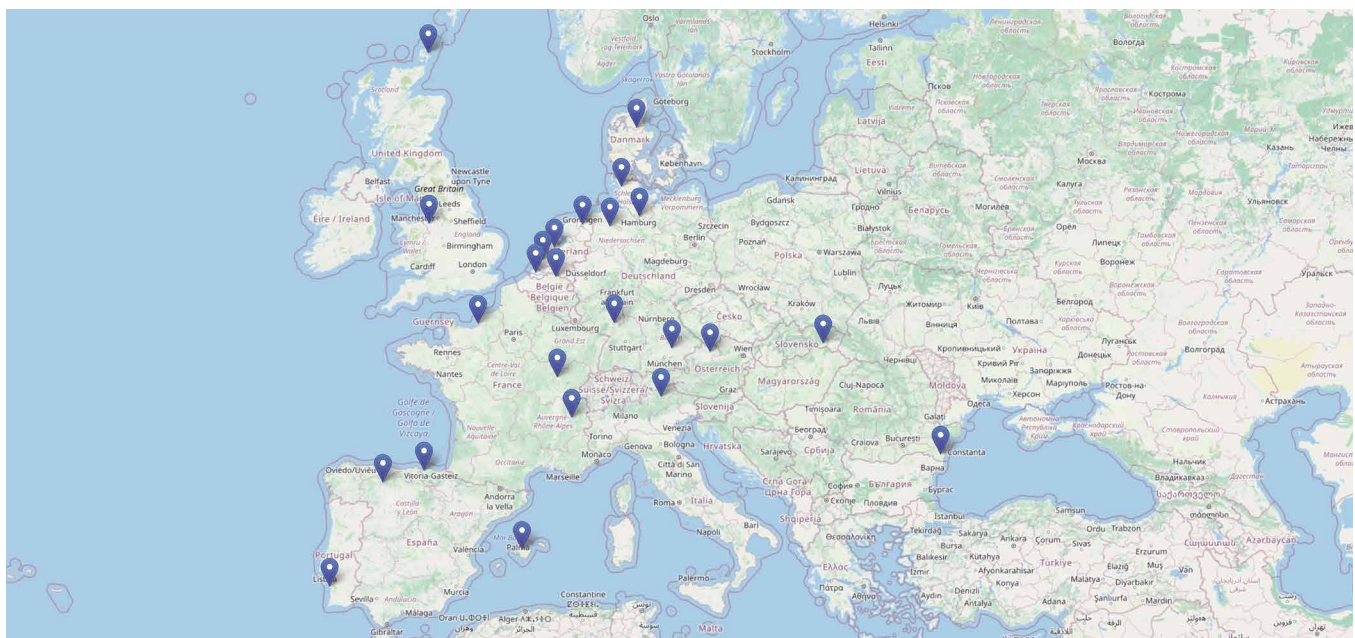
Ein anderes Beispiel ist der Hafen in Hamburg: Senator Westhagemann verkündete auf der Mitgliederversammlung des *Deutschen Wasserstoff Verbandes*, dass der Hafen zunächst eine 100 MW-Elektrolyse mit angeschlossenem Windpark erhalten

und über die nächsten Jahre auf insgesamt 500 MW-Elektrolyse ausgebaut werden soll.¹²⁰ Das bedeutet, dass pro Stunde bei der 100 MW-Anlage ungefähr zwei Tonnen Wasserstoff erzeugt werden könnten, die im Hafen und den umliegenden Anlagen die Nutzung fossiler Brennstoffe vermeiden.

Ein ähnlicher Ansatz wird mit den sogenannten *Hydrogen Valleys* verfolgt (vgl. Abb. 13): Ausgehend von verschiedenen technologischen Ansätzen werden Wasserstoffinfrastruktur und -verbrauch zusammen aufgebaut, um damit den langfristigen Aufbau einer emissionsfreien Produktion zu gewährleisten.

Diese „Wasserstofftäler“ gibt es weltweit, mit den verschiedensten Ansätzen in Europa. In jedem interessierten Land in Europa möchte man mindestens eines dieser „Täler“ aufbauen und von dort mit einer steilen Lernkurve die Ziele Europas erreichen.¹²¹

Abb. 13: Positionen der Hydrogen Valleys in Europa



Quelle: FCH 2 JU (2019, Roadmap Europe)

¹¹⁷ Europäische Kommission (2021, GREENH2ATLANTIC).

¹¹⁸ Europäische Kommission (2021, GreenHyScale).

¹¹⁹ Europäische Kommission (2021, REFHYNE II).

¹²⁰ DWV (2020, Jahresrückblick).

¹²¹ FCH 2 JU (2021, Hydrogen Valleys).

8 Fazit und Ausblick

Angesichts der steigenden Umweltprobleme durch das sich ändernde Klima ist es unbestritten, dass umgehend gehandelt werden muss. Die als „entscheidend“ eingeschätzte Weltklimakonferenz COP 26 Ende 2021 in Glasgow hat die enorme Dringlichkeit globaler Dekarbonisierungsstrategien nochmals sehr klar zum Ausdruck gebracht. Einer der sinnvollsten und langfristig erfolgversprechendsten Ansätze liegt im intelligenten, schnellen und entschlossenen Aufbau einer **global integrierten Wasserstoffwirtschaft**.

Glücklicherweise ist das Thema Wasserstoff inzwischen in der Gesellschaft angekommen. Sowohl in der Politik, der Industrie als auch der Gesellschaft besteht Einigkeit darüber, dass mit Wasserstoff über alle Sektoren hinweg eine der wenigen Möglichkeiten besteht, auch unter dem Primat hoher Versorgungssicherheit die Klimaziele zu erreichen und den kritischen Temperaturanstieg von 1,5°C nicht zu überschreiten.

Vergleicht man die unterschiedlichen Roadmaps in Europa und in Deutschland fällt auf, dass es noch unterschiedliche Ansätze gibt, um die genannten Ziele zu erreichen. Für Deutschland bietet die *Nationale Wasserstoffstrategie* zusammen mit dem *Nationalen Wasserstoffrat* einen Aktionsplan zur Orientierung.

Noch sind der Weg in eine Wasserstoffwirtschaft und der Markthochlauf nicht komplett definiert, aber anhand des Aktionsplans sind die nächsten Schritte erkennbar und können von den beteiligten Akteuren im Markt angegangen werden. Das ist wichtig festzustellen, weil die Markteintrittshindernisse bis dato unbekannt sind, die volkswirtschaftliche Bewertung der verschiedenen Aktionen nicht erfolgen konnte und auch im europäischen Kontext viele Fragen zum Markthochlauf offen sind.

So müssen u.a. die Komponenten für den Aufbau der Wasserstoffherzeugung möglichst als Serienprodukte zur Verfügung stehen, um die notwendigen Kostenreduktionen der Inven-

tionskosten wahr werden zu lassen. Dies gilt insbesondere für die Elektrolyseure. Erfreulicherweise werden sowohl in Europa als auch in Asien diese Fertigungskapazitäten aufgebaut. Dabei darf nicht unerwähnt bleiben, dass auch die Betriebskosten der Anlagen noch deutlich reduziert werden müssen. Hier ist insbesondere der Preis für den „grünen“ Strom drastisch zu reduzieren, sind es doch genau diese Betriebskosten, die grünen Wasserstoff heute unattraktiv machen.

Eine Reihe anderer Probleme ist ebenfalls noch ungelöst. Dazu gehört u.a. der Aufbau der Infrastruktur zur Erzeugung von großen Mengen an grünem Wasserstoff. Dies wird sicherlich bis nach 2025 dauern. Entscheidend dafür ist in jedem Fall ein ausreichendes und hinreichend stabiles Angebot an klimaneutraler Elektrizität, das auch stark zunehmender Nachfrage (sowohl nach Strom als auch Wasserstoff) standhalten kann. Hier gilt es, zum einen Rahmenbedingungen zu schaffen, die den Aufbau von Solar- und Windanlagen sowie einen Betrieb zu vernünftigen ökonomischen Bedingungen langfristig erlauben und zum anderen Anreize zu setzen, diese in das Gesamtsystem eines erneuerten intelligenten Strom- und Gasnetzes einzubinden.¹²²

Erfreulicherweise sieht man, dass Lieferanten der wesentlichsten Komponenten – der Elektrolyseure – ihre Fertigungskapazitäten stetig ausbauen, was zu niedrigeren Preisen pro Kilowatt installierter Elektrolyseleistung führen wird. Die Windparks auf dem Meer, die den größten Anteil an grünem Wasserstoff liefern werden, sind in der Projektierungsphase oder bereits im Aufbau.

Dabei sollte nicht verhehlt werden, dass Deutschland weiterhin einen erheblichen Teil dieser grünen Energie importieren wird. Das liegt zum einen an den fehlenden Möglichkeiten, die notwendigen Erzeugungsanlagen in Deutschland aus Platzgründen bzw. infolge ungünstiger klimatischer Bedingungen aufzubauen, zum anderen aber auch daran, dass die Kosten für diesen Aufbau in und außerhalb von Europa deutlich geringer ausfallen. 2 Mrd. EUR stellt Deutschland daher in der Stiftung *H₂Global* zur Verfügung, um für einen außer-europäischen Raum solche Infrastrukturen aufzubauen.

¹²² Länder wie Frankreich gehen hier jedoch erkennbar einen anderen Weg: In seinem neuen Zukunftsplan setzt das Land strategisch auf einen weiteren Ausbau der Kernenergie; vgl. Handelsblatt (2021, Mini-Kernkraftwerke).

Eine weitere zu schließende Lücke für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft ist die Verteilung des Wasserstoffs. Welche Distributionspfade sind ökologisch und ökonomisch am geeignetsten? Vieles spricht für den Aufbau eines europäischen Wasserstoffpipelinesystems; auch für regionale Verteilungen wäre ein solches System sinnvoller als Trailer, egal ob mit flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass der Hochlauf der Infrastruktur vom entsprechenden Hochlauf von Wasserstoffverbrauchern begleitet wird – sei es in der Industrie, im Verkehr oder in Gebäuden. Eine nicht genutzte Infrastruktur wäre ein finanzieller, wirtschaftlicher und ökologischer Rückschlag für die Technologie und für die Klimaanstrengungen.

Daher sollte darauf hingearbeitet werden, mindestens für eine Übergangszeit von zehn Jahren alle heute vorhandenen Wasserstoffquellen zu nutzen und auch Wasserstoff aus Erdgas oder Pyrolyse mit anschließender Verwertung des Kohlenstoffs zu erlauben. Insbesondere die politischen Funktionsträger wollen ausschließlich grünen Wasserstoff. Dies ist jedoch in der Übergangszeit ein Hindernis, um alle notwendigen Teile einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft aufzubauen.

So sind Verwertungsmöglichkeiten für die anfallenden Mengen von Sauerstoff und Wärme bei der Elektrolyse zu finden. Das würde eine deutliche Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades der Elektrolyseanlagen ermöglichen.

Für viele technische Anwendungen wird Wasserstoff eine Lösung sein. Große Hoffnungen werden insbesondere in die Defossilisierung des Schwerlastverkehrs mittels Wasserstoff gesetzt. In diesem Technologiefeld kann Wasserstoff seine Vorteile bzgl. Reichweite, kurzer Betankungszeit und eine nicht eingeschränkte Nutzlast wie bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen nutzen. Im Flugverkehr und dem maritimen Bereich sind möglicherweise für eine längere Übergangszeit synthetische Kraftstoffe die erste Wahl. Hier gehen die Meinungen der Experten innerhalb der verschiedenen Technologiefelder noch weit auseinander. Erste mit Wasserstoff betriebene Flugzeuge sollen 2025 zum Einsatz kommen, erste Schiffe 2027 oder danach. Hier sind erste Prototypen bereits in der Umsetzung. Einschlägige Ausschreibungen bei der Europäischen Kommission lassen hier zukünftig einige interessante Ergebnisse erwarten.

Gelingt es, in Deutschland und in Europa die Rahmenbedingungen für den Markthochlauf einer Wasserstoffwirtschaft aufzubauen, dann werden nicht nur die Klimaziele erreicht, sondern es werden auch die in heutigen Industrien (z.B. Automobilindustrie) wegfallenden Arbeitsplätze durch Arbeitsplätze in den genannten Feldern ersetzt. Ein technischer und sozialer Umbau der in die Jahre gekommenen deutschen Industrie ist dadurch möglich. Neue Fertigungsverfahren bei Stahl, Düngemittel usw. werden helfen, die Industrie in großem Maße zu dekarbonisieren und das ohne den Verlust von Produktivität oder Arbeitsplätzen. Es wird nicht billig und erfordert sichtlich noch erhebliche Anstrengungen, aber es ist die Chance für eine umweltgerechte Industrie, einen emissionsfreien Verkehr und eine treibhausgasfreie Gebäudenutzung.

8.1 Geopolitische Implikationen

Zentrale Determinante für den Aufbau einer effizienten Wasserstoffwirtschaft ist eine leistungsfähige und belastbare **Grundversorgung mit klimaneutraler Elektrizität**. Da Länder wie Deutschland weder räumlich noch klimatisch in der Lage sein werden, die erforderlichen Strommengen vollständig aus heimischen regenerativen Energiequellen zu decken, stellt sich sehr schnell die Frage nach Alternativen. Grundsätzlich verfügen viele Länder in Nordafrika oder dem Mittleren Osten über sehr günstige Voraussetzungen, um dort (auch in großindustriellem Maßstab) Elektrizität aus Wind- oder Solarenergie zu gewinnen. Integrierte Solar-/Wasserstoffanlagen könnten dort ebenfalls mit hohem Wirkungsgrad errichtet werden. Der Transport des dort erzeugten grünen Wasserstoffs in Länder mit hoher Nachfrage wäre dann entweder über Tankerflotten oder über vorhandene Pipeline-Netze denkbar. Soweit zumindest die Theorie.

Das Hauptproblem dieser Konstellation liegt aus europäischer Sicht darin, dass eine jahrzehntelange Abhängigkeit von eher instabilen Ländern und Weltregionen (zuletzt bei Öl) mit Blick auf grünen Wasserstoff erneut durch eine solche **geopolitische Abhängigkeit** ersetzt werden könnte. Aus Sicht der potentiellen Produzentenländer bietet grüner Wasserstoff jedoch eine hervorragende **Entwicklungsperspektive**, um die eigene Wirtschaft zu transformieren und auch in Zeiten sinkender Nachfrage nach Öl und Gas stabile Einnahmen generieren zu können. Ob und wie stark diese geopolitische Implikation die strategische Wasserstoff-Perspektive für Europa zukünftig einschränken oder sogar fördern wird, bleibt vorerst noch abzuwarten.

Schon heute zeichnet sich allerdings ab, dass andere Regionen der Welt (darunter die USA, Australien und Länder des Mittleren Ostens) grundsätzlich über bessere und/oder stabilere Möglichkeiten verfügen, eine „grüne“ Wasserstoffwirtschaft zu errichten. Ob diese **alternativen Potentiale** jedoch zielgerichtet und auch im Sinne des Klimaschutzes genutzt werden, ist eine völlig andere Frage.

- Folglich könnte, ähnlich wie beim „Kampf ums Öl“, zukünftig ein **globaler Verteilungswettkampf um „grüne Energie“** einsetzen – diesmal jedoch fokussiert auf die Frage nach dem direktesten und effizientesten Zugang zu grünem Wasserstoff.

8.2 Perspektiven für Investoren

Wasserstoff und sein Versprechen einer klimaneutralen, leicht verfügbaren und breit einsetzbaren „grünen Energie“ ist mit einiger Sicherheit eines der **spannendsten Themen**, das sich Investoren an den Kapitalmärkten in den kommenden Jahren präsentieren wird. Das Gesamtbild ist jedoch vorerst relativ komplex, nicht zuletzt infolge anspruchsvoller technischer Rahmenbedingungen, vielfältiger politischer Einflussfaktoren sowie zahlreicher derzeit noch ungeklärter Fragen. Dennoch steht fest:

- Aufgrund des durch den Klimawandel stark steigenden Drucks zur globalen Dekarbonisierung sowie des (nach Überwindung bestimmter Marktbarrieren) vorhersehbar starken Wachstums bietet der „Wasserstoff-Komplex“ für Investoren außergewöhnliche Chancen zur aktiven Partizipation an einer **energetischen „Jahrhundert-Transformation“**.

Der mit hohem Zeitdruck ablaufende Umbau großer Teile der Weltwirtschaft in eine weitgehend klimaneutrale Infrastruktur erfordert anhaltende Anstrengungen, hohe unternehmerische Risiken, große technologische Fortschritte und nicht zuletzt massive Investitionen auf vielen Ebenen. Diese ungewöhnlich dynamische Konstellation erzeugt perspektivisch – und nahezu zwangsläufig – eine **Vielzahl attraktiver Investmentthemen**:

- Neben spezialisierten Herstellern von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen zählen versierte Anlagenbauer, Unternehmen im Bereich Solarenergie und Windkraft, Betreiber von Gasnetzen oder Tankerflotten, technische Systemintegratoren sowie Anbieter neuartiger Mobilitätskonzepte zu möglichen Profiteuren einer aufkommenden „Wasserstoffwirtschaft“.

Auswahl und zeitliche Abfolge entsprechender Anlagethemen sollten jedoch stets sehr eng an der Entwicklung politischer Rahmenbedingungen ausgerichtet werden. Auch das Risiko temporärer „Hype Cycles“, also euphorischer Überschätzung zukünftiger Wachstumsaussichten an den Kapitalmärkten, ist stets mitzuberücksichtigen. Gleichzeitig stellt sich für Investoren bei jeder großen technologischen Umwälzung nicht nur die Frage nach den potentiellen Gewinnern, sondern (ebenso dringend) nach den möglichen Verlierern (die möglichst nicht im Portfolio enthalten sein sollten).

Insgesamt bietet der „Wasserstoff-Komplex“ für strategische Investoren eine **Vielzahl von Ansatzpunkten**, sich gezielt auseinanderzusetzen und zukünftige Chancen und Risiken auf Basis fundierter Einschätzungen abzuwägen. Die vorliegende Studie soll dazu, neben dem Ziel einer wissenschaftsanalytischen Informationsvermittlung und -verdichtung, einen kleinen Beitrag leisten.

Literaturverzeichnis

Atanasiu, M. (2020, FCH JU Status): Programme Review Days 2020 - FCH JU Programme Status, veröffentlicht am 23.11.2020, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/0.%20Opening_Mirela%20Portfolio%20analysis.pdf, zuletzt aufgerufen am 25.10.2021.

Baake, R. (2021, Klimaneutralität): Klimaneutralität ist ohne Wasserstoff nicht machbar, veröffentlicht am 04.11.2021, <https://www.hzwei.info/blog/2021/11/04/klimaneutralitaet-ist-ohne-wasserstoff-nicht-machbar/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2021.

Ball, M. / Wietschel, M. (2009, Economy): The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges, Cambridge University Press, Cambridge, 24.09.2009.

BMBF (2021, Wissenswertes): Nationale Wasserstoffstrategie – Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff, <https://www.bmbf.de/bmbf/shreddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BMJV (2021, KSG): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist, Ausfertigungsdatum: 12.12.2019, <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BMU (2021, Novelle KSG): Novelle des Klimaschutzgesetzes beschreibt verbindlichen Pfad zur Klimaneutralität 2045, veröffentlicht am 12.05.2021, <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-beschreibt-verbindlichen-pfad-zur-klimaneutralitaet-2045>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BMWi (2018, 7. Energieforschungsprogramm): Innovationen als Erfolgsfaktor für die Energiewende – Das 7. Energieforschungsprogramm setzt die Leitlinien, erstellt im September 2018, <https://www.energieforschung.de/energieforschungspolitik/energieforschungsprogramm>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BMWi (2020, NWS): Die Nationale Wasserstoffstrategie, veröffentlicht am 06.2020, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BMWi (2021, Energiewende): Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

BReg (2021, Nachhaltigkeitsstrategie): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Weiterentwicklung 2021, veröffentlicht am 10.03.2021, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bcd8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021

BReg (2021, Generationenvertrag): Klimaschutzgesetz 2021 – Generationenvertrag für das Klima, in Kraft getreten am 31.08.2021, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Brudermüller, M. (2021, Wasserstoffipfel): Handelsblatt Wasserstoffipfel 2021, 26./27.05.2021, <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/wasserstoff/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Dawood, F. / Anda, M. / Shafiullah, G.M. (2020, Hydrogen Production): Hydrogen Production for Energy: An Overview, in: International Journal of Hydrogen Energy, 45(7), 3847-3869, doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

DESTATIS (2021, Stromerzeugung Korrektur): KORREKTUR: Stromerzeugung 2020: 5,9 % weniger Strom ins Netz eingespeist als 2019, veröffentlicht am 05.03.2021, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_101_43312.html, zuletzt aufgerufen am 20.10.2021.

Deutsche Koordinierungsstelle IPCC (2021, Sachstandsbericht): Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6) Beitrag von Arbeitsgruppe I: Naturwissenschaftliche Grundlagen, veröffentlicht am 07.08.2021 in englischer Sprache, <https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

DIN (2021, Wasserstoff): Zukunft Wasserstoff – Ein Element mit dem Potenzial zum Wundermittel, <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/publikationen/din-magazin/wasserstoff>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

DIW (2021, Differenzverträge): Contracts for Difference (Differenzverträge), https://www.diw.de/de/diw_01.c.670596.de/differenzvertraege-contracts_for_difference.html, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

DLR (2020, Fundament der Energiewende): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende – Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung, veröffentlicht 09.2020, https://www.dlr.de/content/en/downloads/2020/hydrogen-research-study-part-1.pdf?jsessionid=92D-71BE117EA4F33D7AD6B8E5E38B637.delivery-replication1?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

DWV (2020, Jahresrückblick): DWV Jahresrückblick 2019, veröffentlicht im Frühjahr 2020, <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2020/01/JB2019.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Ei-Eskandarany, S. (2020, Storage Materials): Solid-State Hydrogen Storage Nanomaterials for Fuel Cell Applications, in: Mechanical Alloying (Third Edition), 01.05.2020, 229-261, doi: 10.1016/B978-0-12-818180-5.00009-1.

e-mobil BW (2012, Potentiale): Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, veröffentlicht 2012, https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Studien/Systemanalyse/Wasserstoff-Studie_2012.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

e-mobil BW (2014, Energiewende): Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende – Entwicklungsstand und Perspektiven, veröffentlicht 2014, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Meta-Studie_RZ_Web.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

e-mobil BW (2021, Systemvergleich): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte, veröffentlicht am 07.07.2021, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Enagás / Energinet / Fluxys Belgium / Gasunie / GRTgaz / NET4GAS / OGE / ONTRAS / Snam / Swedegas / Teréga (2020, Hydrogen Backbone): European Hydrogen Backbone – How a Dedicated Hydrogen Infrastructure Can Be Created, veröffentlicht 07.2020, https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/07/2020_European-Hydrogen-Backbone_Report.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Energiepark Mainz (2021, Wind zu Gas): Energiepark Mainz – Wenn aus Wind Gas wird, <https://www.energiepark-mainz.de/>, zuletzt aufgerufen am 24.11.2021.

- EnergyCities** (2020, 50 Shades of Hydrogen): 50 Shades of (Grey And Blue And Green) Hydrogen, veröffentlicht am 13.11.2020, <https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Enke, W. / Gruber, M. / Hecht, L. / Staar, B.** (2007, BMW Hydrogen 7): Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7, in: MTZ Motortech Z 68, 446–453 (2007), doi:10.1007/BF03227411.
- ENTSOG AISBL** (2021, Transport and Store): How to Transport And Store Hydrogen – Facts And Figures, veröffentlicht 05.2021, https://www.hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/05/ENTSOG_GIE_HydrogenEurope_QandA_hydrogen_transport_and_storage_FINAL.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Europäische Kommission** (2018, RED II): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen – (Neufassung), veröffentlicht am 11.12.2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1575559881403&uri=CELEX:32018L2001>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Europäische Kommission** (2019, Clean Vehicle Directive): Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge, veröffentlicht am 12.07.2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE>, zuletzt aufgerufen am 21.10.2021.
- Europäische Kommission** (2019, Green Deal): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Ausschuss der Regionen – Der europäische Grüne Deal, veröffentlicht am 11.12.2019, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Europäische Kommission** (2021, Fit Für 55): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – „Fit für 55“: auf dem Weg zur Klimaneutralität – Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030, veröffentlicht am 14.07.2021, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Europäische Kommission** (2021, GreenHyScale): 100 MW Green hydrogen production in a replicable and scalable industrial hosting environment, zuletzt geändert am 15.09.2021, <https://cordis.europa.eu/project/id/101036935>, zuletzt aufgerufen am 22.11.2021.
- Europäische Kommission** (2021, REFHYNE II): Clean Refinery Hydrogen for Europe II, zuletzt geändert am 16.09.2021, <https://cordis.europa.eu/project/id/101036970>, zuletzt aufgerufen am 22.11.2021.
- Europäische Kommission** (2021, GREENH2ATLANTIC): A 100 MW Flexible Green Hydrogen Production Process Sourcing Hybrid Renewable Energy and Supplying Green Hydrogen to Multiple End-Uses, zuletzt geändert am 21.10.2021, <https://cordis.europa.eu/project/id/101036908>, zuletzt aufgerufen am 22.11.2021.
- Europäische Kommission** (2021, Carbon Leakage): Carbon Leakage, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/carbon-leakage_de, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- FCH 2 JU** (2017, ReFuelling): New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots High-Level Techno-Economic Project Summary Report, veröffentlicht 15.03.2017, http://newbusfuel.eu/wp-content/uploads/2015/09/NBF_SummaryReport_download.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- FCH 2 JU** (2017, Business Cases): Study on Early Business Cases for H2 in Energy Storage And More Broadly Power to H2 Applications, veröffentlicht 06.2017, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/P2H_Full_Study_FCHJU.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- FCH 2 JU** (2019, Roadmap Europe): Hydrogen Roadmap Europe – A Sustainable Pathway for the European Energy Transition, veröffentlicht 01.2019, <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/0817d60d-332f-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- FCH 2 JU** (2021, Hydrogen Valleys): Hydrogen Valleys, <https://www.h2v.eu/hydrogen-valleys>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- FERI / WWF** (2017, Dekarbonisierung): Carbon Bubble und Dekarbonisierung – unterschätzte Risiken für Investoren und Vermögensinhaber, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 02.01.2017, Kurzversion unter: <https://www.feri-institut.de/content-center/20170102>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Fraunhofer ISI / ISE / IMWS / IKTS** (2019, Roadmap): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, veröffentlicht 10.2019, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Fraunhofer IWS** (2011, ökologische Bewertung): Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes, veröffentlicht 02.2011, https://pdfdokument.com/energiewirtschaftliche-und-akologische-greenpeace-energy_59f442b01723ddc95017f4cb.html, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Genter, C.** (2015, H2 in Hessen): Wasserstoff in Hessen – Quellen und Senken als Anknüpfungsstellen für eine H2 Infrastruktur, Vortrag auf dem 14. Brennstoffzellenforum Hessen „Vom Windrad aufs Busrad – Synergien zwischen Energiespeicher und ÖPNV“, AMCG Unternehmensberatung GmbH, 10.07.2015, Frankfurt am Main.
- Grimm, V.** (2021, Klimaneutralität): Wirtschaftsweise Grimm – „Ohne den Einsatz von Wasserstoff können wir die Klimaneutralität nicht erreichen“, veröffentlicht am 10.11.2021, <https://www.nzz.ch/amp/wirtschaft/wirtschaftsweise-grimm-ohne-wasserstoff-keine-klimaneutralitaet-id.1654288>, zuletzt abgerufen am 25.11.2021.
- HA Hessen Agentur GmbH** (2016, Stationäre Anwendungen): Stationäre Brennstoffzellen-Anwendungen, veröffentlicht 08.2016, https://www.h2bz-hessen.de/mm/stationre_bz-anwendungen_web.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Handelsblatt** (2021, Mini-Atomkraftwerke): Warum Frankreich auf Mini-Atomkraftwerke setzt, veröffentlicht am 13.11.2021, <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/insight-innovation-warum-frankreich-auf-mini-atomkraftwerke-setzt/27795164.html?ticket=ST-6799393-Bjam1vqvjGibwX-beNXtD-cas01.example.org>, zuletzt aufgerufen am 16.11.2021.
- Hartmann, L./ Lucka, K./ Köhne, H.** (2003, Reforming Technologies): Mixture Preparation by Cool Flames for Diesel-Reforming Technologies, in: Journal of Power Sources Bd. 118, Nr. 1, 25. May 2003, S. 286–297, doi:10.1016/S0378-7753(03)00100-9.

Hydrogen Central (2021, China Roadmap): China – Hydrogen Roadmap: 4 Things to Know, veröffentlicht am 21.07.2021, <https://hydrogen-central.com/china-hydrogen-roadmap-things-to-know/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

iea (2020, Global Review): Global Energy Review 2019 – The Latest Trends in Energy And Emissions in 2019, veröffentlicht 04.2020, https://iea.blob.core.windows.net/assets/dc48c054-9c96-4783-9ef7-462368d24397/Global_Energy_Review_2019.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

iea (2020, Korea Roadmap): Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040, letzte Aktualisierung 14.09.2020, <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

IKEM (2020, Farbenlehre): Wasserstoff-Farbenlehre, Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie, veröffentlicht 12.2020, https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

IRENA (2020, Cost Reduction): Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, veröffentlicht 2020, https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

IRENA (2020, Globaler Ausblick): Wesentliche Erkenntnisse – Globaler Ausblick erneuerbare Energien: Energiewende 2050, Ausgabe 2020, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_2020_findings_DE.pdf?la=en&hash=513F1AF000BF702F8AE61C566501B3DC68208BEA, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Kell, M. / Eichsleider, H. / Trattner, A. (2012, Fahrzeugtechnik): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung, Springer Verlag, Heidelberg, 2018.

Landesregierung RLP (2021, BASF): Wasserstoff-Großprojekte von BASF und Daimler für Bundesförderung ausgewählt – Riesengewinn für Standort, veröffentlicht am 31.05.2021, <https://www.rlp.de/de/aktuelles/einzelansicht/news/News/detail/wasserstoff-grossprojekte-von-basf-und-daimler-fuer-bundesfoerderung-ausgewaehlt-riesengewinn-fuer-standort/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Langhoff, W. (2021, Wasserstoffgipfel): Handelsblatt Wasserstoffgipfel 2021, 26./27.05.2021, <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/wasserstoff/>, zuletzt abgerufen am 11.11.2021.

Lehmann, J. / Luschtinetz, T (2014, H₂ und BZ): Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, Springer Verlag, Heidelberg, 2014.

Mittasch, A. (1951, Ammoniaksynthese): Geschichte der Ammoniaksynthese, Verlag Chemie, Weinheim (Bergstrasse), Februar 1951.

Mortimer, C. E. / Müller, U. (2010, Basiswissen): Chemie: Das Basiswissen der Chemie, Thieme, 10. Edition, 06.10.2010.

MWIDE (2021, REFHYNE): REFHYNE, veröffentlicht 07.2021, <https://www.in4climate.nrw/best-practice/projekte/2019/refhyne/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Natkin, R.J. / Denlinger, A.R. / Younkings, M.A. / Weimer, A.Z (2007, Ford Hydrogene Engine): Ford 6.8L Hydrogen IC Engine for the E-450 Shuttle Van, in: SAE Technical Papers, doi:10.4271/2007-01-4096.

New Zealand Ministry of Foreign Affairs (2020, Japan Roadmap): Japan: Strategic Hydrogen Roadmap, veröffentlicht am 30.10.2020, <https://www.mfat.govt.nz/trade/mfat-market-reports/market-reports-asia/japan-strategic-hydrogen-roadmap-30-october-2020/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

NIP (2011, Entwicklungsplan): Nationaler Entwicklungsplan – Version 3.0, veröffentlicht am 13.10.2011, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/nationaler_entwicklungsplan_version_3.0-nip.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

NOW GmbH (2016, H₂ für die Schiene): Ergebnisbericht, Studie, Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene, veröffentlicht 2016, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/h2-schiene_ergebnisbericht_online.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Ochoa Robles, J. / De-León Almaraz, S. / Azzaro-Pantel, C. (2018, Supply Chain Design): Hydrogen Supply Chain Design: Key Technological Components and Sustainable Assessment, in: Hydrogen Supply Chains, 2018, 37-79, doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00002-6.

Öko-Institut e.V. (2007, Treibhausgasemissionen): Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung, veröffentlicht 03.2007, <https://www.oeko.de/oekodoc/318/2007-008-de.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Opfermann, A. (2021, Wasserstoffgipfel): Handelsblatt Wasserstoffgipfel 2021, 26./27.05.2021, <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/wasserstoff/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2021.

Ostermann, D. (2021, Hydrogen): Experten-Statement in: Digital Drives Hydrogen – H₂ Tech Trend Report, veröffentlicht von P3 group GmbH und Digital Innovation Hub Düsseldorf/Rheinland, erschienen 05.2021, Düsseldorf.

Russwurm, S. (2021, Wasserstoffgipfel): Handelsblatt Wasserstoffgipfel 2021, 26./27.05.2021, <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/wasserstoff/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2021.

Shell Deutschland Oil GmbH (2017, Energie der Zukunft): SHELL Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft? – Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, veröffentlicht 2017, https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e-1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Shell Deutschland Oil GmbH (2020, Wasserstoff Groningen): Europas größtes grünes Wasserstoffprojekt startet in Groningen, veröffentlicht am 27.02.2020, <https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2020/europas-groesstes-gruenes-wasserstoffprojekt-startet-in-groningen.html>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

Siemens Energy / Gascade Gastransport GmbH / Nowega GmbH (2020, Wasserstoffinfrastruktur): Wasserstoffinfrastruktur – tragende Säule der Energiewende, Umstellung von Ferngasnetzen auf Wasserstoffbetrieb in der Praxis, veröffentlicht 2020, <https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/200915-whitepaper-h2-infrastruktur-DE.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

statista (2019, Verwendungszweck): Verwendung von Wasserstoff in Europa nach Verwendungszweck im Jahr 2019 (in TWh), veröffentlicht am 01.02.2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195915/umfrage/verwendung-von-wasserstoff-europa/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.

- statista** (2021, Stromerzeugung): Stromerzeugung aus Kernenergie weltweit in den Jahren 1985 bis 2020, veröffentlicht am 20.07.2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/274954/umfrage/stromerzeugung-aus-kernenergie-weltweit/>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2021.
- Sterner, M. / Stadler, I.** (2017, Energiespeicher): Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration – Ausführliche und umfassende Übersicht über alle Speichertechnologien für die Energiewende, Springer Verlag, Heidelberg, 2017.
- Strom Report** (2021, Strommix): Deutscher Strommix: Stromerzeugung Deutschland bis 2021, <https://strom-report.de/strom/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- tagesschau** (2021, UN-Klimakonferenz): UN-Klimakonferenz in Glasgow – Zu fünf gegen die Atomenergie, veröffentlicht am 11.11.2021, <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/glasgow-eu-staaten-atomenergie-101.html>, zuletzt aufgerufen am 12.11.2021.
- TECS** (2018, Direktreduktionsverfahren): Direktreduktionsverfahren, veröffentlicht am 21.06.2018, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/stahl-erzeugung-herstellung/direktreduktionsverfahren/>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Töpler, J. / Lehmann, J.** (2017, Wasserstoff): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven, Springer Verlag, Heidelberg, 2017.
- Thüga** (2017, Strom zu Gas): Strom zu Gas-Anlage der Thüga-Gruppe hat alle Erwartungen übertroffen, veröffentlicht am 08.08.2017, <https://www.thuega.de/pressemitteilungen/strom-zu-gas-anlage-der-thuega-gruppe-hat-alle-erwartungen-uebertroffen/>, zuletzt aufgerufen am 24.11.2021.
- Umweltbundesamt** (2021, Energieverbrauch): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, veröffentlicht am 10.05.2021, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#anteil-erneuerbarer-energien-am-gesamten-bruttoendenergieverbrauch>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- United Nations** (1992, UNFCCC): United Nations Framework Convention on Climate Change, veröffentlicht am 09.05.1992, <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- United Nations** (2015, Paris Agreement): Convention on Climate Change: Climate Agreement of Paris, 1–27, doi:10.1017/s0020782900004253.
- VDE** (2021, Mobilität 2030): Logistik, Energie und Mobilität 2030, Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität, veröffentlicht 01.2021, <https://www.vde.com/resource/blob/2013758/3e6f90ce5a2bf8baee20f0056bc4f3b9/studie-logistik-mobilitaet-und-energie-2030-data.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Verne, J.** (1999, Insel): Die geheimnisvolle Insel, Arena Verlag, Würzburg, 1999.
- Vision Mobility** (2020, Hydrogen Backbone): Die „European Hydrogen Backbone Initiative“ will Wasserstoff-Infrastruktur schaffen, veröffentlicht am 07.08.2020, <https://vision-mobility.de/news/die-european-hydrogen-backbone-initiative-will-wasserstoff-infrastruktur-schaffen-58023.html>, zuletzt aufgerufen am 11.11.2021.
- Wietschel, M. / Ullrich, S. / Markewitz, P. / Schulte, F./ Genoese, F.** (2015, Energietechnologien): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze, Springer Verlag, Heidelberg, 2015.

Informationen über die Autoren und den Kooperationspartner

Prof. Dr. Birgit Scheppat

Nach dem Studium der Physik an der *Universität Kaiserslautern* und begonnener Promotion, wechselte Frau Scheppat 1987 in die Industrie in den Bereich Dünnschichtphotovoltaik, baute 1989 ein Labor für die Vermessung von Solarzellen auf und beendete ihre Promotion zum Thema „Diamandähnliche Kohlenstoffschichten“. Es folgten diverse Aufgaben im Bereich der Photovoltaik. Dazu gehörte auch die Projektleitung der Solaranlage des ersten Solarwasserstoffprojektes in Neunburg vorm Wald, Bayern. Nach der Ausgründung eines Start-Ups im Bereich Verkehrüberwachungsdetektoren und mehrerer Finanzierungsrunden, wechselte Frau Scheppat zur Firma *W.L. Gore und Associates* in den Bereich New Product Development. Dort entwickelte sie verschiedene neue Produkte und erhielt im Jahr 2000 den *Avantex Award Innovation*. Im gleichen Jahr erhielt Frau Scheppat einen Ruf an die *Hochschule RheinMain* (ehemals Fachhochschule Wiesbaden) in den Bereich Erneuerbare Energie und baute die Teilgebiete Wasserstofferzeugung, -speicherung sowie -nutzung in Brennstoffzellensystemen aus. 2015 leitete sie die wissenschaftliche Begleitung des Projektes *Energiepark Mainz*, der weltweit ersten 6 MW Elektrolyse mittels Strom aus Windenergie. Seither ist sie mit verschiedensten Themen zu Wasserstoff beschäftigt, wobei der Schwerpunkt zunehmend auf dem Thema Speicherung und Distribution liegt. Frau Scheppat ist Gründungsmitglied der hessischen *Wasserstoff und Brennstoffzellen Initiative* (H2BZ) und seitdem im Vorstand. Sie ist ebenfalls Präsidiumsmitglied im *Deutschen Wasserstoff Verband* (DWV).

David Coleman

David Coleman hat Umweltwissenschaften (B.Sc) sowie Umweltmanagement und Stadtplanung in Ballungsräumen (M.Eng) an der *Hochschule RheinMain* studiert und ist seit der Masterthesis über den Gesamtwirkungsgrad von Wind-Wasserstoffelektrolysen (2014) im *Labor für Wasserstofftechnologie* als wissenschaftlicher Mitarbeiter angestellt. In seinem Forschungsprojekt *rHyn-main* befasst er sich mit der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologiediffusion ausgehend vom öffentlichen Personennahverkehr im Rhein-Main Gebiet. Seit 2017 ist er zunächst als Projektingenieur emissionsfreier ÖPNV und später in der Leitung Innovative Projekte bei der *ESWE Verkehrsgesellschaft mbH* in Wiesbaden angestellt, wo er maßgeblich die Beschaffung von 120 Batteriebussen und Ladeinfrastruktur sowie 10 Brennstoffzellenbussen inkl. einer H₂-Tankstelle projektiert hat.

Matthias Werner

Matthias Werner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Projektinitiierung, -entwicklung und Auftragsforschung im *Labor für Wasserstofftechnologie* der *Hochschule RheinMain*. Nach einem Studium der angewandten Physik an der *Hochschule RheinMain*, welches er 2013 mit dem Bachelor of Science mit dem Thema „Vermessung und Simulation von wasserstoffspeichernden Metallhydriden“ abgeschlossen hat. Seine Mitarbeit umfasste die Initiierung von verschiedenen Projekten wie *Clever Electric City*, welche das Ziel hat, mehrere hundert elektrische Ladesäulen in Rüsselsheim zu errichten, oder *cleanEngine*. Hier sollen Komponenten von Brennstoffzellensystemen untersucht werden. Herr Werner ist derzeit Mitglied einer Arbeitsgruppe des DVGW (*Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.*), die sich mit dem Regelwerk um Wasserstoffbefüllanlagen beschäftigt.

Labor für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Seit mittlerweile 40 Jahren wird an der *Hochschule RheinMain* zum Thema Wasserstoff und Brennstoffzellen innerhalb des *Labors für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie* geforscht. Dabei hat sich bereits frühzeitig die Überzeugung herauskristallisiert, dass Wasserstoff (H₂) als integraler Bestandteil der Energie- und Mobilitätswende notwendig ist, um die national und international gesteckten Klimaziele zu erreichen sowie den Hochtechnologiestandort Deutschland in einer Post-Verbrennungskraftmaschinen-Ära zu sichern. Das H₂-Labor zeichnet sich durch angewandte Grundlagenforschung sowie praxisnahe Forschung entlang der gesamten H₂-Wertschöpfungskette von der Erzeugung über die Aufbereitung und Distribution bis hin zur Nutzung in stationären sowie hauptsächlich mobilen Brennstoffzellenanwendungen aus. Dabei erstreckt sich das Projektportfolio von Standortanalysen zur Wasserstoffsourcen- und -quellen-Ermittlung, über die Simulation von Vorgängen in Brennstoffzellenstacks bis hin zu praktischen Tests an Brennstoffzellensystemen und der Systemintegration in batterieelektrische Fahrzeuge. Es bildet somit die Schnittstelle zwischen angewandter Forschung und Entwicklung auf der einen und Lehre bzw. Wissenstransfer in die Breite auf der anderen Seite.

Über die Hochschule RheinMain

Über 70 Studienangebote an zwei Studienorten im RheinMain-Gebiet – das ist die *Hochschule RheinMain*. Rund 13.500 Studierende studieren in den Fachbereichen Architektur und Bauingenieurwesen, Design Informatik Medien, Sozialwesen und Wiesbaden Business School in der Landeshauptstadt Wiesbaden sowie im Fachbereich Ingenieurwissenschaften in Rüsselsheim am Main. Die *Hochschule RheinMain* ist anerkannt für ihre berufsqualifizierende Lehre sowie für ihre anwendungsbezogene Forschung. Diese zeigt sich besonders in den drei profilbildenden Forschungsschwerpunkten zu den Themen „Engineering 4.0“, „Smarte Systeme für Mensch und Technik“ sowie „Professionalität sozialer Arbeit“. Seit 2017 besitzt die *Hochschule RheinMain* das Promotionsrecht für die Fachrichtungen Soziale Arbeit und Angewandte Informatik, seit 2020 das Promotionsrecht für die Fachrichtung Mobilität und Logistik. Gemeinsam mit der *Goethe-Universität Frankfurt am Main* werden zudem zwei Doktorandenkollegs betrieben. Die *Hochschule RheinMain* ist eine weltoffene, durch viele internationale Kontakte gekennzeichnete Hochschule mit Partnerhochschulen auf allen Kontinenten, darunter 80 europäische Partnerhochschulen.

www.hs-rm.de

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Dieser Text dient nur zu Informationszwecken. Er stellt keine Anlageberatung und auch keine Aufforderung zum Kauf oder Verkauf von Wertpapieren, Terminkontrakten oder sonstigen Finanzinstrumenten dar. Eine Investitionsentscheidung hat auf Grundlage eines Beratungsgesprächs mit einem qualifizierten Anlageberater zu erfolgen und auf keinen Fall auf der Grundlage dieser Information.

Potentielle Investoren sollten sich informieren und adäquaten Rat einholen bezüglich rechtlicher und steuerlicher Vorschriften sowie Devisenbestimmungen in den Ländern ihrer Staatsbürgerschaft, ihres Wohnorts oder ihres Aufenthaltsorts, die möglicherweise für die Zeichnung, den Kauf, das Halten, das Tauschen, die Rückgabe oder die Veräußerung jeglicher Investments relevant sein könnten.

Alle Angaben und Quellen werden sorgfältig recherchiert. Für Vollständigkeit und Richtigkeit der dargestellten Information wird keine Gewähr übernommen.

Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Jede weitere Verwendung, insbesondere der gesamte oder auszugsweise Nachdruck oder die nicht nur private Weitergabe an Dritte ist nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung von FERI gestattet. Die nicht autorisierte Einstellung auf öffentlichen Internetseiten, Portalen oder anderen sozialen Medien ist ebenfalls untersagt und kann rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen.

Die angeführten Meinungen sind aktuelle Meinungen, mit Stand des in diesen Unterlagen aufgeführten Datums.

© FERI AG

Bisherige Publikationen im FERI Cognitive Finance Institute:

Studien:



1. Carbon Bubble und Dekarbonisierung (2017)
2. Overt Monetary Finance (OMF) (2017)
3. Die Rückkehr des Populismus (2017)
4. KI-Revolution in der Asset & Wealth Management Branche (2017)
5. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“ (2018)
6. Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, (2018)
7. Wird China zur Hightech-Supermacht? (2018)
8. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2018)
9. Risikofaktor USA (2018)
10. Impact Investing: Konzept, Spannungsfelder und Zukunftsperspektiven (2019)
11. „Modern Monetary Theory“ und „OMF“ (2019)
12. Alternative Mobilität (2019)
13. Digitalisierung – Demographie – Disparität (2020)
14. „The Great Divide“ (2020)
15. Zukunftstrend „Alternative Food“ (2020)
16. Digitalisierung – Demographie – Disparität, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2020)
17. „The Great Progression“ (2021)
18. „Blockchain und Tokenisierung“ (2021)
19. „The Monetary Supercycle“ (2021)
20. Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft (2022)

Cognitive Comments:



1. Network Based Financial Markets Analysis (2017)
2. Zwischen Populismus und Geopolitik (2017)
3. „Neue Weltordnung 2.0“ (2017)
4. Kryptowährung, Cybermoney, Blockchain (2018)
5. Dekarbonisierungsstrategien für Investoren (2018)
6. Innovation in blockchain-based business models and applications in the enterprise environment (2018)
7. Künstliche Intelligenz, Quanten-Computer und Internet of Things – Die kommende Disruption der Digitalisierung (2019)
8. Quantencomputer, Internet of Things und superschnelle Kommunikationsnetze (2019)
9. Was bedeutet die CoViD19-Krise für die Zukunft? (2020)
10. Trouble Spot Taiwan – ein gefährlich unterschätztes Problem (2021)
11. Urban Air Mobility – Flugdrohnen als Transportmittel der Zukunft (2021)

Cognitive Briefings:



1. Ressourcenverbrauch der Digital-Ökonomie (April 2020)
2. Globale Bifurkation oder „New Cold War“? (Mai 2020)
3. Digitaler Euro: Das Wettrennen zwischen Europäischer Zentralbank und Libra* Association (Dezember 2020)
4. Herausforderung „Deep Fake“ (Dezember 2021)



Erkennen ist mehr als Sehen

Erkenntnisgewinn beruht auf Vernetzung. Wir bringen hochkarätige Experten zusammen und analysieren systemrelevante Themenstellungen.

Das FERI Cognitive Finance Institute versteht sich als kreativer Think Tank und beantwortet wirtschaftliche und strategische Fragestellungen.

Vorausschauend. Innovativ. Strategisch.

Erfahren Sie mehr auf unserer Webseite www.feri-institut.de



Erkenntnisse der Cognitive Finance
ISSN 2567-4927

FERI AG | FERI Cognitive Finance Institute
Das strategische Forschungszentrum der FERI Gruppe
Haus am Park
Rathausplatz 8 – 10
61348 Bad Homburg v.d.H.
T +49 (0)6172 916-3631
technik@feri-institut.de
www.feri-institut.de



Hochschule **RheinMain**

Hochschule RheinMain
Labor für Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie
Am Brückweg 26
65428 Rüsselsheim
www.hs-rm.de