Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland

C. Hebling, M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller, T. Pfeifer, P. Plötz, O. Ranzmeyer, A. Schaadt, F. Sensfuß, T. Smolinka, M. Wietschel

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

unter Beteiligung von

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden

Karlsruhe und Freiburg
Oktober 2019

Kontakt:

Prof. Dr. Christopher Hebling, Fraunhofer ISE, christopher.hebling@ise.fraunhofer.de
Prof. Dr. Mario Ragwitz, Fraunhofer ISI, mario.ragwitz@isi.fraunhofer.de

INHALTSVERZEICHNIS

EXECUTIVE SUMMARY 1

1.1 MOTIVATION 1

1.2 NATIONALE UND GLOBALE BEDEUTUNG VON WASSERSTOFF 1

1.3 SEKTORALE FORSCHUNGSBEDARFE 2

1.4 WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG UND HANDLUNGSOPTIONEN 3

2 EINFÜHRUNG 6

3 ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFF-BEDARF IN DEUTSCHLAND UND EUROPA 8

4 WASSERSTOFF-ROADMAPS 12

4.1 ELEKTROLYSE 12

4.1.1 Zukünftiger Bedarf an Elektrolyseuren 12
4.1.2 Stand der Technologie 12
4.1.3 Marktentwicklung 13
4.1.4 F&E-Bedarf 13
4.1.5 Politik und Regulierung 14
4.1.6 Alternative Pfade zur CO_2-armen Wasserstoff-Herstellung 15
4.1.7 Roadmap für die Elektrolyse 17

4.2 INDUSTRIE 18

4.2.1 Stahlherstellung 19
4.2.1.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf 19
4.2.1.2 Stand der Technologie 20
4.2.1.3 F&E-Bedarf 20
4.2.2 Chemische Industrie und Raffinerietechnik 21
4.2.2.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf 21
4.2.2.2 Stand der Technologie und Infrastrukturen 21
4.2.2.3 Handlungsfelder/Forschungsbedarf 24
4.2.2.4 Politik/Regulierung 24
4.2.3 Roadmap Wasserstoff für die Industrie 25

4.3 VERKEHR UND MOBILITÄT 27

4.3.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf 27
4.3.2 Stand der Technologie und Infrastrukturen 28
4.3.3 Marktentwicklung 28
4.3.4 F&E-Bedarf 28
4.3.5 Politik/Regulierung 29
4.3.6 Roadmap für den Verkehr 30

4.4 GEBÄUDE 33

4.4.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf 33

4.4.2 Stand der Technologie und Infrastrukturen ... 34
4.4.3 Marktentwicklung ... 35
4.4.4 F&E-Bedarf ... 35
4.4.5 Politik/Regulierung ... 35

4.5 STROMERZEUGUNG ... 35
4.5.1 Stand der Technologie und Infrastrukturen ... 36
4.5.2 F&E-Bedarf ... 36
4.5.3 Politik/Regulierung ... 36

4.6 SEKTORENÜBERGREIFENDE ASPEKTE ... 36

5 INTERNATIONALE DIMENSION ... 39

5.1 GLOBALE WASSERSTOFF-PRODUKTION ... 41

5.2 EXPORTPOTENZIAL FÜR DIE EUROPÄISCHE INDUSTRIE ... 41

6 QUELLEN ... 43

ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Roadmap Wasserstoff in Deutschland ... 5

Abbildung 2: Wasserstoff-, PtCH4- und PtL-Nachfrage in Deutschland in 2050 ... 9

Abbildung 3: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoffnachfrage und die Elektrolysekapazität, für die Regionen Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050 ... 11

Abbildung 4: Roadmap für die Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse und alternative Verfahren ... 17

Abbildung 5: Wasserstoff-Nachfrage und -Angebot weltweit (Quelle: IEA 2019) ... 21

Abbildung 6: Roadmap für die Industrie ... 26

Abbildung 7: Roadmap Wasserstoff im Verkehr ... 32

TABELLEN

Tabelle 1: Auflistung der Szenarien, mit Kurzbeschreibung sowie Angaben zu PtCH4- und PtL-Nachfrage in Deutschland im Jahr 2050 ... 9

Tabelle 2: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoff-Nachfrage und die Elektrolyse-Kapazität, für die Regionen Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050 ... 10

Tabelle 3: Wasserstoff-Nachfrage und Elektrolyse-Kapazität in der Stahlindustrie, für Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050 20

Tabelle 4: Wasserstoff-Nachfrage für Straßenverkehr 2030 und 2050 in Deutschland (nach eigenen Abschätzungen und NOW 2018a) 27

ABKÜRZUNGEN UND FACHBEGRIFFE

ATR	Autothermal Reforming
AEL	Alkalische Elektrolyse
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
DRI	Direct Reduced Iron
EE	erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus
F&E	Forschung & Entwicklung
H_2	Wasserstoff
HRS	Hydrogen Refueling Station
LNG	Liquified Natural Gas
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
MFH	Mehrfamilienhaus
NO_x	Stickoxide
PEM	Proton Exchange Membrane
Pt	Platin
$PtCH_4$	synthetisches Methan
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid, synthetische Flüssigkraftstoffe
PtX	Power-to-X
RED II	Renewable Energy Directive II
SMR	Steam Methane Reforming
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell (Festoxidelektrolysezelle)
THG	Treibhausgas

EXECUTIVE SUMMARY

1.1 MOTIVATION

Um die globale Herausforderung der Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 2 °C zu bewältigen, muss der Anteil der fossilen Energieträger in globalen Energiesystemen auf ein Minimum reduziert werden. Anstelle von fossilen Energieträgern muss deshalb eine nachhaltige Energiekreislaufwirtschaft installiert werden, die in erheblichem Maß auf Wasserstoff basiert. Hinzu kommen auch künftig in einigen Sektoren große Mengen von Kohlenwasserstoffen, die dann jedoch mithilfe von erneuerbaren Energien sowie treibhausgasneutralem Wasserstoff und Kohlenstoff produziert werden. Insofern können Energiesysteme nicht dekarbonisiert werden, sondern müssen dem Anspruch der Treibhausgasneutralität genügen. In Deutschland wurde dieser Prozess bereits im Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und 2010 durch das Energiekonzept der Bundesregierung initiiert. Dies hat zu einem Anteil von erneuerbaren Energien im Strommix von etwa 38 % (2018) geführt. Allerdings wird jetzt zunehmend deutlich, dass Wasserstoff und dessen weitere Syntheseprodukte eine zentrale Rolle zur Treibhausgasneutralität aller energieverbrauchenden Sektoren wie bspw. Verkehr, Industrie und Gebäude einnehmen werden. Wasserstoff erfährt neben der direkten Nutzung in den verschiedenen Anwendungsgebieten durch seine hohe Speicher- und Transportierbarkeit auch eine zunehmende Bedeutung für die Systemintegration von erneuerbaren Energien.

Wasserelektrolyse wird zu einer entscheidenden industriepolitischen Komponente werden, einerseits zur Erzeugung von Anteilen des benötigten Wasserstoffs, andererseits als Flexibilitätsoption im deutschen Stromnetz, aber auch als Kerntechnologie der Energiewende für den internationalen Exportmarkt. Wasserstoff kann einen entscheidenden Beitrag zur Treibhausgasneutralität der Sektoren Industrie und Verkehr leisten und auch in Gebäuden und bei der Rückverstromung Teil der Lösung sein, wenn die entsprechenden marktpolitischen Anreize mit dem Ziel einer deutlichen Lenkungswirkung gesetzt werden.

1.2 NATIONALE UND GLOBALE BEDEUTUNG VON WASSERSTOFF

Studien gehen von einem Markthochlauf der Wasserelektrolyse allein in Deutschland zwischen 50 und 80 GW im Stromnetz bis 2050 aus. Damit dieser gelingt, müssen jetzt zweistellige MW-Elektrolyseure installiert und bis Ende der 20er-Jahre bereits Zuwachsraten von etwa 1 GW pro Jahr erreicht werden. Wasserelektrolyseure werden darüber hinaus großmaßstäblich in Regionen ihren Einsatz finden, in denen die Stromgestehungskosten durch PV- und Windanlagen bei unter 3 ct/kWh liegen und darüber hinaus die Volllaststundenzahl solcher Anlagenparks über 4000 h/Jahr beträgt. Dies ermöglicht den Eintritt in einen globalen erneuerbaren Energien-Handel, da sowohl Wasserstoff als auch darauf aufbauende Syntheseprodukte zu international konkurrenzfähigen Kosten hergestellt werden können.

Somit ermöglicht Wasserstoff neben der Umsetzung nationaler Industriepolitik- sowie Nachhaltigkeitsziele auch die Fortführung der globalen Energiewende. Letztlich muss auch auf globaler

Ebene das Erzeugungsangebot durch Solar- und Windkraftanlagen in hierfür bevorzugten Regionen mit dem Bedarf an Energieträgern, Kraftstoffen und Basischemikalien in den entsprechenden Industrieregionen in Einklang gebracht werden. Wasserstoff kann in flüssiger Form in Analogie zu LNG (Liquified Natural Gas) direkt transportiert werden sowie in chemisch gebundener Form wie Ammoniak, Methanol oder auch LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

Viele Regionen in der Welt bereiten sich auf diese Form des Handels nachhaltig erzeugter Energieträger und Basischemikalien vor, was für Deutschland neue Energiepartnerschaften jenseits der bisherigen fossilen Energiepartnerschaften ermöglicht. Zur Realisierung derartiger Handelsrouten kommt den internationalen Häfen und deren angrenzenden Industrieregionen eine große Bedeutung zu, da hier häufig nicht nur Raffinieren angesiedelt sind, sondern auch über die Logistikrouten eine Verteil-Infrastruktur der Wasserstoff-Produkte gegeben ist.

1.3 SEKTORALE FORSCHUNGSBEDARFE

In der Wasserstoff-Erzeugung ist *Elektrolyse* die zentrale Technologie. Hier bedarf es einer Kostensenkung auf unter 500 €/kW durch kontinuierliche F&E-Anstrengungen und Skaleneffekte sowie Automatisation in der Produktion. In der Entwicklung stehen angepasste Zellmaterialien zur Erhöhung der Leistungsdichte, Effizienz und Lebensdauer sowie die Senkung des spezifischen Bedarfs kritischer Materialien und die Optimierung des Energiebedarfs bei flexibler und dynamischer Betriebsweise im Vordergrund. Für die Marktdurchdringung muss der Aufbau eines GW-Marktes in Deutschland bis 2030 erfolgen. Dies umfasst insbesondere die Etablierung von Zulieferketten und den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Elektrolyse-Industrie, auch zur Bedienung des internationalen Marktes. Politische Handlungsmöglichkeiten für eine erfolgreiche Wasserstoff-Industrie in Deutschland bestehen unter anderem in der Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen für die Installation und den Strombezug von Elektrolyseuren, in der Schaffung von Instrumenten zur Nachfrage-Erhöhung nach grünem Wasserstoff sowie der Umsetzung der RED II in nationales Recht.

Eine verstärkte Nutzung von *Wasserstoff in der Industrie* erfordert weiteren Forschungsbedarf. Bspw. bedarf es der Untersuchung von flexibel betreibbaren Anlagen, die mit wechselnden Feedstocks und Volumenströmen zurechtkommen, der Untersuchung der Methanpyrolyse sowie einer Analyse der Auswirkungen der Feedstock-Änderungen auf cross-industrielle Materialflüsse. Verfahren zur Abtrennung von CO_2 sind noch nicht ausreichend verstanden. Für den industriellen Einsatz ist zudem der Ausbau des Wasserstoff-Pipeline-Netzes insbesondere entlang des Rheins notwendig, da dort zentrale und große Verbraucher angesiedelt sind (Chemieindustrie, Raffinerien, Stahlindustrie etc.). Parallel könnte die Errichtung großskaliger Demonstrationsanlagen zur Durchführung industrienaher Forschungsvorhaben erfolgen, die Aspekte des Scale-ups von PtX-Prozessen sowie deren Integration in bestehende industrielle Infrastrukturen adressieren. Der regulatorische Rahmen muss so angepasst werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb mittels grünem Wasserstoff darstellbar ist. Darüber hinaus erfordert die Markteinführung neuer Herstellungsverfahren in industriellem Maßstab ein sehr hohes Maß an regulativer Planungssicherheit.

Für *Wasserstoff im Verkehr* sind eine deutliche Weiterentwicklung von Brennstoffzellen-Antrieben und der Aufbau eine Betankungs-Infrastruktur erforderlich. Dafür könnten wesentliche F&E-Aspekte der Produktions- und Speichertechnologien sowie Systemtests in „nationalen Technologieplattformen" gebündelt werden, um die öffentlichen Fördermittel zu konzentrieren. Der Ausbau der Betankungsinfrastruktur sollte für Pkw und Lkw erfolgen, dabei ist zu beachten, dass Lkw deutlich andere Anforderungen hinsichtlich Wasserstoff-Mengen und grenzüberschreitendem Verkehr haben. Mögliche politische Handlungsoptionen umfassen eine Förderung der Brennstoffzellen-Mobilität und Wasserstoff-Betankung sowie die Vorreiterrolle der öffentlichen Hand in der Beschaffung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Offen ist zudem die regulatorische Anerkennung von Wasserstoff als Kraftstoff statt als Industriegas.

Die *Stromerzeugung auf Basis von Wasserstoff* ist kein zentraler Treiber für die Entwicklung der Wasserstoff-Wirtschaft. Der Sektor kann sowohl weitgehend entwickelte Gasturbinen einsetzen als auch Brennstoffzellen, sofern diese durch die Entwicklung anderer Sektoren günstig verfügbar sind. Außerdem ist zu beachten, dass der Stellenwert von Wasserstoff entsprechend berücksichtigt wird. Dieser Wert ergibt sich durch die Flexibilität der Fahrweise von Elektrolyseuren sowie die gute Speicherbarkeit von großen Mengen an Wasserstoff, was zur besseren Systemintegration von erneuerbaren Energien beiträgt. Dies gilt auch für den Beitrag von Wasserstoff für die Versorgungssicherheit.

Der *Gebäudesektor* generiert kurz und mittelfristig keinen relevanten Wasserstoffbedarf. Langfristig kann es unter bestimmten Rahmenbedingungen (bei langsamem Ausbau von Windenergieanlagen sowie eingeschränkter Verfügbarkeit von CO_2-neutralem Stromimport) zu einem steigenden Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff im Gebäudesektor kommen.

1.4 WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG UND HANDLUNGSOPTIONEN

Bei einer betriebswirtschaftlichen Bewertung von Wasserstoff spielen die regulatorischen Rahmenbedingungen, gesetzt durch Abgaben, Umlagen und Steuern auf Strom, Gas und andere Energieträger, eine sehr relevante Rolle. Die regulatorischen Rahmenbedingungen sind bisher im Regelfall sektorspezifisch definiert und fallen in der Höhe zum Teil sehr unterschiedlich aus. Erschwerend kommt hinzu, dass heutige regulatorische Rahmenbedingungen verschiedene Zielsetzungen verfolgen, die zu einer hohen Komplexität der Rahmenbedingungen führen.

Gerade die hohe Belastung von Strom mit Abgaben und Steuern begrenzt derzeit den Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff aus einer betriebswirtschaftlichen Perspektive, obwohl es sich aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive durchaus anders darstellen kann. Ein mögliches Zielmodell für die regulatorischen Rahmenbedingungen sollte daher sowohl zu einem ökonomisch effizienten Gesamtsystem als auch zu einer weitgehenden Internalisierung von Umweltkosten (u. a. durch CO_2-Emissionen) führen und ist grundsätzlich technologieoffen auszugestalten.

Weiterhin sind Anforderungen an eine Technologieförderung zu stellen. Aufgrund eines hohen Infrastrukturbedarfs sowie Pfadabhängigkeiten ergeben sich relevante Markteintrittsbarrieren für erneuerbaren Wasserstoff. Auch bei gegebenen Kostenvorteilen aus Gesamtsystemsicht

kann sich die Diffusion daher verzögern. An dieser Stelle sind regulatorische Eingriffe zur Technologieförderung denkbar und sollten geprüft werden. Hierdurch sind weitere Innovationen und Kostenreduktionen zu realisieren.

Zur Realisierung eines internationalen Handelssystems von erneuerbaren Energien auf Wasserstoffbasierten Produkten sind folgende Themen von Bedeutung:

- Die Technologiebasis der gesamten Wertschöpfungskette existiert, jedoch muss weiterhin in Forschung investiert werden, um die Kosten zu reduzieren und die Langlebigkeit der Produkte weiter zu erhöhen.
- Es müssen international harmonisierte und zertifizierte Standards für wasserstoffbasierte Energieträger und Chemikalien entwickelt werden.
- Die Systemanalyse liefert wichtige Informationen über die zu erwartenden Geschäftsmodelle in den Gesamtketten.
- Energiepartnerschaften mit Ländern mit hohen Ausbaupotenzialen erneuerbarer Energien schaffen eine langfristig attraktive Investitionsumgebung.
- Internationale Forschungskooperationen und Energiepartnerschaften sind Voraussetzung für langfristige Handelsbeziehungen.

Weiterhin müssen regulatorische Rahmenbedingungen auch immer industriepolitische Effekte oder internationale Wettbewerbssituationen berücksichtigen. Eine frühzeitige Technologieentwicklung erlaubt es, Wettbewerbsvorteile und Exportchancen und damit positive industriepolitische Effekte zu realisieren. Deutschland ist derzeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette bei Wasserstoff von Erzeugung bis Nutzung durch die Brennstoffzelle gut aufgestellt und sollte diese Marktstellung deshalb nutzen.

Wichtige Forschungs- und Entwicklungsschritte auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Wirtschaft in Deutschland sind in folgender Roadmap dargestellt.

Abbildung 1: Roadmap Wasserstoff in Deutschland

2 EINFÜHRUNG

Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung (BMU 2018) und die für die Europäische Union abgeleiteten Ziele des Übereinkommens der UN-Klimakonferenz von Paris geben für Deutschland eine klare Roadmap in Bezug auf CO_2-Reduktionsziele vor:

- die Verringerung der Treibhausgasemissionen um 55 % bis 2030 und um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber dem Niveau von 1990
- weitgehende Treibhausgasneutralität aller Sektoren (mit Ausnahme der Landwirtschaft) bis zur Mitte des Jahrhunderts.

Diese ambitionierten Ziele schaffen in Bezug auf Wasserstoff Fakten:

- Wasserstoff wird als Grundbaustein gasförmiger und flüssiger Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien unumgänglich für alle Nutzungen, in denen direkte Stromnutzung technisch oder wirtschaftlich nicht möglich oder sinnvoll ist.
- Treibhausgasneutralität aller Energiesektoren gelingt nur durch eine gezielte Sektorenkopplung. Elektrolyse ist hierbei ein zentrales Verfahren und Wasserstoff Bindeglied zwischen der elektrischen und der stofflichen Welt.

Neben der direkten Wasserstoff-Nutzung in den jeweiligen Anwendungen erlangen auch synthetische hergestellte Chemikalien und Kraftstoffe (Power-to-Gas PtG, Power-to-Liquid PtL) einen hohen Stellenwert[1]. Gleichzeitig wird in Deutschland der Energieimport in Form von Strom und stofflichen Energieträgern eine wesentliche Rolle spielen, denn der deutsche Energiebedarf übertrifft den energiewirtschaftlich geeigneten Ausbau an erneuerbaren Energien nach derzeitigem Erwartungswert um das Zweifache[2]. Da Wasserstoff aus einer Vielzahl an Energiequellen[3] hergestellt werden kann, er vergleichsweise gut speicherbar ist und die Abhängigkeit von zunehmend teurer werdenden fossilen Energieressourcen verringert, werden Wasserstoff und wasserstoffbasierte synthetische Energieträger beim Energieimport rasch an Stellenwert gewinnen. Wasserstoff kann außerdem zur Systemintegration von fluktuierenden erneuerbaren Energien beitragen, da Elektrolyseure im Verteilnetz gut steuerbar sind und Wasserstoff in großen Mengen günstig gespeichert werden kann. Der Einsatz in Brennstoffzellen, in Gasturbinen bzw. Verbrennungsmotoren ermöglicht weiterhin die emissionsfreie Bereitstellung von Nutzenergie in Form von Strom und Wärme.

1 Wasserstoff als Zwischenprodukt für die Herstellung von kohlenstoffbasierten flüssigen und gasförmigen Energieträgern, die in manchen Anwendungen wie dem internationalen Flug- und Schiffsverkehr essentielle Zukunftsoptionen zur Substitution fossiler Energieträger darstellen.

2 Die nach heutigem Ermessen im globalen Wettbewerb energiewirtschaftlich sinnvoll realisierbaren Potenziale erneuerbarer Energien in Deutschland liegen bei etwa 1000 TWh/a. Der Primärenergiebedarf beläuft sich in den nächsten Jahren auf 2000 bis 2500 TWh/a.

3 Photovoltaikstrom und Windenergie sowie Elektrolyse, Methanpyrolyse, Reformierung inkl. CO_2-Abscheidung bzw. -Nutzung von Biomasse

In diesem Positionspapier skizzieren Fraunhofer ISE und Fraunhofer ISI unter Beteiligung von Fraunhofer IMWS und IKTS einen möglichen Pfad für die Einführung und Entwicklung der Wasserstoff-Wirtschaft in den verschiedenen Anwendungsfeldern Industrie, Mobilität, Gebäude und Prozessindustrie. Die heutige Marktsituation und das Marktpotenzial von Wasserstoff werden aufgezeigt sowie der Stand der relevanten Technologien beschrieben und der sich daraus ableitende F&E-Bedarf dargestellt. Verschiedene Pfade des Markthochlaufes werden skizziert und mögliche Maßnahmen der Politik und Regulierung vorgeschlagen, die zur Realisierung dieser Marktentwicklung ergriffen werden können.

Die vorliegende Roadmap legt dabei den Fokus auf ein Szenario, in dem Wasserstoff neben den direktelektrischen Anwendungen und der Energieeffizienz eine wichtige Rolle spielt. Szenarien, die ein besonders hohes Gewicht auf die Elektrifizierung der Endenergiesektoren sowie Stärkung der Energieeffizienz legen, werden im folgenden Kapitel hinsichtlich des notwendigen Wasserstoff-Bedarfs vergleichend dargestellt.

3 ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFF-BEDARF IN DEUTSCHLAND UND EUROPA

Zur Erreichung des Klimaschutzziels einer 95-%-Treibhausgasminderung ist der Einsatz von Wasserstoff aus heutiger Sicht unumgänglich. Zum jetzigen Zeitpunkt aber spielt Wasserstoff für die Direktnutzung sowie zur Weiterverarbeitung im Energiesystem kaum eine Rolle. Derzeit wird Wasserstoff nahezu ausschließlich aus fossilen Quellen (Erdgas/Kohle) hergestellt (weltweit ca. 70 Mio. t/a zzgl. 48 Mio. t/a als Beiprodukt) (IEA 2019).

Nur ca. 5 % dieser Menge werden derzeit gehandelt. Somit gibt es gegenwärtig keinen signifikanten Transport von Wasserstoff. Derzeit wird Wasserstoff in stationär betriebenen Anlagen unter Nennlast, d.h. im optimalen Betriebspunkt, hergestellt.

Die herkömmliche Wasserstoffproduktion mittels Reformierung von fossilen Quellen, primär Erdgas, verursacht Treibhausgasemissionen. Für eine 95-%ige Treibhausgasminderung muss also auf alternative Produktionsverfahren zurückgegriffen werden. Das präferierte Verfahren ist die Wasserelektrolyse, da sie die elektrische Welt mit der stofflichen verbindet und langfristig Wind- und Solarenergie die wichtigsten Energiequellen sein werden. Die Methanpyrolyse könnte kurzfristig eine wichtige Rolle spielen, wenn es gelingt, sie zur benötigten technologischen Reife zu führen und ihren wirtschaftlichen Betrieb nachzuweisen. Entscheidend ist es dabei, für die endotherme Spaltung des Methans bei der Methanpyrolyse nur erneuerbare Energien einzusetzen sowie sicherzustellen, dass der Kohlenstoff, der bei der Pyrolyse entsteht, anschließend nicht in die Atmosphäre gelangt. Unter der Annahme, dass dem erneuerbaren Wasserstoff zukünftig eine größere Rolle zugesprochen wird, sind der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur (Erhöhung der Erzeugungs-, Transport- und Speicherkapazitäten) sowie eine Anpassung der Anwendungstechnologien unabdingbar.

Wie eine Roadmap für eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und der EU aussehen soll, kann anhand von Szenarien beschrieben werden. Manche Szenarien gehen von einer vollelektrifizierten Welt aus, mit nur geringen Anteilen an stofflichen Energieträgern. In diesen Szenarien („Szenario A“) wird eine weitgehende Elektrifizierung aller Sektoren unterstellt. In den weiteren Abschnitten dieses Papiers gehen wir aber von einem „Szenario B“ aus, in welchem größere Anteile an stofflichen Energieträgern zum Einsatz kommen. Diese sind aber nicht mehr fossilen Ursprungs, sondern Erdgas, Erdöl und Kohle werden durch klimaneutrale gasförmige Energieträger, wie Wasserstoff und synthetisches Methan, sowie durch synthetische Flüssigkraftstoffe substituiert.

In der Literatur lassen sich deutlich divergierende Angaben zum künftigen Bedarf an Wasserstoff finden, was typischerweise durch unterschiedliche Annahmen und Randbedingungen begründet ist. Tabelle 1 sowie Abbildung 2 führen zentrale Szenarien relevanter Studien der letzten Jahre auf. Für ein besseres Verständnis der Werte werden diese Szenarien der unterschiedlichen Studien in der Tabelle 1 kurz erläutert und die Nachfrage an synthetischem Methan ($PtCH_4$) und synthetischen Flüssigkraftstoffen (PtL) angegeben.

Tabelle 1: Auflistung der Szenarien, mit Kurzbeschreibung sowie Angaben zu PtCH4- und PtL-Nachfrage in Deutschland im Jahr 2050

Studie	Szenario	Beschreibung	Wasserstoff-Nachfrage 2050	Nachfrage $PtCH_4$ und PtL in 2050
NOW (2018a)	S85 S90 S95	80-95-%-CO_2-Reduktionsziel in 2050, Stromimport generell möglich sowie Import synthetischer Kraftstoffe ab 2025	S85: 402 TWh S90: 522 TWh S95: 433 TWh	S85: 126 TWh gesamt S90: 230 TWh gesamt S95: 645 TWh gesamt
Dena (2018)	EL95 TM95	EL95: Elektrifizierungsszenario mit 95-%-Reduktion TM95: Technologiemix-Szenario mit 95-%-Reduktion	TM80: 169 TWh H_2 TM95: 169 TWh H_2	EL95: 321 TWh $PtCH_4$ und 43 TWh PtL TM95: 630 TWh $PtCH_4$ und 108 TWh PtL
BDI (2018)	95-%-Pfad	95-%-Reduktion	25 TWh	383 TWh $PtCH_4$ PtL

Abbildung 2: Wasserstoff-, PtCH4- und PtL-Nachfrage in Deutschland in 2050

Um die Wasserstoff-Nachfrage unter Berücksichtigung des Wasserstoff-Bedarfs für $PtCH_4$ und PtL sowie der angenommenen Importe decken zu können, muss eine entsprechende Kapazität an Elektrolyseuren aufgebaut werden. In den genannten Szenarien der IEK2050-Studie (NOW 2018a) wird diese benötigte Elektrolyseur-Kapazität in Deutschland mit einer Bandbreite von 65 bis 110 GW für das Jahr 2050 angegeben. Die Dena (2018) geht von Elektrolyse-Kapazitäten von 16 GW in 2030 bzw. 53 bis 63 GW in 2050 aus. In beiden Studien beziehen sich diese Kapazitäten nur auf die nationale Erzeugung, der restliche Bedarf an synthetischen Energieträgern wird über Importe gedeckt. In der BDI-Studie erfolgt eine techno-ökonomische Optimierung über alle Sektoren, die zu moderaten Bedarfen an synthetischen Brennstoffen von etwa 368 TWh und einer nationalen Erzeugung von 25 TWh führt.

Unter sorgfältiger Analyse der in den Studien getroffenen Annahmen und der verwendeten Methodik wird die Bandbreite der in Tabelle 2 und Abbildung 3 dargestellten Werte für die Wasserstoff-Nachfrage und die Elektrolyse-Kapazität für die Regionen Deutschland und EU für plausibel erachtet und soll daher für die Erstellung der Wasserstoff-Roadmap verwendet werden. Die Wasserstoff-Nachfrage schließt dabei die Direktnutzung von Wasserstoff, z. B. für Niedertemperaturwärme und Brennstoffzellen-Fahrzeuge, sowie für die Weiterverarbeitung zu synthetischen Brenn- und Kraftstoffen ein.[4]

Tabelle 2: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoff-Nachfrage und die Elektrolyse-Kapazität, für die Regionen Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050

Parameter	Region	2030		2050	
		Szenario A	Szenario B	Szenario A	Szenario B
Wasserstoff-Nachfrage (TWh)	Deutschland	4	20	250	800
	EU	30	140	800	2250
Elektrolyse-Kapazität (GW)	Deutschland	1	5	50	80
	EU	7	35	341	511

4 Annahmen für diese Werte sind: Wasserstoff-Nachfrage DE 2050: Untere Bandbreite aus Basis von Bottom-up-Schätzung durch Fraunhofer ISI und obere Bandbreite nach UBA (2019); Elektrolyse-Kapazität DE 2050 nach UBA (2019) sowie Meta-Analyse von Fraunhofer-CINES. Für die EU 2050: EU COM Roadmap & FCH und für EU 2030 und DE 2030: Analysen zur Diffusion Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk AG3.

Abbildung 3: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoffnachfrage und die Elektrolysekapazität, für die Regionen Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050

4 WASSERSTOFF-ROADMAPS

4.1 ELEKTROLYSE

Da die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse der zentrale Wandlungsschritt zwischen dem elektrischen Energiesystem und den nachgelagerten Anwendungssektoren ist, wird in diesem Abschnitt auf die Technologie gesondert eingegangen. Ferner werden alternative Herstellungsverfahren für Wasserstoff betrachtet, die zukünftig eine Rolle spielen können.

4.1.1 ZUKÜNFTIGER BEDARF AN ELEKTROLYSEUREN

Der zukünftige Bedarf an Elektrolyseuren zur Wasserstofferzeugung leitet sich im Wesentlichen aus dem zukünftigen Wasserstoffbedarf ab, da die Elektrolyse als die zentrale Technologie zur Wasserstofferzeugung betrachtet wird. Aus nationaler Sicht muss dabei unterschieden werden, ob die benötigte Menge an Elektrolyseuren in Deutschland errichtet und betrieben wird, oder aber die Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse an bevorzugten EE-Standorten erfolgt und der Energieträger dann importiert wird. Wie Kapitel 2 zeigt, werden auch unter der Annahme von Wasserstoff-Importen im größeren Umfang Elektrolyse-Kapazitäten in Deutschland benötigt. Als Orientierung kann von einem Bedarf in Deutschland in der Größenordnung von 50 bis 80 GW an installierter Elektrolyse-Leistung für das Jahr 2050 ausgegangen werden. Dies entspricht einer Produktionskapazität von 1000 bis 1600 Tonnen Wasserstoff pro Stunde. In der durch das BMVI beauftragten IndWEDe-Studie (NOW 2018) wurde zudem in verschiedenen Szenarien die in Deutschland maximal benötigte Elektrolyse-Leistung ermittelt, wenn auf Importe von stofflichen Energieträgern weitestgehend verzichtet wird. Für das Jahr 2030 ergibt sich in diesen Szenarien eine Bandbreite von 7 bis 71 GW und für das Jahr 2050 von 137 bis 275 GW. Unabhängig vom Standort der Elektrolyse wird damit eine leistungsfähige Elektrolyse- und Zulieferindustrie benötigt, die in der Lage ist, bereits Anfang der 2020er-Jahre 1- 5 GW pro Jahr an Elektrolyseuren herzustellen. Für die folgenden Jahrzehnte muss sich dann die Herstellkapazität auf mehrere GW pro Jahr erhöhen. Hierin inbegriffen ist noch nicht der weitere internationale Bedarf an Elektrolyseuren, sodass in Summe von einem wachstumsstarken Markt mit hohen Exportchancen ausgegangen werden kann.

4.1.2 STAND DER TECHNOLOGIE

Zur Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse sind prinzipiell mehrere Verfahren nutzbar. Die alkalische Wasserelektrolyse mit flüssiger Kalilauge und die saure Membran- oder auch PEM-Elektrolyse (PEM: Proton Exchange Membran) arbeiten bei niedrigen Temperaturen zwischen 50 und 80 °C. Die Hochtemperatur- oder auch Dampfelektrolyse nutzt einen Festoxid-Elektrolyten aus keramischen Materialien und wird bei ca. 800 °C betrieben.

Die alkalische Elektrolyse ist ein seit Ende des vorletzten Jahrhunderts industriell genutztes Verfahren und erreichte bereits im 20. Jahrhundert im stationären Dauerbetrieb gute Wirkungsgrade und hohe Lebensdauern. In Summe ist sie ein ausgereiftes Verfahren mit einem Technology Readiness Level (TRL) von 9. Auf den zweifellos vorhandenen F&E-Bedarf wird weiter unten

eingegangen. Die PEM-Elektrolyse (TRL 6-8) wird seit ca. zwei Jahrzehnten in Nischenanwendungen erfolgreich eingesetzt. In den letzten zehn Jahren erfuhr sie eine starke Weiterentwicklung für Anwendungen im zukünftigen Energiemarkt, da die Technologie als besonders geeignet für die Kopplung mit erneuerbaren Energiequellen gilt, u. a. durch ihre kompakte Bauweise, gute Eignung zum Druckbetrieb, hohe Dynamik bei schnellem Lastwechsel etc. Die Hochtemperatur-Elektrolyse befindet sich auf einem Entwicklungsstand von TRL 4-6, eine breite Feldtesterfahrung liegt noch nicht vor. Ihr entscheidender Vorteil ist der sehr gute elektrische Wirkungsgrad, wenn vor Ort Abwärme auf einem Temperaturlevel von 200 °C oder höher verfügbar ist. Sie ist damit vor allem zur Kopplung mit industriellen Prozessen geeignet.

Neben diesen drei Technologien haben weitere Elektrolyse-Verfahren das Potenzial, zukünftig eine größere Rolle zu spielen. Zu nennen sind vor allem die alkalische Membran-Elektrolyse (TRL 4-6) und die Meerwasser-Elektrolyse (TRL 1-3). Beide Ansätze werden derzeit aber nur wenig erforscht bzw. im industriellen Kontext kaum vorangetrieben.

4.1.3 MARKTENTWICKLUNG

Die Elektrolyse-Industrie wird derzeit von der Chlor-Alkali-Elektrolyse getragen und spielt ansonsten volkswirtschaftlich international keine Rolle, da in den letzten Jahren der weltweite Absatz (und damit die Produktionskapazität) geringer als 100 MW pro Jahr war. Durch das gestiegene Interesse an dem Potenzial der Sektorenkopplung und dem Bedarf an grünem, d.h. durch erneuerbare Energien erzeugten Wasserstoff rückt die Elektrolyse-Industrie jedoch verstärkt in den Fokus, und auch große, international tätige Firmen wie Siemens, Asahi Kasei und Thyssenkrupp entwickeln ihre eigenen Produkte. Zudem ist verstärkt zu beobachten, dass sich finanzkräftige Investoren und Firmen Anteile an etablierten kleineren Elektrolyse-Firmen sichern. Aktuell wird der Markt weltweit vor allem durch vielfältige F&E-Programme stimuliert. So sollen in den nächsten Jahren alleine im Rahmen der Reallabor-Initiative des BMWi mehrere 100 MW Elektrolyse-Leistung in Deutschland errichtet werden.

Nichtsdestotrotz erfolgt die Fertigung von Elektrolyseuren derzeit im Manufakturbetrieb durch wenige Akteure mit dünner Personaldecke. Es gibt kaum Standardprodukte mit breiter Betriebserfahrung, sondern kleinskalige Produktionsanlagen und häufig eine Single-Source-Problematik bei den Zulieferern mit entsprechend hohen Bezugspreisen und langen Lieferzeiten. Die deutsche Akteurslandschaft steht im europäischen Kontext gut da, da alle drei Technologien in Deutschland beforscht werden, Hersteller Produkte entwickeln und auch viele Zulieferer in Deutschland angesiedelt sind. Aufgrund der spezialisierten Komponenten sind die Branche und ihre Zulieferketten stark international ausgerichtet.

4.1.4 F&E-BEDARF

Obwohl Elektrolyseure bereits industriell verfügbar sind und die Technik geeignet ist, Anlagen im großen Maßstab aufzubauen, besteht noch ein vielfältiger F&E-Bedarf, um über leistungsfähige, langlebige und kostengünstige Produkte für das zukünftige Energiesystem zu verfügen. Hierbei geht es teilweise um grundlagenorientierte Forschung, meistens jedoch um kontinuierli-

che, industrielle Weiterentwicklung. Über alle Technologien ist eine energetische und ökonomische Optimierung von peripheren Anlagenkomponenten gemäß dem zukünftigen Einsatzprofil notwendig, u. a. bei der Leistungselektronik (robuste und kostengünstige Gleichrichter und Transformatoren für eine dynamische und flexible Betriebsführung) und bei der Gasaufbereitung (Gasanalytik, Wasserstoff-Trocknung und Wasserstoff-Verdichtung). Ferner gibt es Entwicklungsbedarf bei der Qualitätssicherung und Zertifizierung in der Produktion von Komponenten für die Elektrolyse. Hinsichtlich einer Hochskalierung von Markt und Leistung der Einzelanlagen müssen Konzepte für marktgerechte Produktionstechnologien und Qualitätssicherung entwickelt werden.

Aus technologiespezifischer Sicht ist bei der alkalischen Elektrolyse vor allem eine Erhöhung der Strom- und damit Leistungsdichten bei Beibehaltung des hohen Wirkungsgrades, der langen Lebensdauer und der Herstellungskosten gefordert. Diese Ziele können durch eine Optimierung der Zellgeometrie, einer Anpassung der Elektrolytführung, der Entwicklung einer kontinuierlichen Elektroden- und Stackfertigung, einer Optimierung der Katalysatoren sowie der Elektrodenstruktur und nicht zuletzt durch neue Konzepte wie der alkalischen Membranelektrolyse erreicht werden. Bei der PEM-Elektrolyse besteht Bedarf nach alternativen Membranmaterialien für erhöhte Betriebstemperaturen (höhere Leistungsdichten bei geringem Gas-Crossover). Ferner muss der Bedarf an Edelmetallen deutlich gesenkt werden (Reduzierung der Katalysatorbeladung hinsichtlich Iridium und Platin, damit die Materialverfügbarkeit nicht kritisch wird) und passende Recyclingkonzepte entwickelt werden. Weitere Themen sind ein verbessertes Verständnis relevanter Alterungsmechanismen zur Erhöhung der Lebensdauer, die Entwicklung und Qualifizierung großskaliger PEM-Stacks in der MW-Klasse und die Entwicklung von konkurrenzfähigen Hochdruckelektrolyseuren für dezentrale Anwendungen. Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse sind neben der Erhöhung der Langzeitstabilität und der Zyklenfestigkeit die Einführung automatisierter Verfahren zur kostengünstigen Zellherstellung sowie die Entwicklung von Stacks hoher Leistung wichtige Themen. Außerdem müssen geeignete und dynamisch betreibbare Wärmemanagementsysteme entwickelt werden. Über alle Technologien hinweg besteht zudem Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Produktion von großen Stückzahlen unter Einhaltung von Qualitätsanforderungen.

4.1.5 POLITIK UND REGULIERUNG

Aufgrund der zentralen Bedeutung der Technologie für das Erreichen der klimaschutzpolitischen Ziele der Bundesregierung, aufgrund der Marktwachstumsprognosen und zur Wahrung der Exportchancen in einem globalen, dynamischen Wachstumsmarkt liegt es im Interesse Deutschlands, dass sich eine leistungsfähige Elektrolyse- und Zulieferindustrie vor Ort entwickeln kann. Dies erfordert transparente und zuverlässige Rahmenbedingungen im Energiesektor, die der Branche und der Zulieferindustrie Investitionssicherheit gewährleisten. Details dazu können in NOW (2018) gefunden werden. Eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen bei den Strombezugskosten ist notwendig, da aus energiewirtschaftlicher Sicht die Elektrolyse derzeit als Endverbraucher gilt, ohne dass dabei die Systemdienlichkeit der Elektrolyse in den verschiedenen Energiesektoren berücksichtigt wird. Neben der Klärung, wie ein Elektrolyseur regulativ in das Stromnetz eingebunden ist, muss auch die Nachfrage nach grünem Wasserstoff ge-

fördert und erhöht werden und ein europäisch/international einheitliches Nachweis- und Zertifizierungssystem für grünen Wasserstoff etabliert werden. Ein erster wirksamer Schritt zur Erhöhung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff wäre eine schnelle Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU) 2018/2001 (*Renewable Energy Directive* – RED II) in nationales Recht. Die weitere Diskussion über ein geeignetes Anreizsystem zum Einsatz CO_2-freien Wasserstoffs sollte unter Berücksichtigung aller Sektoren geführt werden und im Kontext der Frage nach einer gerechten CO_2-Bepreisung bzw. -Abgabe gelöst werden. Damit könnten alternative Pfade zur CO_2-armen Wasserstoff-Erzeugung regulativ berücksichtigt werden, siehe nächster Abschnitt. In Summe ist bei allen Fördermaßnahmen auf eine allgemeine Technologieoffenheit zu achten, damit zum heutigen Zeitpunkt nicht Technologien und Verfahren ausgeschlossen werden, deren Potenzial erst zu einem späteren Zeitpunkt voll erkannt wird.

4.1.6 ALTERNATIVE PFADE ZUR CO_2-ARMEN WASSERSTOFF-HERSTELLUNG

Neben der Elektrolyse werden im betrachteten Zeitraum bis 2050 mindestens zwei weitere Verfahren bei der CO_2-armen Wasserstoff-Herstellung eine Rolle spielen. Dazu gehören die bisher zur Wasserstoff-Erzeugung verwendete Reformierung mit einer anschließenden Abtrennung und Speicherung bzw. Nutzung von CO_2 sowie die Methanpyrolyse.

Derzeit wird Wasserstoff überwiegend aus Erdgas durch Dampfreformierung (Steam Methane Reforming, SMR) oder autotherme Reformierung (Autothermal Reforming, ATR) gewonnen. Dabei entstehen hohe Treibhausgasemissionen von ca. 10,6 t $CO_{2\,äq.}$/t Wasserstoff (Sternberg 2017), die damit deutlich höher liegen als für die Wasserstoff-Erzeugung mittels Elektrolyse mit Windstrom. CO_2 kann jedoch sowohl aus dem SMR- als auch aus dem ATR-Prozess abgeschieden werden. Bei SMR-Prozessen können in der Praxis CO_2-Abscheideraten von ca. 90 % erzielt werden. Es sind bereits erste SMR-Anlagen mit einer Produktionsmenge von 0,5 Mio. t Wasserstoff pro Jahr und einer nachgelagerten CO_2-Abtrennung in Betrieb. Die typischen Kosten liegen dabei bei 53 US$ pro Tonne CO_2, wenn das CO_2 nur aus dem konzentrierteren Prozessgas entnommen wird. Mit der ATR-Technologie können höhere CO_2-Abscheideraten erzielt werden, da das Prozessgas CO_2 in konzentrierterer Form enthält. Folglich erlaubt die ATR-Technologie auch eine kostengünstigere CO_2-Abtrennung. In den geplanten Projekten HyNet und Wasserstoff1 in Großbritannien soll die ATR-Technologie mit CO_2-Abtrennung realisiert werden (IEA 2019). Jedoch ist zu beachten, dass für die sichere Speicherung beziehungsweise nachhaltige Nutzung des abgeschiedenen CO_2 Lösungen gefunden werden müssen.

Die Methanpyrolyse oder Methanzersetzung bietet einen weiteren Pfad zu einer CO_2-armen Wasserstoff-Herstellung. Das hohe Interesse an der Methanspaltung rührt daher, dass die für die Spaltung von Methan aufgewandte Energie deutlich niedriger ist als für die Wasser-Elektrolyse sowie darüber hinaus die CO_2-Emissionen ca. 50 % niedriger sind als bei der klassischen Reformierung ohne CO_2-Abtrennung (Machhammer 2016). Allerdings erfordern die Verfahren zur Methanpyrolyse typischerweise Temperaturen von deutlich über 1000 °C. In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Technologien von verschiedenen Konsortien entwickelt. Während BASF, Thyssenkrupp und Linde auf ein Verfahren zur thermischen Spaltung setzen, verfolgt das US-Unternehmen Monolith die Plasmapyrolyse. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von flüssigem Metall als Wärmeträger (KIT, IASS). Der australische HAZER®-Prozess setzt dagegen

auf die katalytische Methanpyrolyse, die allerdings vor der Herausforderung steht, den Katalysator nach der Reaktion vom Kohlenstoff möglichst vollständig zu trennen. Die Technologiereife der Methanpyrolyse-Verfahren wird im Bereich von TRL 4-5 eingeschätzt (Dechema 2017). Jedoch muss für die bei der Methanpyrolyse entstehenden großen Kohlenstoffmengen eine geeignete und auch langfristig sichere Lagerungsmöglichkeit gefunden werden.

4.1.7 ROADMAP FÜR DIE ELEKTROLYSE

Abbildung 4: Roadmap für die Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse und alternative Verfahren

4.2 INDUSTRIE

Der Industriesektor hat mit etwa 20 % einen bedeutenden Anteil an den Treibhausgasemissionen Deutschlands. Entsprechend muss zur Erreichung der Klimaziele von Paris auch die Industrie erheblich CO_2-Emissionen mindern. Die einzelnen Industriebranchen stehen dabei vor unterschiedlichen Herausforderungen, welche u. a. durch ihre Marktstrukturen und Produktionstechniken geprägt sind. Häufig ist der mögliche Einsatz von erneuerbaren Energien aufgrund hoher Temperaturniveaus oder Wärmedichten nur bedingt möglich oder es entstehen prozessbedingte THG-Emissionen, welche unter Verwendung heutiger Produktionsrouten kurzfristig nur bedingt vermieden werden können. Potenziell große Vermeidungshebel wie der Einsatz von CO_2-Abscheidung und -Speicherung (CCS) bzw. -Nutzung (CCU) oder Biomasse sind mit Nachteilen bei der Akzeptanz oder der nachhaltigen Verfügbarkeit verbunden. Entsprechend kann erneuerbar erzeugter Wasserstoff einen zentralen Beitrag zur Transformation hin zu einer CO_2-neutralen Industrieproduktion leisten. Besonders große Potenziale weist der Einsatz von Wasserstoff in der Stahlindustrie und der chemischen Industrie auf. In der Stahlindustrie können durch Umstellung auf ein wasserstoffbasiertes Verfahren prozessbedingte CO_2-Emissionen vermieden werden. In der chemischen Industrie kann Wasserstoff aus erneuerbaren Energien vielfältig eingesetzt werden. So gibt es Potenziale, fossil erzeugten Wasserstoff durch grünen Wasserstoff zu ersetzen (z. B. Ammoniakherstellung), aber auch langfristig das Potenzial, Wasserstoff als Ausgangsstoff für neue Verfahrensrouten zu nutzen und so z. B. Erdgas als Rohstoff zu verdrängen.

Neben den Einsatzmöglichkeiten in der Stahl- und Chemie-Industrie kann erneuerbar erzeugter Wasserstoff in vielen anderen Bereichen eine wichtige Rolle spielen. So z. B. in der sehr energieintensiven Glasschmelze als Ersatz von Erdgas, aber auch über alle Branchen hinweg für die Erzeugung von Prozessdampf auf Temperaturniveaus, die z. B. über Wärmepumpen nicht erreichbar sind. Besonders groß wäre das Potenzial, Wasserstoff in Form von synthetischem Erdgas als direktes Erdgassubstitut zu verwenden. Während diese Umstellung auf Seiten der industriellen Anlagentechnik keinerlei Veränderung erfordert, sind die Kosten der PtG-Erzeugung und der Kohlenstoffquelle bzw. Kreislaufführung des Kohlenstoffs zu klären.

Die 2018 veröffentlichte Langfriststrategie der EU (European Commission 2018) weist für die Industrie mehrere ambitionierte THG-Minderungsszenarien bis zum Jahr 2050 aus. Diese geben eine Bandbreite des Wasserstoffbedarfs in der EU zwischen 0 und 560 TWh an. Ein Szenario, welches eine nahezu CO_2-neutrale Industrie darstellt, weist einen Wasserstoffbedarf von etwa 340 TWh aus, was den potenziell sehr großen Beitrag von Wasserstoff zur CO_2-Minderung in der Industrie unterstreicht.

Im Folgenden wird aufgrund der hohen Potenziale im Detail auf die Sektoren Stahl und Chemie sowie Raffinerie eingegangen.

4.2.1 STAHLHERSTELLUNG

4.2.1.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf

Die Herstellung von Stahl ist eine der CO_2-intensivsten Industriebranchen in Deutschland. Gegenwärtig wird die Stahlproduktion nahezu vollständig über die sogenannte Elektrostahl-Route oder die Hochofen-Route realisiert. Besonders Letztere weist hohe CO_2-Emissionen auf, da für die Reduktion der Eisenerze zu Roheisen große Mengen Koks benötigt werden. Die Nutzung der anfallenden CO_2-Emissionen als Ausgangsstoff für die Erzeugung chemischer Produkte ist prinzipiell möglich und wird von verschiedenen Forschungsprojekten betrachtet (Oles et al. 2018, ArcelorMittal 2018). Eine Alternative zum Hochofen bietet die Direktreduktion. Anstelle durch Koks wird das Eisenerz hier durch Erdgas oder Wasserstoff reduziert, wodurch CO_2-Emissionen direkt vermieden werden. Das Produkt wird als Eisenschwamm (kurz: DRI, engl.: direct reduced iron) bezeichnet und in einem Elektrolichtbogenofen zu Stahl weiterverarbeitet. Die entstehende Direktreduktions-Route wird von den großen Herstellern Deutschlands und Europas für die Umstellung auf eine CO_2-arme Stahlindustrie favorisiert (siehe Salzgitter AG 2019, Thyssenkrupp 2019, ArcelorMittal Deutschland 2019). Zusätzlich kann die in der Stahlerzeugung und -weiterverarbeitung notwendige Prozesswärme durch elektrische Energie statt durch kohlenstoffhaltige Energieträger bereitgestellt werden. So lassen sich in letzter Konsequenz fast alle CO_2-Emissionen der Stahlherstellung direkt vermeiden. Die notwendige Menge an Wasserstoff kann dabei sowohl direkt am Standort hergestellt oder über ein Pipeline-Netz bereitgestellt werden. Dabei ist eine vollständige Umstellung der Produktionsstandorte bis 2050 geplant (Salzgitter AG 2019, Thyssenkrupp 2019, ArcelorMittal 2019). Als eine weitere Alternative zum Hochofen existiert mit der Eisenerz-Elektrolyse ein direktelektrifiziertes Verfahren, welches bislang nur durch einen Stahlerzeuger verfolgt wird (ArcelorMittal 2017). Mit der Marktreife eines derartigen Prozesses wird nicht vor 2040 gerechnet (EUROFER 2013). In Anbetracht der langen Lebenszyklen heutiger Direktreduktionsanlagen von über 20 Jahren ist ein späterer Umstieg von wasserstoffbasierten Verfahren auf direktelektrifizierte Verfahren unwahrscheinlich. Beide Ansätze eignen sich grundsätzlich jedoch für eine nahezu CO_2-freie Stahlerzeugung.

In Tabelle 3 sind Bandbreiten der Wasserstoff-Nachfrage für die Regionen Deutschland und EU im Bereich der Stahlindustrie aufgeführt. Als maximale Abschätzung wurde das gegenwärtige Produktionsvolumen der primären Stahlerzeugung in Deutschland (29,5 Mt/a Rohstahl) bzw. der EU (98,1 Mt/a) angenommen und für den Zielwert in 2050 vollständig durch die Direktreduktionsroute ersetzt. Andere Studien gehen davon aus, dass steigendes Stahlschrottaufkommen dazu führen wird, dass der Marktanteil der primären Route sinken wird. Entsprechend wird in UBA (2014) davon ausgegangen, dass der Anteil der schrottbasierten Elektrostahl-Route in Deutschland auf 67 % ansteigt. Bei Fleiter et al. (2019) steigt der Anteil EU-weit auf 77 %. Entsprechend ergeben sich geringere Potenziale für die Primärstahlerzeugung über DRI, selbst wenn der gesamte verbleibende Markt über die DRI-Route bedient wird.

Neben Unsicherheiten bei der Produktionsmenge schwanken auch die in der Literatur angegebenen Werte für den spezifischen Wasserstoff-Bedarf je Tonne Rohstahl. Für die Angaben in Tabelle 3 wurde ein spezifischer Wasserstoff-Bedarf von 1900 kWh H_2 je Tonne Rohstahl unterstellt.

Für 2030 wird unterstellt, dass in Deutschland 17 % und in Europa 11 % der Primärstahlkapazität auf Direktreduktion umgestellt sind, wobei eine Beimischung von 35 % Wasserstoff zum Erdgas angenommen wird. Da dies große Mengen Wasserstoff sind, die an nur wenigen Standorten benötigt werden, stellt sich die Frage der Wasserstoff-Logistik in ganz besonderer Weise.

Tabelle 3: Wasserstoff-Nachfrage und Elektrolyse-Kapazität in der Stahlindustrie, für Deutschland und EU, für die Jahre 2030 und 2050

Parameter	Region	2030	2050
Wasserstoff-Nachfrage (TWh)	Deutschland	6	38 – 56
	EU	11	84 – 187

4.2.1.2 Stand der Technologie

Direktreduktionsverfahren auf Erdgasbasis sind seit vielen Jahrzehnten etabliert und im Einsatz. Die wasserstoffbasierte Direktreduktion wurde erstmals 1999 in einem Wirbelschichtverfahren realisiert (Otto et al. 2017). Großtechnisch etablierter sind jedoch Festbettverfahren, wie z. B. der Midrex- und der Energiron-Prozess, die zusammen 82 % der globalen Eisenschwammerzeugung ausmachen. Für diese wird die technische Machbarkeit eines reinen Wasserstoff-Betriebs ebenfalls als gegeben betrachtet (Tacke et al. 2004, Hölling et al. 2017). Da die erdgasbasierte Direktreduktions-Route weniger CO_2 als die Hochofen-Route emittiert, kann damit bereits gegenwärtig der Pfad hin zu einer CO_2-neutralen Stahlherstellung eingeschlagen werden, ohne unmittelbar auf die Infrastruktur zur Bereitstellung erneuerbarer elektrischer Energie und Anlagen zur Elektrolyse angewiesen zu sein. Durch eine zunehmende Substitution von Erdgas durch regenerativen Wasserstoff kann das Ziel der 95-%-THG-Minderung schrittweise umgesetzt werden, wodurch die wirtschaftliche Belastung auf einen größeren Zeitraum verteilt wird.

4.2.1.3 F&E-Bedarf

Weiterführender Forschungsbedarf existiert bei der Umsetzung einer dynamischen Anlagenfahrweise sowie hinsichtlich der Stahl- und Schlackenqualität. Zum einen ist die Einbindung in eine volatile Elektrizitätsversorgung und das daraus abgeleitete Lastmanagement-Potenzial zu bewerten. Dabei stehen die Auswirkungen variierender Erdgas-Wasserstoff-Verhältnisse im Reduktionsgas auf den Reduktionsprozess und die Produktqualität im Zentrum. Zum anderen sind die Auswirkungen auf stoffliche Verwertungsnetzwerke, die zwischen der Stahlindustrie und weiteren Industriezweigen, wie der Zementindustrie, bestehen, näher zu untersuchen. Durch die Substitution mineralischer Ressourcen in der Zementproduktion durch Eisenhüttenschlacken werden gegenwärtig große Mengen CO_2 vermieden. Inwiefern zukünftige Schlacken neuartiger Produktionsrouten diese Rolle übernehmen können, sollte in weiteren Forschungsarbeiten beleuchtet werden.

Der fortgeschrittene Entwicklungsstand heutiger Direktreduktionsanlagen und die Art der aufgezeigten notwendigen Untersuchungen bedingen die Errichtung großskaliger Demonstrationsanlagen zur Durchführung industrienaher Forschungsvorhaben. Dies sollte durch politische Regularien und Anreize gefördert werden.

4.2.2 CHEMISCHE INDUSTRIE UND RAFFINERIETECHNIK

4.2.2.1 Zukünftiger Wasserstoff-Bedarf

Die heutige Wasserstoff-Nutzung ist durch die Abnehmer in der chemischen Industrie und der Raffinerietechnik geprägt. In der chemischen Industrie ist speziell die Herstellung von Ammoniak, aber auch Methanol zu nennen, für welche der Wasserstoff stofflich genutzt wird (siehe Abbildung). Der heute genutzte Wasserstoffs wird nahezu ausschließlich auf Basis von Erdgas erzeugt oder er fällt als Nebenprodukt in chemischen Prozessen an.

Abbildung 5: Wasserstoff-Nachfrage und -Angebot weltweit (Quelle: IEA 2019)

Die zukünftige Nachfrage nach grünem Wasserstoff wird zum einen durch die Substitution von nicht nachhaltig produziertem Wasserstoff in heute bereits genutzten Anwendungen und zum anderen durch die Erschließung neuer Anwendungsfelder bestimmt.

Alleine die schrittweise Substitution der Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas und Erdölderivaten für die Chemie-Industrie und Raffinerietechnik weist in Deutschland ein Reduktionspotenzial von 10 bis 15 Mt CO_2/a auf (CCKM 2017). Weiteres Potenzial für die CO_2-Emissionsminderung bietet sich der strombasierten Wasserstoff-Technik durch Vergasung (hier Umsetzung mit Wasserstoff) kohlenstoffhaltiger Abfälle statt Abfallverbrennung, durch Verfahrensentwicklungen zur Herstellung von Olefinen, Aromaten und letztendlich Polymeren mit Schließung des Kohlenstoffkreislaufes durch das System der „Kohlenstoffkette". Die Umstellung der Wasserstoff-Erzeugung auf strombasierte Technologien ist nach einer Einschätzung des VCI allerdings mit einem sehr hohen Strombedarf von etwa 650 TWh/a verbunden (VCI 2019).

4.2.2.2 Stand der Technologie und Infrastrukturen

In der chemischen Industrie und Raffinerietechnik wird Wasserstoff seit Jahrzehnten industriell eingesetzt und gilt als wichtiger Grundstoff für verschiedene Prozesse. Als Beispiele sind hier zu nennen:

Ammoniaksynthese

Das großtechnisch etablierte Verfahren zur Herstellung von Ammoniak ist das Haber-Bosch-Verfahren, mit dem aus Wasserstoff und Stickstoff Ammoniak hergestellt wird. Ammoniak stellt ein wichtiges Zwischenprodukt in der Düngemittelproduktion und für die Produktion von Polyamiden dar. Zusätzlich wird Ammoniak durch seine Transport- und Speicherfähigkeit, das Potenzial, Ammoniak zukünftig in Kraftwerken und Motoren zu nutzen sowie den chemisch gebundenen Wasserstoff zurückzugewinnen, als einer der Energieträger der Zukunft gehandelt. F&E-Bedarf besteht u. a. bei der Entwicklung von entsprechenden Ammoniak-Motoren und -Turbinen (z. B. für Seeschiffe) und der Minimierung von NO_x-Emissionen.

Eine Besonderheit der chemischen Industrie und der Raffinerietechnik ist die Organisation von Prozessen in Stoffverbünden[5]. Dies spielt für die zukünftige Nutzung von grünem Wasserstoff in der chemischen Industrie eine wichtige Rolle. So kann grauer Wasserstoff beispielsweise in der Ammoniakerzeugung nicht eins zu eins durch grünen Wasserstoff ersetzt werden, da das Koppelprodukt CO_2 für die Produktion von Harnstoff benötigt wird.

Methanolsynthese

Methanol ist eine der wichtigsten und am meisten hergestellten organischen Chemikalien, welche zum einen als chemischer Grundstoff und zum anderen als Energieträger genutzt werden kann. Methanol kann über verschiedene Synthesewege erzeugt werden, für die jedoch ausnahmslos die Edukte Wasserstoff und CO_2 benötigt werden.

Für die Ammoniak- und Methanolproduktion wird durch das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum bis 2030 in der chemischen Industrie mit einer globalen Nachfragesteigerung an Wasserstoff um ca. 31 % gerechnet (IEA 2019). Sollten sich Ammoniak und Methanol zusätzlich als Energieträger durchsetzen, ist mit einer deutlich höheren Nachfragesteigerung zu rechnen. Eine verstärkte Nutzung von Methanol als stofflicher Energieträger hätte den Vorteil, dass bestehende Infrastrukturen in der Energieversorgung aber auch in der Chemieindustrie genutzt werden könnten.

Chlor-Alkali-Elektrolyse

Bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse steht die Chlorherstellung im Vordergrund, als Nebenprodukt fällt jedoch Wasserstoff an, der je nach Standort einer weiteren Nutzung zugeführt wird. Die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist eine seit Jahrzehnten etablierte und wirtschaftliche Technologie, die weltweit angewendet wird. Derzeit gibt es Bestrebungen, bisher in Grundlast betriebene Anlagen zu flexibilisieren, um sie mit erneuerbaren Energien betreiben zu können.

Raffinerietechnik

In der Raffinerietechnik wird Wasserstoff großtechnisch eingesetzt, um Kraftstoffe wie Diesel und Benzin zu entschwefeln und über Hydrocracking schwere Rückstände mittels Wasserstoff

5 Stoffverbünde zeichnen sich dadurch aus, dass Koppel- und Nebenprodukte aus einem Prozess als Rohstoff in einem anderen Prozess auch über Unternehmensgrenzen hinaus genutzt werden.

zu veredeln. Dieser derzeit aus fossilen Energieträgern erzeugte Wasserstoff kann kurz- und mittelfristig durch grünen Wasserstoff substituiert werden. Langfristig werden fossile Brennstoffe aber verdrängt und durch alternative CO_2-freie Kraftstoffe ersetzt werden.

Der Kostendruck ist in diesem Bereich groß, wodurch der Einsatz von grünem Wasserstoff nur durch entsprechende Regulierungen hinsichtlich Anrechnung auf THG-Quoten und durch geeignete Umsetzung der RED II wirtschaftlich abbildbar werden wird.

E-Fuels-Herstellung (Power-to-Liquid – PtL)

Zu den Synthesetechnologien zur Herstellung von E-Fuels gehört neben der Methanolsynthese auch die Fischer-Tropsch-Synthese zur Produktion von Benzin, Diesel und Kerosin aus Wasserstoff und CO_2. Die Methanolsynthese hat große Vorteile, da sie sehr selektiv durchgeführt werden kann. Methanol kann anschließend in z. T. sehr etablierten Prozessen (Methanol-to-Olefins, Methanol-to-Gasoline etc.) gezielt zu den gewünschten Produkten weiterverarbeitet werden. Die PtL-Prozesse müssen weiterentwickelt und an die heutigen Rahmenbedingungen (Flexibilisierung bzgl. Feedstock und Feedstrom, Kopplung mit Elektrolyse etc.) angepasst werden. Da die großtechnische Umsetzung hohe Investitionen mit sich bringt, werden derzeit weltweit Standorte mit günstigen Potenzialen an erneuerbaren Energien und hoher Verfügbarkeit auf ihre Potenziale untersucht. Die George-Olah-Anlage von CRI, die in Island seit vielen Jahren Methanol aus CO_2 und Wasserstoff auf Basis von Geothermie herstellt, ist ein gutes Beispiel. Bei Fischer-Tropsch-Produkten stellt sich wie beim Methanol die Frage nach der CO_2-Quelle. Das Ziel ist es, Prozesse mit geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen zu entwickeln.

Chemisches Recycling

Die chemische Nutzung von Abfällen ermöglicht gegenüber der Abfallverbrennung die Bereitstellung von Rohstoffen für die chemische Industrie und bietet damit ein erhebliches Potenzial zur Vermeidung von CO_2-Emissionen. Eine besondere Bedeutung kommt diesen Verfahren vor dem Hintergrund des Exportverbotes für Kunststoffabfälle, dem steigenden Druck der Verbraucher nach recycelten Produkten und dem zunehmend schlechten Image von Kunststoffen aufgrund der Vermüllung der Ozeane zu, da das werkstoffliche Recycling nicht für alle anfallenden Abfallströme möglich ist. In diesem Kontext interessante Verfahren des chemischen Recyclings sind die Pyrolyse zur Gewinnung von Flüssigprodukten (Pyrolyseöle) für den Einsatz in der petrochemischen Industrie und Vergasungsverfahren zur Gewinnung eines H_2- und CO-reichen Synthesegases für die Erzeugung von chemischen Produkten (u. a. Olefine).

Ein erheblicher zusätzlicher Bedarf an grünem Wasserstoff wird zukünftig durch die Verfahrensentwicklungen und Investitionen in technologische Lösungen für das chemische Recycling entstehen. Wasserstoff wird u. a. eingesetzt, um das Verhältnis zwischen H_2 und CO im Produktgas aus der Vergasung für nachfolgende chemische Synthesen anzupassen oder flüssige Produkte aus der Pyrolyse von Kunststoffen für den Einsatz in der petrochemischen Industrie zu qualifizieren. Der Einsatz von grünem Wasserstoff in chemischen Recyclingprozessen kann zu einer erheblichen Reduzierung der CO_2-Emissionen in den Prozessketten beitragen.

4.2.2.3 Handlungsfelder/Forschungsbedarf

Die bestehenden Prozesse in der Raffinerietechnik und chemischen Industrie basieren auf einer kontinuierlichen Versorgung mit Wasserstoff. Daraus ergeben sich zukünftig verschiedene Handlungsfelder. Zum einen ist dies die Flexibilisierung von Prozessen. Zum anderen wird die Erforschung und Schaffung von geeigneten Speichermöglichkeiten für große Mengen grünen Wasserstoffs sowie die Modularisierung von Prozessen wichtig werden. Für die Kreislaufwirtschaft des Kohlenstoffs sind mit Pyrolyse und Vergasung emissionsfreie Verfahrenswege für die Aufarbeitung der Kunststoffabfälle zu entwickeln.

Es geht in den kommenden Jahren darum, die Prozesse hochzuskalieren, stofflich/thermisch zu integrieren und an die dynamischere Betriebsweise anzupassen, idealerweise mit vergleichbarer Lebensdauer des Katalysators. Neue Produktionsverfahren mit optimierten Katalysatoren müssen entwickelt und industrialisiert werden, um diese kosteneffizienten Prozesse in Deutschland zu demonstrieren, nachfolgend zu exportieren und dadurch Arbeitsplätze in Deutschland zu sichern.

Eine weitere wichtige Fragestellung ist die Gewinnung von CO_2 in den dafür nötigen Mengen und zu geringen Kosten sowie die Einbindung dieser C-Quellen in die entsprechenden Syntheseprozesse.

Um die Basischemie und die Kunststofferzeugung in Deutschland wettbewerbsfähig betreiben zu können, ist es erforderlich, die heute noch auf fossilen Rohstoffen basierenden Technologien konsequent weiterzuentwickeln und bei bestehenden Anlagen die Substitution durch grünen Wasserstoff unter Berücksichtigung des globalen Wettbewerbs und somit der Wirtschaftlichkeit voranzutreiben. Da Kohlenstoff ein unverzichtbarer Rohstoff für die chemische Industrie ist, kann die Frage der Energieversorgung nicht von der Rohstoffversorgung der Chemieindustrie getrennt werden. Auf lange Sicht gesehen, kann der in den verschiedenen Prozessen benötigte Kohlenstoff auch durch Luftabscheidung von CO_2 ersetzt werden. Diese Technologien sollten weiter erforscht werden.

4.2.2.4 Politik/Regulierung

Mit den Reallaboren Energiewende des 7. Energieforschungsprogramms wurden vom BMWi fünf Entwicklungen der strombasierten Wasserstofftechnik für die weitere Qualifizierung ausgewählt, die Bezug zur Chemieindustrie und Raffinerietechnik haben. Damit können im Verbund mit vorhandenen Industriestrukturen der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Wasserstoff-Nutzung für Hydrierungen und zur Methanolherstellung die strombasierte Wasserstoff-Herstellung sowie die Speicherung in Kavernen zur industriellen Reife geführt werden. Zukünftige Reallabore sollten der Methanpyrolyse und den verschiedenen Verfahren zur Pyrolyse und Vergasung von Kunststoffabfällen den Weg zur industriellen Umsetzung ermöglichen. Um diese Umsetzung im Realbetrieb zu untersuchen, braucht es auf absehbare Zeit regulatorische Ausnahmetatbestände, vor allem die Entlastung des genutzten Stroms und der Energieinfrastruktur von administrativ veranlassten Preisbestandteilen.

Für die langfristige Investition in neue Anlagen auf dem Weg zur CO_2-neutralen Chemie-Industrie muss der regulatorische Rahmen Möglichkeiten und Planungssicherheit schaffen. Erst, wenn Industrieunternehmen davon ausgehen können, dass grüner Wasserstoff aus einer betriebswirtschaftlichen Perspektive nutzbar sein wird, sind großskalige Investitionen möglich. Hier sind verschiedene Instrumente denkbar, wie z. B. „Carbon floor price", öffentliche Beschaffung, Quoten, Contracts for difference.

Durch die Technologieintegration von Carbon Capture and Utilisation (CCU) und erneuerbarem Wasserstoff sind mittelfristig hohe CO_2-Einsparungen möglich, indem CO_2 kaskadisch genutzt wird. Langfristig kann in einer CO_2-neutralen Wirtschaft CCU nur CO_2-neutral sein, wenn der CO_2-Kreislauf geschlossen wird. Es ist zu prüfen, ob CCU im Emissionshandel angerechnet werden sollte, um so einen starken Anreiz für Investitionen in diese Technologie zu setzen.

4.2.3 ROADMAP WASSERSTOFF FÜR DIE INDUSTRIE

Abbildung zeigt die Elemente einer Wasserstoff-Roadmap für den Industriesektor. Sie enthält wichtige Meilensteine für die großflächige Diffusion und den breiten Einsatz von Wasserstoff als zentraler Beitrag hin zu einer CO_2-neutralen Industrieproduktion.

In der Stahlherstellung wird von vielen Akteuren die Umstellung der primären Stahlerzeugung vom Hochofen auf die Direktreduktion gesehen. Hier ist mittelfristig zunächst die Beimischung von grünem Wasserstoff und langfristig der vollständige Betrieb mittels grünem Wasserstoff anzustreben.

In der chemischen Industrie kann grüner Wasserstoff mittelfristig als Substitut von derzeit genutztem grauem Wasserstoff eingesetzt werden, bei weitergehender Nutzung der bestehenden Prozesse. Langfristig kann grüner Wasserstoff in vielen Bereichen eingesetzt werden und Erdgas als Rohstoff und Energieträger verdrängen. Als Beispiel sei hier der Prozess Methanol-to-Olefines genannt. Der Einsatz von Wasserstoff für die Erzeugung von höherwertigen PtG- oder PtL-Produkten hängt stark von der Nachfrage anderer Sektoren wie dem Verkehr ab. Langfristig wird die Nutzung des Wasserstoffs in PtG/L-Produkten nur zu einer CO_2-neutralen Wirtschaft beitragen, wenn eine Kreislaufführung des CO_2 ermöglicht ist oder CO_2 aus Luftabscheidung verfügbar ist. Weiterhin ist zu beachten, dass viele Prozesse der chemischen Industrie auf die stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs angewiesen sind.

Abbildung 6: Roadmap für die Industrie

4.3 VERKEHR UND MOBILITÄT

Zur Erreichung der langfristigen Klimaziele im Sektor Verkehr ist grundsätzlich eine signifikante Effizienzsteigerung erforderlich. Dies bedeutet eine Vorrangstellung des ÖPNV gegenüber der Individualmobilität. Hinsichtlich der Individualmobilität muss Vorfahrt gelten für den Fußgänger- und Fahrradverkehr mit einem massiven Ausbau von Radschnellwegen u. a. für Pedelecs. Während die batterieelektrische Pkw-Mobilität vorzugsweise für den Kurzstrecken- und Pendlerverkehr geeignet ist, wird die Brennstoffzellen-Mobilität bzw. Mobilität mittels synthetischer Kraftstoffe tendenziell für schwerere Fahrzeuge und größere Reichweiten eingesetzt werden.

4.3.1 ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFF-BEDARF

Die Rolle von Wasserstoff in der Mobilität wird in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich bewertet. Dies liegt u. a. an der hohen Unsicherheit bezüglich der Kostenentwicklung (fahrzeugseitig bei der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank und angebotsseitig bzgl. der Kosten der Wasserstoff-Herstellung) sowie am gegenüber der batterieelektrischen Mobilität deutlich geringeren Wirkungsgrad von der Erzeugung bis zum Rad. Wasserstoff wird auch eine Rolle als Zwischenprodukt für synthetische Kraftstoffe spielen.

In einigen Studien wird Wasserstoff gerade für Langstrecken-Pkw eine relevante Bedeutung zugewiesen. Im Folgenden wird demzufolge ein Anteil von bis zu 20 % Brennstoffzellen-Pkw am Bestand 2050 angenommen, da sich die Kosten der unterschiedlichen Technologieoptionen für Langstrecken-Pkw angleichen werden und sich beim Kunden die Vorteile von Reichweite und Betankung durchsetzen (NOW, 2018; LBST, 2018).

Mit ca. 230.000 Fahrzeugen ist die Anzahl der schweren Lkw und Sattelzugmaschinen (über 26 t zulässiges Gesamtgewicht) im Vergleich zu Pkw in Deutschland sehr gering, dennoch sind diese schweren Lkw für die Hälfte der Emissionen des Straßengüterverkehrs verantwortlich (Wietschel et al. 2017). Daher bietet sich dieses Marktsegment an, um die Emissionen kurzfristig deutlich zu senken. Der direkte Wasserstoff-Einsatz bei Lkw mit Brennstoffzelle kann in kleinen Nutzfahrzeugen bis hin zu schweren Sattelzugmaschinen (e-mobil 2017, BMVI 2017) erfolgen. Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen hängt davon ab, inwieweit es gelingt, die Produktion zu günstigen Herstellkosten schnell umzusetzen.

Im internationalen Flug- und Seeschiffsverkehr kommen aufgrund hoher Anforderungen an die Energiedichte nur erneuerbare Flüssigkraftstoffe als Alternativen zu den fossilen Kraftstoffen infrage. Strombasierte, erneuerbare, synthetische Kraftstoffe dominieren hier die Diskussion und haben eine hohe Mengenrelevanz. Wasserstoff ist dabei ein zentrales Zwischenprodukt.

Tabelle 4: Wasserstoff-Nachfrage für Straßenverkehr 2030 und 2050 in Deutschland (nach eigenen Abschätzungen und NOW 2018a)

	Wasserstoff-Bedarf D 2030	**Wasserstoff-Bedarf D 2050**
Pkw	1 – 7 TWh (Ø 3 TWh)	70 – 130 TWh (Ø 80 TWh)
Lkw	0 – 2 TWh (Ø 1 TWh)	130 – 160 TWh (Ø 140 TWh)
Gesamt	1 – 9 TWh (Ø 4 TWh)	200 – 290 TWh (Ø 220 TWh)

4.3.2 STAND DER TECHNOLOGIE UND INFRASTRUKTUREN

Derzeit ist die Zahl an Brennstoffzellen-Fahrzeugen bei Pkw in Deutschland gering (wenige hundert), das Fahrzeugangebot beschränkt sich auf vier Modelle (Toyota Mirai, Hyundai NEXO, Hyundai ix35 und Mercedes-Benz GLC) und das öffentliche Tankstellennetz für Pkw auf ca. 100 bis Ende 2019. Mehrere neue Fahrzeugmodelle u. a. auch von Audi und BMW sind nach 2020 angekündigt und der Tankstellenausbau schreitet voran mit dem Ziel von 400 deutschen Wasserstoff-Tankstellen (HRS – Hydrogen Refueling Station) bis 2023 bzw. 1000 bis 2030. Bei Bussen findet derzeit eine Reihe von Flottentests in Deutschland statt. Tankstellen, welche in größerem Maße Brennstoffzellen-Lkw bedienen könnten, sind in Deutschland keine installiert.

Für Pkw und Busse liegt der TRL bei 8 bis 9 bezogen auf die entsprechenden Brennstoffzellen-Fahrzeuge, hinsichtlich Schiene ebenfalls. Global gesehen können Brennstoffzellen-Lkw und Schienenfahrzeuge dem TRL 7 bis 8 zugeordnet werden. Brennstoffzellen-Schiffe dagegen entsprechen einem TRL von 4 bis 6.

4.3.3 MARKTENTWICKLUNG

Die Attraktivität von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ergibt sich aus der hohen Energiedichte im Vergleich zu Batteriefahrzeugen, sodass auch Langstreckenfahrten und kurze Betankungszeiten möglich sind.

Unter optimistischen Rahmenbedingungen kann ein Potenzial für 2030 von 1,0 bis 1,8 Mio. Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland angenommen werden (NPM, 2019). Mit einer Marktvorbereitung durch Kleinserien für den Lkw-Verkehr ist im Zeitraum von 2020 bis 2030 zu rechnen, ebenso kann dann die Ausweitung der Brennstoffzellen-Technologie im regionalen Zugverkehr sowie im kommunalen ÖPNV erfolgen. Die Einführung synthetischer Kraftstoffe insbesondere für Schiffe und Flugzeuge wird mit dem Markthochlauf der Elektrolyse erfolgen. Bereits seit einigen Jahren sind Schiffe z. B. der Stena-Line im Einsatz, die mit Methanol betrieben werden, Ammoniak stellt eine Alternative dar.

International könnten Asien und die USA wichtige Märkte für Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden. China und Kalifornien streben jeweils eine Million Brennstoffzellen-Pkw im Bestand bis 2030 an, gefolgt von 0,8 Mio. Fahrzeugen in Japan im Jahr 2030. Zudem plant Südkorea 1,8 Mio. Brennstoffzellen-Pkw im Jahr 2030. Zwischenziele auf dem Weg sind 200.000 Brennstoffzellen-Pkw 2025 in Japan, 37.400 in Kalifornien 2023 sowie 50.000 in China 2025 (electric.net, 2019). Somit stellt diese Technologie eine bedeutende Exportchance für die deutsche Automobilindustrie dar.

4.3.4 F&E-BEDARF

In Bezug auf den Transport größerer Wasserstoffmengen über längere Distanzen (z. B. von einer zentralen Elektrolyse-Anlage an eine Tankstelle oder interkontinental für den Import) sind geeignete Technologien in Abhängigkeit des Mengenbedarfs zu untersuchen: Neben dem heute realisierten Transport in Druckgasflaschen bis 500 bar kommt ein Transport über Pipelines, Flüssigwasserstoff, Methanol, Ammoniak, Methan sowie die LOHC-Technologie infrage.

Da die benötigten Wasserstoffmengen an den Lkw-Tankstellen weit über denen von Pkw liegen (eine Sattelzugmaschine weist den 60-fachen Energiebedarf im Vergleich zu einem Pkw auf), sollten eigene Konzepte für die Versorgung und den Aufbau von Tankstellen mit der hohen Wasserstoff-Nachfrage entwickelt werden.

Die Kosten der Brennstoffzelle sollen in den nächsten Jahren noch reduziert und die Betriebsdauer auf über 8.000 h für Pkw und 25 bis 40.000 h für Lkw und Busse erhöht werden. Insbesondere Anwendungen der Brennstoffzelle in Zügen und Schiffen erfordern sogar noch höhere Lebensdauern. Dazu muss/müssen

- die Platin-Beladung auf unter 0,2 mg/cm² gesenkt werden (von heute 0,3 mg/cm²) bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsdichte auf ca. 2 W/cm² (von heute 1 W/cm²) und Erhöhung der Effizienz durch Anhebung der mittleren Einzelzellspannung auf > 0.75 V (heute 0.65 V)
- die Lebensdauer durch Stabilisierung der Katalysatoren und ihres Katalysatorträgers erhöht sowie die Empfindlichkeit gegenüber Katalysator-Kontamination reduziert werden,
- durch optimierte Beschichtung der metallischen Bipolarplatten deren Langlebigkeit verbessert werden
- die Systemkomponenten vereinfacht werden
- Fertigungsprozesse für eine Hochgeschwindigkeits- und Hochdurchsatzproduktion inklusive Qualitätssicherung entwickelt werden
- Konzepte zum Recycling etabliert werden, um durch Rückführung kostenentscheidender Materialien zur Kostensenkung beizutragen.

Die Kosten für die aus Karbonfasern bestehenden Hochdrucktanks müssen durch verbesserte Fertigungsprozesse der Tanks und innovative Herstellungsprozesse der Karbonfasern auf 10 bis 15 €/kg Wasserstoff gesenkt werden.

4.3.5 POLITIK/REGULIERUNG

Ein wichtiger Hebel für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist eine Reduktion des Wasserstoff-Preises, um Brennstoffzellen-Mobilität für verschiedene Nutzergruppen wirtschaftlich zu machen (siehe 4.1, Kapitel Elektrolyse). Die Unterstützung eines Tankstellenaufbaus sowie einheitliche und schnelle Genehmigungsverfahren für Tankstellen sind bereits angestoßen und sind bis zum Ziel 1000 Tankstellen in 2030 mit öffentlicher Förderung fortzuführen. Zusätzlich muss die Infrastruktur für Lkw realisiert werden. Auch ist eine Initiative zum Aufbau eines europaweiten Tankstellennetzes notwendig.

Die Anwendung von Brennstoffzellen in Lkw kann durch eine moderate Verlängerung der Fahrzeugabmessungen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (von der Industrie gefordert werden 900 mm) für die Sattelzugmaschine unterstützt werden und andererseits durch die Fortführung stringenter CO_2-Flottengrenzwerte für Lkw auf EU-Ebene.

Insbesondere zur Unterstützung des Markthochlaufs bieten sich Anreize zu emissionsfreier Mobilität in der öffentlichen Beschaffung an (Dienstfahrzeuge, Polizeifahrzeuge, Gütertransport).

4.3.6 ROADMAP FÜR DEN VERKEHR

Im Folgenden wird eine Übersicht über die entscheidenden Maßnahmen und Entwicklungsschritte für eine erfolgreiche Einführung und Implementierung der Wasserstofftechnologie im Verkehr gegeben und als Überblick in Abbildung dargestellt.

In *Forschung und Entwicklung (F&E)* sollte das kurzfristige Ziel die Unterstützung der Industrialisierung sein. Insbesondere die mittelständische Industrie des Maschinen- und Anlagenbaus benötigt kurzfristig Forschungskompetenz für den Markthochlauf. Unter anderem bedeutet dies auch:

- Den Aufbau von F&E-Kompetenzzentren zu Wasserstoff-Speicherung und -Transport, zur Brennstoffzellen-Produktion und zum Test von Systemkomponenten, um die Industrialisierung durch die Forschung zu begleiten.
- Die Forschung und Entwicklung insbesondere zu Komponenten in Tankstellen und Brennstoffzellen-Antrieben sollte kurzfristig verstärkt werden.
- Die vielversprechenden Anwendungen der Brennstoffzelle in Flurförderfahrzeugen sollten bis TRL9 entwickelt werden (auch zur Umsetzung von Pilotprojekten an Flughäfen und Schiffshäfen, siehe Markt).
- Die mittel- bis langfristige Entwicklung und innovative Förderung der Kernkomponenten einer Brennstoffzelle (Membran, Katalysatorschicht, Bipolarplatte).
- Die vielversprechenden Synthese-Routen zu nachhaltigen Kraftstoffen sollten weiterverfolgt werden.

Bei der *Marktentwicklung* sind die Ziele der Aufbau der im jeweiligen Marktsegment benötigten Infrastruktur sowie die Markteinführung von Fahrzeugen. Dies umfasst:

- Den Aufbau von Wasserstoff-Verteilnetzen zur Belieferung der Tankstellen, die langfristig über Pipelines erfolgen wird.
- Zusätzlich zum Aufbau eines Pkw-Tankstellennetzes über die H2Mobility bis 2030 muss in den Jahren 2025 bis 2030 ein Schwerlast-Tankstellennetz errichtet werden.
- Für die Pilotumsetzungen für die Rheintalschiene (emissionsfreier Güterverkehr von der Nordseeküste über das Ruhrgebiet bis nach Südeuropa) werden ein Flughafen und ein Schiffshafen vorgeschlagen.

In der *Technologie* ist die Entwicklung von Fahrzeugen und Betankungstechnologien bis zu TRL9 vorrangig. Hierzu gehört:

- Die frühzeitige Erprobung kryogener Speicher sowie LOHC und Pipelines für den Wasserstoff-Transport.
- In Folge sollten HRS entwickelt werden, die kryogenen oder in Methanol, NH_3 oder LOHC gebundenen Wasserstoff verarbeiten können.
- Spätestens ab 2025 sollte die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-Bussen, -Pkw, -Zügen und -Lkw starten.

- Während heute Plattform-Modelle genutzt werden und die Brennstoffzelle den Randbedingungen angepasst wird, sollten bei stärkerer Marktdurchdringung Brennstoffzellen-Fahrzeuge von Grund auf und hinsichtlich ihrer Antriebstechnologie konstruiert werden. Langfristig wird sich eine automatisierte Betankung der Fahrzeuge durchsetzen.
- Zukünftig werden Antriebstechnologien für Schiffe und Flugzeuge zur Nutzung nachhaltiger, synthetischer Kraftstoffe benötigt.

Von der *Politik* sollten vor allem regulatorische Hemmnisse abgebaut werden, um den Durchbruch der Wasserstoff-Technologie zu ermöglichen und Anreize für den Einsatz emissionsfreier Mobilität (technologieunabhängig) zu setzen. Eine wesentliche Motivation für eine entsprechende Politik sollte die Unterstützung der exportorientierten Wirtschaft sein und insbesondere die Vorbereitung der deutschen Industrie auf die Tendenz der asiatischen Märkte. Dies umfasst:

- Die Vereinfachung von Genehmigungsverfahren (u. a. zur Errichtung und dem Betrieb von HRS) und die Anerkennung von Wasserstoff als Kraftstoff gemäß RED II. Regenerative, synthetische Kraftstoffe sollten ebenfalls als emissionsfrei anerkannt werden.
- Die Entwicklung von emissionsfreien Lkw ist in Deutschland durch die erlaubten Abmessungen begrenzt, welche einen Einbau alternativer Antriebe erschweren – diese Vorgaben sollten hinsichtlich Elektroantrieben gelockert werden.
- Um den grenzüberschreitenden Verkehr zu ermöglichen, werden europäische Regelungen benötigt. Hierbei soll Deutschland durchaus eine Führungsrolle beanspruchen.
- Mit der Serieneinführung von Fahrzeugen sollte eine unterstützende Regelung für emissionsfreie Antriebe im öffentlichen Beschaffungswesen eingeführt werden.
- Regularien zur Begrenzung der CO_2-Emissionen im kommunalen ÖPNV, Zugverkehr sowie sukzessive an Flughäfen und Schiffshäfen sollten Ende des kommenden Jahrzehnts in Kraft treten. Die Lkw-Maut sollte in ihrer Höhe emissionsfreie Antriebe entsprechend berücksichtigen, um eine Lenkungswirkung zu erzielen.

Abbildung 7: Roadmap Wasserstoff im Verkehr

4.4 GEBÄUDE

Es können zwei wesentliche Ansätze der Wasserstoff-Nutzung im Gebäudesektor für die Strom- und Wärmeversorgung beschrieben werden. Zum einen wäre der Ansatz einer leitungsgebundenen Wasserstoff-Versorgung aus erneuerbaren Energiequellen für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung über ein reines Wasserstoff-Netz zu nennen. Der zweite Ansatz ist die Wasserstoff-Beimischung im vorhandenen Erdgasnetz. Die erste Variante würde die Umwidmung der bestehenden Infrastruktur erforderlich machen (DVGW 2013). Die zweite Variante erlaubt die Nutzung vorhandener Infrastruktur. Zudem kann etablierte Brennstoffzellentechnologie unter Nutzung von Erdgas und später synthetischem Methan eingesetzt werden. Allerdings können die Grenzen dieser Nutzung heute noch nicht valide und für alle Infrastruktur-Komponenten abgeschätzt werden (DVGW 2013).

Ein dritter Ansatz wäre die Nutzung von dezentralen Wasserstoff-Systemen, die mit erneuerbarem Strom und Elektrolyseur die Energiezwischenspeicherung oder Energieautarkie ermöglichen. Technische Lösungen zur dezentralen Wasserstoff-Speicherung sind hier Metallhydrid- oder Drucktanks oder kleinskalige PtX-Anlagen. Diese Systeme sind allerdings sehr teuer sowie meistens ineffizienter als andere Optionen.

4.4.1 ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFF-BEDARF

In Deutschland bestehen 17 Mio. Wohngebäude, 60 % der Wohnfläche in Ein- und Zweifamilienhäusern, 40 % im Geschosswohnungsbau. Von diesen sind jeweils 47 % (EFH) bzw. 42 % (MFH) mit Gas versorgt. Hinzu kommen weitere 17 % im Geschosswohnungsbau, die mit Fernwärme versorgt werden und deren Energiebereitstellung zukünftig mit Wasserstoff erfolgen kann. Die Substitution dieser Energieträger stellt das grundsätzliche Potenzial für die Wasserstoff-Nutzung dar.

Die Wasserstoff-Nutzung zur Strom- und Wärmeversorgung im Gebäudeenergiesektor wird in Fachkreisen derzeit insbesondere dort diskutiert, wo eine Umstellung auf ein Niedertemperatur-Heizsystem wie in Niedrigenergiehäusern auf Wärmepumpen schwierig ist. In der Regel geht es um Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung – die direkte Verbrennung von Wasserstoff bei Substitution von Erdgas durch Wasserstoff wird derzeit untersucht[6]. Der Zielmarkt wird insofern der Einsatz von Brennstoffzellen-Heizungen in Mehrfamilienhäusern sein. Rein wasserstoffbetriebene Mikro-KWK-BZ-Systeme werden in einem absehbaren Zeithorizont keinen signifikanten Wasserstoff-Bedarf in Deutschland generieren (Wuppertal Institut, ISI, IZES 2018), der Einsatz von größeren Brennstoffzellen als Ersatz für Motor-BHKW kann bei entsprechenden Kostensenkungen eine Rolle spielen (Sterchele et al. 2019). Zu erwähnen ist, dass nicht-wasserstoffbetriebene Erdgas-Brennstoffzellen-Heizgeräte in Japan durchaus stark verbreitet sind.

Es kann unterstellt werden, dass aus Sicht der Hauseigentümer bzw. Anwender nur dann Bedarf für Wasserstoff im Gebäudesektor besteht, wenn vorhandene Gasinfrastruktur zur Nutzung mit

6 Information zum Pilotbetrieb von wasserstoffbetriebenen Haushaltsheizkesseln: https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/bdr-thermea-group-startet-pilotprojekt-mit-wasserstoff-heizkesseln.

Wasserstoff zu ertüchtigen ist. Möglicherweise lässt sich postulieren, dass aus Sicht der Netzbetreiber bzw. Energieversorger ein „Bedarf" für die Wasserstoff-Nutzung im Gebäudesektor besteht, um Erzeugungs- und Verbrauchsmanagement für den weiter zunehmenden Anteil der erneuerbaren Energien zu betreiben. Sollte der Zubau von Windenergie in Deutschland zudem weiter stocken, könnte es notwendig und sinnvoll sein, im Winter Strom über effiziente Brennstoffzellen-KWK-Geräte herzustellen.

4.4.2 STAND DER TECHNOLOGIE UND INFRASTRUKTUREN

Bei der leitungsgebundenen Wasserstoff-Versorgung für Gebäude sind derzeit in Deutschland keine Projekte bekannt, bei denen Wasserstoff-Pipelines dezidiert für die Gebäude-Energieversorgung in Planung oder Realisierung sind. Erste Modellprojekte zeigen allerdings, dass ein Nachrüsten von Gas-Pipelines für den Wasserstoff-Transport technisch möglich ist. Dies kann langfristig („post-fossil") als Szenario für die Wasserstoff-Gebäude-Energieversorgung in Betracht gezogen werden.

Das Thema Wasserstoff-Beimischung zum Erdgasnetz wird seit Längerem kontrovers in der wissenschaftlichen Literatur und seitens der Energieversorger und -verbände diskutiert. Eine Erhöhung bis zu einer maximalen Toleranzgrenze von 20 % (Vol.) Wasserstoff ist technisch möglicherweise unbedenklich und wird derzeit praktisch erprobt (DVGW 2013).

Als saisonüberbrückender Energiezwischenspeicher von regenerativem Strom in Wohngebäuden könnte Wasserstoff in Wasserstoff-Speichersystemen, die Elektrolyseur, Tank und Brennstoffzelle in einer Appliance vereinen, zum Einsatz kommen. Diese Option ist unter Effizienz- und Sicherheitsaspekten allerdings kritisch zu beurteilen. Ein für Spezialanwendungen sinnvoller Einsatz dieser Technologie könnte allerdings bei Off-Grid-Gebäuden oder gewünschter Energieautarkie, wie dem Solarhaus in Freiburg[7], erfolgen.

Die Wasserstoff-Nutzung durch dezentrale PtX-Anlagen befindet sich in der Entwicklung und wird aktuell beispielsweise in einem Pilotprojekt[8] der Stadtwerke Augsburg in einer Wohnanlage erprobt.

Brennstoffzellen-KWK-Anlagen, die nicht auf Wasserstoff, sondern auf der Nutzung des Erdgases durch Reformiertechnik basieren, sind hingegen deutlich im internationalen Markt vertreten und haben ihre technologische Reife nachgewiesen. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei den über 300.000 in Japan installierten Systemen der Verkaufspreis seit Markteinführung um circa 60 % gesunken ist: Sie kosten mittlerweile 10.000 bis 17.000 Euro je Kilowatt. Auch in Europa werden in den Demo-Projekten ene.field, PACE und CALLUX insgesamt 4300 Systeme getestet. Die Rückmeldungen zu den 1500 derzeit laufenden Systemen fielen bisher sehr positiv aus, wobei die Umweltwirkung der getesteten Systeme besser und die Investitionskosten schlechter ab-

7 Information zum Energieautarken Solarhaus in Freiburg: https://siedlungen.eu/db/energieautarkes-solarhaus

8 Information zur PtG-Anlage in einem Wohngebäude der Stadtwerke Augsburg: https://www.sw-augsburg.de/power-to-gas/

schneiden als vergleichbare traditionelle Heiztechnologien (Nielsen et al. 2019). Obwohl Hoffnung in erheblich fallende Preise durch Massenproduktion gelegt wird, ist ein realistischer Business-Case für eine Brennstoffzellen-KWK-Anlage im Einfamilienhaus fraglich und hängt stark von den politischen Rahmenbedingungen ab.

4.4.3 MARKTENTWICKLUNG

Auf weite Sicht wird es, stark abhängig von den politischen Rahmenbedingungen, in Gebieten mit hohem Anteil erneuerbarer Energien eine zunehmende Wasserstoff-Einspeisung ins Erdgasnetz geben. Die Einspeisung wird bis zum maximal möglichen Anteil, der ohne Umstellung der konventionellen Infrastruktur zulässig ist, erfolgen. Allerdings wird mittel- bis langfristig die Einspeisung von reinem Wasserstoff in das Erdgasnetz ökonomisch unrentabel sein und deshalb nur eine Option für Energieversorger darstellen, um politische CO_2-Minderungsvorgaben im Gebäudesektor umzusetzen.

4.4.4 F&E-BEDARF

Ein signifikanter F&E-Bedarf kann aus oben genannten Gründen für wasserstoffbetriebene Systeme, die für den Massenmarkt bestimmt sind, nicht explizit abgeleitet werden.

Allerdings besteht selbstverständlich Forschungsbedarf im thematischen Randbereich solcher Systeme. Diesbezügliche Forschung könnte sich mit folgenden Punkten beschäftigen: Wasserstoff-Einspeisung in Erdgasnetze, Infrastruktur-Aspekte, Sicherheits- und Materialaspekte über längere Zeitperioden, energiewirtschaftliche Bewertung im Vergleich zu alternativen Nutzungsszenarien bzw. Speichertechnologien für regenerativen Strom, techno-ökonomische Potenzialanalyse sowie die Entwicklung robuster, kostengünstiger und zuverlässiger Systeme für den Exportmarkt.

4.4.5 POLITIK/REGULIERUNG

Während in Deutschland erdgasbetriebene Brennstoffzellen-Heizgeräte bereits jetzt ein gewisses Marktpotenzial für die Kraft-Wärme-Kopplung, in der Hausenergieversorgung sowie für Industrieanlagen oder Quartiere entwickeln, erwarten wir durch rein wasserstoffbetriebene Mikro-KWK-BZ-Systeme mittelfristig kein signifikantes Marktpoenzial, das eine relevante Wasserstoffnachfrage generiert. Unsere Prognosen zeigen jedoch, dass es unter bestimmen Rahmenbedingungen, nämlich bei weiterhin ausgebremstem Ausbau von Windenergieanlagen sowie eingeschränkter Verfügbarkeit von CO2-neutralem Stromimport, langfristig zu einem steigenden Marktpotenzial in diesem Bereich kommen könnte (Sterchele et al. 2019).

4.5 STROMERZEUGUNG

Die Korridore für die (Rück-)Verstromung von Wasserstoff in der Europäischen Union liegen im Bereich von wenigen TWh bis zu 70 TWh_{el} im Jahr 2050. Aufgrund seiner zentralen Lage und den vergleichsweise guten Möglichkeiten zum Stromaustausch mit den Nachbarländern entfallen hier nur sehr geringe Anteile auf Deutschland. Wasserstoff wird in den Szenarien meist in

wenigen Stunden zur Deckung der Nachfrage in Zeiten mit sehr geringer Einspeisung eingesetzt. Der Stromsektor wird also voraussichtlich kein großer Treiber der Wasserstoff-Nachfrage sein. Die installierte Leistung von Stromerzeugern auf Basis von Wasserstoff beträgt jedoch in aktuellen Szenarien bis zu 100 GW in Europa. Technologisch erfordert dies günstige Erzeugungskapazitäten, die auch mit geringer Auslastung ökonomisch betrieben werden können. Der Einsatz von wasserstofffähigen Gasturbinen scheint hier eine sinnvolle Option zu sein. Sollten Brennstoffzellen mit niedrigeren spezifischen Investitionen verfügbar werden, könnten diese auch im Bereich der Spitzenlastdeckung der Stromversorgung zum Einsatz kommen.

4.5.1 STAND DER TECHNOLOGIE UND INFRASTRUKTUREN

In der Anlagenklasse unter 100 MW sind bereits heute Gasturbinen für den Einsatz von reinem Wasserstoff als Brennstoff erhältlich (Siemens 2019). Beimischungen von Wasserstoff zu Methan sind bis zu einem gewissen Prozentsatz möglich. Aktuell ist der Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen jedoch auf Spezialfälle beschränkt. Es existiert eine Selbstverpflichtung der europäischen Turbinenhersteller, bis 2020 eine Verträglichkeit von 20 % Wasserstoff für Neuanlagen und bis 2030 anwendungsspezifisch auch 100 % Wasserstoff zu ermöglichen.

4.5.2 F&E-BEDARF

Derzeit sind in einigen Größenklassen bereits Gasturbinen erhältlich, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden können. Hier besteht ggf. noch Forschungsbedarf, um die Kosten zu senken und auch die größten Leistungsklassen auf den Betrieb mit Wasserstoff auszulegen und die Toleranzbreite für Wasserstoff-Beimischungen in den Anlagen zu erhöhen. Wenn für die Versorgung mit Wasserstoff keine großen Transport-Infrastrukturen in Form von Netzen aufgebaut oder genutzt werden können, ergibt sich die Notwendigkeit einer Belieferung und Speicherung von Wasserstoff in der unmittelbaren Nähe der Stromerzeugungsanlagen. In der Planung und technischen Umsetzung kostengünstiger Versorgungs- und Speicherkonzepte für diesen Anwendungsfall besteht aus unserer Sicht hier der größte Entwicklungsbedarf. Die Entwicklung eines Demonstrationsvorhabens mit lokalem Speicher kann bis 2035 sinnvoll sein.

4.5.3 POLITIK/REGULIERUNG

Die Rückverstromung von Wasserstoff wird selbst bei sehr ambitionierten Klimazielen in den nächsten zehn Jahren keine nennenswerte Rolle im Energiesystem spielen. Wir erwarten hier erst nach 2030 eine mögliche Diffusion, die allerdings aus heutiger Sicht keine zusätzlichen Maßnahmen erfordert, solange im Stromsektor ein den Klimazielen angepasster CO_2-Preis herrscht.

4.6 SEKTORENÜBERGREIFENDE ASPEKTE

Wesentliche Schritte für Deutschland auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Welt sind in der nachfolgenden Sektoren-übergreifenden Wasserstoff-Roadmap für Deutschland dargestellt.

In der Wasserstoff-Erzeugung ist *Elektrolyse* die zentrale Technologie. Hier bedarf es einer Kostensenkung auf unter 500 €/kW durch kontinuierliche F&E-Anstrengungen und Skaleneffekte sowie Automatisation in der Produktion. In der Entwicklung stehen angepasste Zellmaterialien zur Erhöhung der Leistungsdichte, Effizienz und Lebensdauer sowie die Senkung des spezifischen Bedarfs kritischer Materialien und die Optimierung des Energiebedarfs bei flexibler und dynamischer Betriebsweise im Vordergrund. Für die Marktdurchdringung muss der Aufbau eines GW-Marktes in Deutschland bis 2030 erfolgen. Dies umfasst insbesondere die Etablierung von Zulieferketten und den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Elektrolyse-Industrie – auch zur Bedienung des internationalen Marktes. Politische Handlungsmöglichkeiten für eine erfolgreiche Wasserstoff-Industrie in Deutschland bestehen unter anderem in der Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen für den Strombezug von Elektrolyseuren, in der Schaffung von Instrumenten zur Nachfrageerhöhung nach grünem Wasserstoff sowie der Umsetzung der RED II in nationales Recht.

Eine verstärkte Nutzung von *Wasserstoff in der Industrie* erfordert weiteren Forschungsbedarf. Bspw. bedarf es der Untersuchung von flexibel betreibbaren Anlagen, die mit wechselnden Feedstocks und Volumenströmen zurechtkommen, der Untersuchung der Methanpyrolyse sowie einer Analyse der Auswirkungen der Feedstock-Änderungen auf cross-industrielle Materialflüsse. Verfahren zur Abtrennung von CO_2 sind noch nicht ausreichend verstanden. Für den industriellen Einsatz ist zudem der Ausbau des Wasserstoff-Pipeline-Netzes insbesondere entlang des Rheins notwendig, da dort zentrale und große Verbraucher angesiedelt sind (Chemieindustrie, Raffinerien, Stahlindustrie etc.). Parallel könnte die Errichtung großskaliger Demonstrationsanlagen zur Durchführung industrienaher Forschungsvorhaben erfolgen, die Aspekte des Scale-ups von PtX-Prozessen sowie deren Integration in bestehende industrielle Infrastrukturen adressieren. Der regulatorische Rahmen muss so angepasst werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb mittels grünem Wasserstoff darstellbar ist. Darüber hinaus erfordert die Markteinführung neuer Herstellungsverfahren auf industriellem Maßstab ein sehr hohes Maß an regulativer Planungssicherheit.

Für *Wasserstoff im Verkehr* sind eine deutliche Weiterentwicklung von Brennstoffzellen-Antrieben und der Aufbau eine Betankungs-Infrastruktur erforderlich. Dafür könnten wesentliche F&E-Aspekte der Produktions- und Speichertechnologien sowie Systemtests in „nationalen Technologieplattformen“ gebündelt werden, um die öffentlichen Fördermittel zu konzentrieren. Der Ausbau der Betankungs-infrastruktur sollte für Pkw und Lkw erfolgen, dabei ist zu beachten, dass Lkw deutlich andere Anforderungen hinsichtlich Wasserstoff-Mengen und grenzüberschreitendem Verkehr haben. Mögliche politische Handlungsoptionen umfassen eine Förderung der Brennstoffzellen-Mobilität und Wasserstoff-Betankung sowie die Vorreiterrolle der öffentlichen Hand in der Beschaffung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Offen ist zudem die regulatorische Anerkennung von Wasserstoff als Kraftstoff statt als Industriegas.

Der *Stromerzeugung auf Basis von Wasserstoff* ist kein zentraler Treiber für die Entwicklung der Wasserstoff-Wirtschaft. Der Sektor kann sowohl weitgehend entwickelte Gasturbinen einsetzen als auch Brennstoffzellen, sofern diese durch die Entwicklung anderer Sektoren günstig verfügbar sind. Der *Gebäudesektor* generiert kurz und mittelfristig keinen relevanten Wasserstoffbedarf. Langfristig kann es unter bestimmten Rahmenbedingungen (bei langsamem Ausbau von

Windenergieanlagen sowie eingeschränkter Verfügbarkeit von CO_2-neutralem Stromimport) zu einem steigenden Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff im Gebäudesektor kommen. Insgesamt wird jedoch im Gebäudesektor kein relevanter Wasserstoff-Bedarf erkannt.

5 INTERNATIONALE DIMENSION

Wie oben gezeigt, hat die direkte oder indirekte Nutzung von Wasserstoff hohe Potenziale für den Elektrolyse-, Industrie- und Verkehrssektor und langfristig auch im der Stromerzeugung. Zur Bewältigung der globalen Herausforderung des Klimaschutzes sowie der Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C müssen die globalen Energiesysteme den Anteil der fossilen Energieträger im Energiemix auf ein Minimum reduzieren und an dessen Stelle eine nachhaltige Energiekreislaufwirtschaft installieren. Diese wird auch weiterhin in hohem Maße auf Kohlenwasserstoffen basieren, die dann jedoch durch erneuerbare Energien sowie treibhausgasneutralen Wasserstoff und Kohlenstoff produziert werden. Insofern können Energiesysteme nicht dekarbonisiert werden, sondern müssen dem Anspruch der Treibhausgasneutralität genügen. In Deutschland wurde dieser Prozess bereits im Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und 2010 durch das Energiekonzept der Bundesregierung initiiert; dies führte zu einem Anteil von erneuerbaren Energien im Strommix von etwa 38 % (2018). Nun wird zunehmend deutlich, dass Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte bei der Treibhausgasneutralität aller energiekonsumierenden Sektoren wie Verkehr, Industrie und Gebäude eine zentrale Rolle einnehmen werden. Neben der direkten Nutzung in den verschiedenen Anwendungsgebieten erfährt Wasserstoff durch seine hohe Speicher- und Transportierbarkeit eine zunehmende Bedeutung bei steigender Systemintegration von erneuerbaren Energien.

Die Wasser-Elektrolyse wird in ihrer nationalen Dimension zu einer entscheidenden industriepolitischen Komponente werden. Dies betrifft sowohl die Erzeugung von Anteilen des in Deutschland benötigten Wasserstoffs als auch Flexibilitätsoption im deutschen Stromnetz. Als Kerntechnologie der Energiewende wird Wasserstoff für den internationalen Exportmarkt relevant. Wasserstoff wird einen entscheidenden Beitrag zur Treibhausgasneutralität der Sektoren Industrie und Verkehr leisten und auch in Gebäuden und bei der Rückverstromung Teil der Lösung sein, wenn jetzt die entsprechenden marktpolitischen Anreize mit dem Ziel einer deutlichen Lenkungswirkung gesetzt werden..

- Studien gehen von einem Markthochlauf der Wasser-Elektrolyse allein in Deutschland zwischen 50 und 80 GW im Stromnetz bis 2050 aus. Damit dies gelingt, müssen jetzt zweistellige MW-Elektrolyseure installiert und bis Ende der 20er-Jahre bereits Zuwachsraten von etwa 1 GW pro Jahr erreicht werden. Wasserelektrolyseure werden darüber hinaus großmaßstäblich in Regionen ihren Einsatz finden, in denen die Stromgestehungskosten durch PV- und Windanlagen bei unter 3 ct/kWh liegen und darüber hinaus die Volllaststundenzahl solcher Anlagenparks über 4000 h/Jahr beträgt. Dies ermöglicht den Eintritt in einen globalen erneuerbaren Energien-Handel, da sowohl Wasserstoff als auch darauf aufbauende Syntheseprodukte zu international konkurrenzfähigen Kosten hergestellt werden können.

Somit ermöglicht Wasserstoff neben der Umsetzung nationaler Industriepolitik- sowie Nachhaltigkeitsziele auch die Fortführung der globalen Energiewende. Dazu muss auch auf globaler Ebene das Erzeugungsangebot durch Solar- und Windkraftanlagen in hierfür bevorzugten Regi-

onen mit dem Bedarf an Energieträgern, Kraftstoffen und Basischemikalien in den entsprechenden Industrieregionen in Einklang gebracht werden. Wasserstoff kann in flüssiger Form in Analogie zu LNG (Liquified Natural Gas) direkt transportiert werden, aber auch in chemisch gebundener Form wie Ammoniak, Methanol oder auch LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

Viele Regionen in der Welt bereiten sich auf diese Form des Handels nachhaltig erzeugter Energieträger und Basischemikalien vor, was für Deutschland neue Energiepartnerschaften jenseits der bisherigen fossilen Energiepartnerschaften ermöglicht. Zur Realisierung derartiger Handelsrouten kommt den internationalen Häfen und deren oft angrenzenden Industrieregionen eine große Bedeutung zu, da hier häufig nicht nur Raffinieren angesiedelt sind, sondern auch über die Logistikrouten eine Verteilinfrastruktur der Wasserstoff-Produkte gegeben ist.

Zur Realisierung eines internationalen Handelssystems von erneuerbaren Energien auf wasserstoffbasierten Produkten sind folgende Themen von Bedeutung:

- Die Technologiebasis der gesamten Wertschöpfungskette existiert, jedoch muss weiterhin in Forschung investiert werden, um die Kosten zu reduzieren und die Langlebigkeit der Produkte weiter zu erhöhen.
- Es müssen international harmonisierte und zertifizierte Standards für wasserstoffbasierte Energieträger und Chemikalien entwickelt werden.
- Die Systemanalyse liefert wichtige Informationen über die zu erwartenden Geschäftsmodelle in den Gesamtketten.
- Energiepartnerschaften mit Ländern mit hohen Ausbaupotenzialen erneuerbarer Energien schaffen eine langfristig attraktive Investitionsumgebung.

  Internationale Forschungskooperationen und Energiepartnerschaften sind Voraussetzung für langfristige Handelsbeziehungen.

Die technischen Potenziale sind enorm, da sich praktisch alle fossilen Energieträger substituieren lassen (siehe zu Berechnungen einer solchen Umstellung UBA 2014). Dort werden in Summe 2600 bis 2850 TWh an Strombedarf in einem solchen Szenario in Deutschland für das Jahr 2050 quantifiziert, wenn Wasserstoff direkt oder indirekt als PtX-Kraftstoff die dominierende Lösung in vielen Anwendungen ist. Dies erfordert einen erheblichen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland, die 2018 einen Umfang von 226 TWh hatte (UBA 2019). Das Ausbaupotenzial an erneuerbarer Stromerzeugung wird in Deutschland aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz bei 700 bis 1000 TWh gesehen. Somit reichen die heimischen Potenziale erneuerbarer Energien zur Deckung der Wasserstoff-Nachfrage nicht aus. Auch das Ausbaupotenzial für erneuerbare Stromerzeugung in den europäischen Nachbarstaaten ist begrenzt. Als Alternative zur Herstellung heimischer Stromkraftstoffe bietet sich deshalb eine Produktion in den Regionen der Welt an, die aufgrund ihrer geografischen und klimatischen Gegebenheiten ein natürlich hohes Angebot an erneuerbaren Energien haben.

5.1 GLOBALE WASSERSTOFF-PRODUKTION

Verschiedene Studien zur globalen Wasserstoffproduktion haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Ländern, wie beispielsweise Marokko, die Arabische Halbinsel, Australien, Island, Chile und Argentinien, für einen substanziellen Export von Wasserstoff in Frage kommen. Die Produktion von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen ist in diesen Ländern unter Einbeziehung der Transportkosten günstiger zu bewerkstelligen als eine heimische Produktion. Eine Reihe von Punkten muss in diesem Zusammenhang bedacht werden:

- Die Entwicklung von Transformationsstrategien in potenziellen Lieferländern sollte zügig erfolgen.
- Die Standort-Analysen zur Eignung potenzieller Lieferländer sollten eine Grundlage für die Strategiefindung aus europäischer Sicht bilden:
  - entwickelte erdölexportierende Länder, u. a. wegen Kapitalverfügbarkeit, Perspektiven zum Ausstieg aus der Erdölförderung bzw. zu deren Ergänzung, technologischem Know-how?
  - entwickelte Länder ohne Erdölförderung mit guten klimatischen und geografischen Voraussetzungen (z. B. Australien) und Schwellenländer (z. B. Marokko), um auch hier industriepolitische Impulse zu setzen?
- Fragen der Technologieoptionen und Wertschöpfungsketten sind zu klären:
  - Wie kann der Produktionsaufbau in den Lieferländern erfolgen?
  - Welche heimische Wertschöpfung ergibt sich für die Länder?
  - Wo liegen Exportchancen für deutsche Unternehmen des Anlagenbaus?
  - Welche Transportformen werden präferiert: Wasserstoff, Methanol, Ammoniak, LOHC, Methan?
  - Gibt es zuverlässige Technologien für den interkontinentalen Transport von flüssigem Wasserstoff?
- Entwicklung von Nachhaltigkeitsanforderungen sollten bedacht werden:
  - Welche Nachhaltigkeitsanforderungen sind bei der Produktion von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen in den Lieferländern zu entwickeln, u. a. bezüglich Umweltschutz, Deckung heimischer Nachfrage?
- Szenarien zur Ausgestaltung der heimischen Produktion sollten erarbeitet werden:
  - Soll aus Gründen der Versorgungssicherheit ein gewisser Anteil von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen in Deutschland hergestellt werden?
  - Welche Höhe von heimisch produzierten synthetischen Brenn- und Kraftstoffen ist in Deutschland aus einer Energiesystem-Perspektive sinnvoll (regelbare Nachfrage und Speicher im System zur optimalen Systemintegration von EE)?

5.2 EXPORTPOTENZIAL FÜR DIE EUROPÄISCHE INDUSTRIE

Die erwartete globale Wasserstoff-Nachfrage impliziert substanzielle Chancen für die deutsche Industrie durch die Generierung von Vorreitermärkten. Auf Basis der Abschätzungen zur globalen installierten Kapazität von Elektrolyseuren von 3000 GW im Jahr 2050, die einen jährlichen Zubau von 20 GW in der Dekade 2020-2030 und von 200 GW in der Dekade 2040-2050 implizieren, wurde die mögliche Wertschöpfung für die deutsche Industrie auf etwa 5,5 Mrd. € pro

Jahr geschätzt. Für den Bereich der Brennstoffzellen im Verkehr ergeben sind Volumina an inländischer Wertschöpfung von etwa 2,4 Mrd. €/a bis 2030 und etwa 26 Mrd. € pro Jahr im Zeitraum 2040-2050. Somit ist in einem optimistischen Szenario ein Anstieg der globalen Wertschöpfung deutscher Hersteller bei Elektrolyse und Brennstoffzellen von etwa 10 Mrd. € in 2030 auf etwa 32 Mrd. € in 2050 möglich (Fraunhofer 2019).

Diese Ergebnisse liegen im selben Bereich wie die in der Fuel Cell and Hydrogen Roadmap (FCH 2019) veröffentlichten Zahlen mit 30 Mrd. € in 2030 in der EU in den Feldern „Transport" und „New Feedstock".

Weitere wichtige Märkte mit großem Potenzial für die deutsche Industrie liegen im Bereich der Erzeugungstechnologien für erneuerbare Energien (insbes. Windenergie und Photovoltaik), im Bereich der Power-to-Liquid-Technologien, bei Gasturbinen für Wasserstoff, im Bereich der Methanisierung, der industriellen Nutzung von Wasserstoff sowie neuer Gasinfrastrukturen für Wasserstoff.

6 QUELLEN

ArcelorMittal (2017). Development of new methodologies for Industrial CO2-free steel production by electrowinning. Abgerufen von https://www.siderwin-spire.eu/ (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

ArcelorMittal (2018). ArcelorMittal and LanzaTech break ground on €150million project to revolutionise blast furnace carbon emissions capture [Pressemitteilung]. Abgerufen von http://www.steelanol.eu/en/news/arcelormittal-and-lanzatech-break-ground-on-150million-project-to-revolutionise-blast-furnace-carbon-emissions-capture (zuletzt geprüft am: 23.09.19)

ArcelorMittal (29.05.19). ArcelorMittal publishes first Climate Action Report [Pressemitteilung]. Abgerufen von https://corporate.arcelormittal.com/news-and-media/press-releases/2019/may/29-05-2019 (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

ArcelorMittal Deutschland. (28.03.19). Weltneuheit für Stahl: ArcelorMittal untersucht industriellen Einsatz von reinem Wasserstoff [Pressemitteilung]. Abgerufen von https://germany.arcelormittal.com/News-und-Medien/2019/broker.jsp?uMen=89b7978c-4ffe-7610-3928-d05b8e0b2b66&uCon=71a40c6c-f454-b961-d4e1-e3050736c0f2&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042&_ic_currentpage=1&_ic_current-pagesize=60&all=true&_ic_back=true (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

BDI (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI durchgeführt von BCG und Prognos. BCG: Berlin

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

BMWi (2016). Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin

BMVI (2017): Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr - Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.) (2018): Kli-maschutz in Zahlen – Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2019.

CCKM (2017): Umsetzung Klimaschutzplan 2050: Maßnahmenprogramm „INDUSTRIE". Cluster Chemie/Kunststoffe Mitteldeutschland, Kooperationsnetzwerk Chemie+, HYPOS. Leuna, Halle, Leipzig

DBI (2016): Wirtschaftliche Bewertung der HYPOS-Wertschöpfungsketten zur Wasserstofferzeugung im Kontext der verschiedenen Nutzungspfade – Wasserstoff-Index Teil 1: Potenzialanalyse zum Absatz von Wasserstoff in der Modellregion HYPOS. ABSCHLUSSBERICHT. DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg: Freiberg

Dechema (2017): Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industrie. Technology Study, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Juni 2017. Web-Link: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf

Dena (2018): dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende. Deutsche Energie-Agentur, Berlin

Deutsch, Matthias; Maier, Urs; Perner, Jens; Unteutsch, Michaela; Lövenich, Andrea (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Hg. v. Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. Berlin, Köln.

DVGW (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Abschlussbericht. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Februar 2013. https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_07_10.pdf

EC (2018): A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussels: European Commission

Electrive.net (2019): China will eine Million Brennstoffzellenfahrzeuge bis 2030. https://www.electrive.net/2019/09/04/china-will-eine-million-brennstoffzellenfahrzeuge-bis-2030/

E-mobil (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge – Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Studie, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg. Oktober 2017. Web-Link: https://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/PDF_2017/NFZ-Studie.pdf [26.09.2019]

EUROFER (2013). A steel roadmap for a low carbon europe 2050. Wirtschaftsverband der europäischen Eisen- und Stahlindustrie (EUROFER). Brüssel. Online Verfügbar unter http://eurofer.org/News %26Events/PublicationsLinksList/2013-Roadmap.pdf (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

European Commission (2018): IN-DEPTH ANALYSIS IN SUPPORT OF THE COMMISSION COMMUNICATION COM (2018) 773 – A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy

FCH (2019): Hydrogen Roadmap Europe – A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Luxembourg: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking

Fleiter, Tobias; Herbst, Andrea; Rehfeldt, Matthias; Arens, Marlene (2019): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation. Fraunhofer ISI; ICF. Karlsruhe, London.

Fraunhofer (2019): Eigene Berechnungen im Rahmen des Fraunhofer Wasserstoff-Netzwerks.

Hobohm, Jems; auf der Maur, Alex; Dambeck, Hans; Kemmler, Andreas; Koziel Sylvie; Krei-delmeyer, Sven et al. (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ. Endbericht. Prognos AG; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT); Deutsches Biomasseforschungszentrum. Berlin.

Hölling, M.; Weng, M.; Gellert, S. (2017). Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff. Stahl und Eisen, 137 (6), 47-53.

Hydrogen Council (2017a): How hydrogen empowers the energy transition. In: Hydro-gen Council.

Hydrogen Council (2017b): Hydrogen scaling up A sustainable pathway for the global energy transition. In: Hydrogen Council, Roadmap. Online verfügbar unter hydro-gencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf.

IEA (2019): The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities. Final Report. International Energy Agency, Juni 2019. Web-Link: https://webstore.iea.org/the-future-of-hydrogen

IRENA (2018): Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. Unter Mitarbeit von Emanuele Taibi and Raul Miranda (IRENA), Wouter Vanhoudt. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi.

Machhammer, O.; Bode, A.; Hormuth, W. (2016): Methane Pyrolyis and CO2 Activation – Technologies with Application Option for Hydrogen, Carbon and Synthesis Gas production. Chem. Eng. Technol. 39, 6, 1185-1193

Nielsen, E. R., Prag, C. B., Bachmann, T. M., Carnicelli, F., Boyd, E., Walker, I., ... & Stephens, A. (2019). Status on Demonstration of Fuel Cell Based Micro-CHP Units in Europe. Fuel Cells, 19(4), 340-345.

NOW (2018): Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Hg. v. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, September 2018.

NOW (2018a): IEK2050-Studie. Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen; Kurzfassung. Hg. v. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, November 2018.

NPM (2019): Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr. Zwischenbericht 03/2019. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM).

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2017.

Oles, M.; Lüke, W.; Kleinschmidt, R.; Büker, K.; Weddige, H. J.; Schmöle, P.; Achatz, R. (2018). Carbon2Chem® – A Cross-Industry Approach to Reduce Greenhouse Gas Emissions. Chemie Ingenieur Technik, 90(1-2), 169-178.

Otto, A.; Ribinius, M.; Grube, T.; Schiebahn, S.; Praktiknjo, A.; Stolten, D. (2017). Power-to-Steel: reducing CO2 through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. Energies 10 (4), 451.

Pfennig, Maximillian; Gerhardt, Norman; Pape, Carsten; Böttger, Diana (2017): Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H2-Wasserstoff-Importen aus internationalen Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: Klimawirksamkeit Elektromobilität – Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Teilbericht. Fraunhofer – Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES. Kassel.

Salzgitter AG (03.04.19). Salzgitter AG und Tenova unterzeichnen Absichtserklärung für das SALCOS-Projekt: CO2-arme Stahlproduktion auf Wasserstoffbasis [Pressemitteilung]. Abgerufen von https://www.salzgitter-ag.com/de/medien/pressemeldungen/pressemeldung-der-salzgitter-ag/2019-04-03-1/salzgitter-ag-und-tenova-unterzeichnen-absichtserklrung-fr-das-salcosprojekt-co2arme-stahlproduktion-auf-wasserstoffbasis.html (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

Sterchele et al. (2019): Transformationspfade für die Energiewende. Fraunhofer ISE.

Sternberg et al. (2017): Life cycle assessment of CO2-based C1-chemicals, Green Chem., 2017, 19, 2244

Tacke, K.-H.; Steffen, R. (2004). Hydrogen for the reduction of iron ores – state of the art and future aspects. Stahl und Eisen, 124 (4), 45-52.

Thyssenkrupp. (02.07.19). thyssenkrupp gibt sich klare Ziele: Konzern will bis 2050 klimaneutral sein – für 2030 bereits 30 Prozent weniger Emissionen geplant [Pressemitteilung]. Abgerufen von https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/thyssenkrupp-gibt-sich-klare-ziele--konzern-will-bis-2050-klimaneutral-sein---fuer-2030-bereits-30-prozent-weniger-emissionen-geplant-12803.html (zuletzt geprüft am: 02.09.19)

Timmerberg, S.; Bullerdiek, N.; Kaltschmitt, M.; Gnann, T.; Wietschel, M. (2019): Import von Stromkraftstoffen für den Verkehr – Lkw, Binnen-/Seeschiffe, Flugzeuge. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. TUUH und Fraunhofer ISI

Timmerberg, Sebastian; Kaltschmitt, Martin (2019): Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs. In: Applied Energy 237, S. 795–809. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.030.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2019). Umweltbundesamt auf Basis „Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik" (AGEE-Stat): https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2018-anteil-erneuerbarer-energien-steigt-auf

VCI (2019): Sektorenkopplung P2X – Regulierungsgrundlagen für die Sektorenkopplung aus Sicht der chemischen Industrie. Verband der Chemischen Industrie e.V.: Frankfurt

Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; Schulte, F. (Hrsg.) (2015): Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH.

Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.) (2018): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken