

Kaiser, Oliver S.; Malanowski, Norbert

Working Paper

Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft: Fördernde und hemmende Faktoren im Verkehrssektor und der chemischen Industrie

Working Paper Forschungsförderung, No. 193

Provided in Cooperation with:

The Hans Böckler Foundation

Suggested Citation: Kaiser, Oliver S.; Malanowski, Norbert (2020) : Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft: Fördernde und hemmende Faktoren im Verkehrssektor und der chemischen Industrie, Working Paper Forschungsförderung, No. 193, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/225330>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode>

WORKING PAPER FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Nummer 193, Oktober 2020

Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft

Fördernde und hemmende Faktoren im
Verkehrssektor und der Chemischen Industrie

Oliver S. Kaiser und Norbert Malanowski

© 2020 by Hans-Böckler-Stiftung
Georg-Glock-Straße 18, 40474 Düsseldorf
www.boeckler.de



„Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft“
von Oliver S. Kaiser und Norbert Malanowski ist lizenziert unter

Creative Commons Attribution 4.0 (BY).

Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. (Lizenztext: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode>)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. von Schaubildern, Abbildungen, Fotos und Textauszügen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

ISSN 2509-2359

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
Hintergrund	5
1. Technisch-ökonomischer Stand im Bereich Wasserstoffwirtschaft bei Verkehr und chemischer Industrie.....	7
1.1 Ausgangssituation	7
1.2 Straßenverkehr	10
1.3 Schienenverkehr.....	12
1.4 Chemie	14
2. Technische Perspektiven	16
2.1 Straßenverkehr.....	16
2.2 Flugverkehr.....	18
2.3 Energietechnik	19
2.4 Wasserstoffspeicherung	20
2.5 Wasserstofferzeugung offshore	22
2.6 Direkte Konversion ohne elektrische Energie.....	23
2.7 Stahlproduktion.....	23
3. Stellung des Standorts Deutschland im internationalen Wettbewerb.....	25
3.1 Japan und Australien	25
3.2 Südkorea, China und USA.....	26
3.3 Frankreich, Schweiz und Niederlande.....	26
3.4 Deutschland.....	28
4. Fördernde und hemmende Einflussfaktoren.....	29
4.1 Fördernde Faktoren	29
4.2 Hemmende Faktoren	30
5. Sozio-ökonomische Aspekte in Gegenwart und Zukunft.....	34
6. Thesen für die weitere Diskussion.....	40
Literatur.....	43
Autoren	55

Zusammenfassung

Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist der Einsatz von Wasserstoff aus heutiger Sicht unumgänglich. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber spielt Wasserstoff für die Direktnutzung sowie zur Weiterverarbeitung im Energiesystem noch kaum eine Rolle. CO₂-freier Wasserstoff, der auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wird („grüner“ Wasserstoff), ist auf Dauer nachhaltig. Für den zügigen Markthochlauf der Wasserstofftechnologien zur Dekarbonisierung in verschiedenen Anwendungsbereichen wird zunächst aus ökonomischen Gründen auch CO₂-neutraler („blauer“) Wasserstoff eine Rolle spielen müssen.

Ein wichtiger Hebel für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist eine Preissenkung von Wasserstoff, um Brennstoffzellen-Mobilität wirtschaftlich zu machen. In mobilen Anwendungsfällen stehen Brennstoffzellen in direktem Wettbewerb mit der Batterietechnik. Die hohe Belastung von Strom mit Abgaben und Steuern begrenzt derzeit den verstärkten Einsatz von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien z. B. in den Bereichen Verkehr, Chemie und als Energiespeicher. Das Zielmodell für die regulatorischen Rahmenbedingungen sollte sowohl zu einem ökonomisch effizienten Gesamtsystem als auch zu einer weitgehenden Internalisierung von Umweltkosten (u. a. durch CO₂-Emissionen) führen. Es ist grundsätzlich technologieoffen zu gestalten.

Ohne die Entwicklung eines EU-Binnenmarktes für CO₂-freien Wasserstoff wird der wettbewerbsfähige Einsatz von Wasserstoff in Deutschland und Europa suboptimal verlaufen. Als erster Schritt für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien ist jedoch eine starke inländische Wasserstoffproduktion und Wasserstoffverwendung unverzichtbar. Bei einer Hochskalierung (in Deutschland) benötigt die zukünftige Wasserstoffwirtschaft gut ausgebildete Fachkräfte, die im Kontext guter Arbeit zur Weiterentwicklung und internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffwirtschaft maßgeblich beitragen. Damit ist Wasserstoff auch ein explizites Bildungsthema: Die zukünftige Wasserstoffwirtschaft braucht Fachkräfte – in Deutschland und in anderen Ländern.

Die notwendigen Transformationsprozesse im Zuge der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft sind mit gezielten Dialog- und Gestaltungsprozessen unter Beteiligung der relevanten Stakeholder voranzutreiben. Das Monitoring zu Wasserstoffstrategien und deren Weiterentwicklung im Zuge sogenannter Green Deals wird von Arbeitnehmerakteuren proaktiv mitzugestalten sein. Sie werden damit zunehmend zu Innovationsakteuren in Globalen Innovationsnetzwerken (GINs) und innovations- und industriepolitischen Foren auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene.

Hintergrund

Im Rahmen des von der Hans-Böckler-Stiftung geförderten Projektes [„Monitoring Innovations- und Technologiepolitik“](#), wurde das Thema „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft“ in Form einer Themenskizze als eines von fünfzehn Innovations- und Technologiethemen einem ausgewählten Kreis von Fachleuten vorgestellt und dort diskutiert. Die Fachleute aus Wirtschaft, Wissenschaft, politischer Administration und Gewerkschaften bewerteten in einem sogenannten Priorisierungsworkshop im Sommer 2018 das Thema als dringlich hinsichtlich einer weiteren Auseinandersetzung im Kontext der Arbeitnehmerrelevanz (Malanowski et al. 2019).

Aus dieser Einschätzung heraus wurde das Thema speziell auf Verkehr und Chemie fokussiert, aufmerksam weiter beobachtet und schließlich vertieft, da bereits heute die notwendigen Voraussetzungen für eine Anwendung von Wasserstoff in diesen Bereichen gegeben sind. Beim dementsprechend konzipierten Vertiefungsworkshop zum Thema „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Verkehr und Chemie“ diskutierten im Januar 2020 Expertinnen und Experten aus den Technik, Wirtschafts-, Sozial- und Geisteswissenschaften sowie der Gewerkschaften das Thema aus verschiedenen fachlichen Perspektiven vor allem anhand folgender Leitfragen:

- Wie ist der derzeitige techno-ökonomische Stand bei Forschung und Entwicklung im Bereich Wasserstoffwirtschaft bei Verkehr und chemischer Industrie? Welche Rolle spielen dabei Globale Innovationsnetzwerke (GINs)?
- Welche Fortschritte werden in der näheren Zukunft erwartet, die in der Öffentlichkeit noch nicht breit diskutiert werden?
- Welche fördernden und welche hemmenden Faktoren sind beim Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft zu beobachten? Wie wirken sich diese auf Geschäftsmodelle und Arbeitnehmerinteressen aus?
- Welche sozio-ökonomischen Aspekte (Rahmenbedingungen, Finanzierung, Investitionen etc.) werden gegenwärtig in der Diskussion über Wasserstoffwirtschaft thematisiert?
- Welche sollten zukünftig thematisiert werden (u. a. Beschäftigungsentwicklung, Arbeitsorganisation, Qualifizierung, Nutzen für die Beschäftigten, „Gute Arbeit“)?
- Wie ist gegenwärtig die Stellung des Standortes Deutschland im internationalen Wettbewerb bei diesem Thema zu bewerten?
- Welche zukünftigen Schritte sind beim Thema „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Verkehr und Chemie“ notwendig (u. a. Rahmenbedingungen für ein Up-Scaling prototypischer Anwendungen)?

Die empirische Basis für das vorliegende Working Paper bilden die aufbereiteten Ergebnisse einer Literaturanalyse (Stand: Juni 2020) und des Vertiefungsworkshops „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Verkehr und Chemie“, der im Januar 2020 in Düsseldorf durchgeführt wurde. Diese Ergebnisse basieren nicht auf „harten“ Daten sondern spiegeln eher gegenwärtige Einschätzungen, Erwartungen und Thesen von Fachleuten wider. Insofern dienen die Erkenntnisse vor allem dazu, als erste Vertiefung bzw. Deep Dive relevante Trends frühzeitig zu erkennen und diese für eine prospektive Innovations- und Technikgestaltung im Dreiklang von Mensch, Organisation und Technik aufzubereiten. Die vor Redaktionsschluss (Juni 2020) veröffentlichte Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (BMWi 2020b) wurde berücksichtigt, die im Juli 2020 veröffentlichte „Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe“ der Europäischen Kommission konnte hingegen im Rahmen des vorliegenden Working Papers nicht mehr berücksichtigt werden.

Das Working Paper soll zum einen erste Antworten auf die oben genannten Leitfragen skizzieren. Zum anderen soll es Denkanstöße für eine breitere öffentliche Diskussion des Themas in einem innovations- und arbeitspolitischen Kontext liefern. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle sehr herzlich bei den Fachleuten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Gewerkschaften und Betriebsräten, die ihr Wissen aus verschiedenen fachlichen Perspektiven im Rahmen des Vertiefungsworkshops offen geteilt und zur Diskussion gestellt haben sowie bereit waren, über den eigenen Tellerrand hinauszuschauen.

1. Technisch-ökonomischer Stand im Bereich Wasserstoffwirtschaft bei Verkehr und chemischer Industrie

1.1 Ausgangssituation

Das Thema Wasserstoff befindet sich auf dem Weg zu einem vielbeachteten und -praktizierten Ansatz, der auch außerhalb der wissenschaftlichen Fachdiskussion deutlich an Popularität in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft gewinnt. Dies wird z. B. deutlich daran, dass im Juni 2020 die „Nationale Wasserstoffstrategie“ in Deutschland verabschiedet worden ist (BMWi 2020b). Aus der Sicht der Bundesregierung liegt das übergeordnete Ziel der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) darin, „die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Chancen zu nutzen“ (BMWi 2020b, S. 2). Mit der NWS soll ein „kohärenter Handlungsrahmen für die künftige Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverwendung von Wasserstoff und damit für entsprechende Innovationen und Investitionen“ (ebd., S. 5) geschaffen werden. Im Einzelnen geht es darum,

- „Wasserstofftechnologien als Kernelemente der Energiewende (zu) etablieren, um mit Hilfe erneuerbarer Energien Produktionsprozesse zu dekarbonisieren.
- die regulativen Voraussetzungen für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien zu schaffen.
- deutsche Unternehmen und ihre Wettbewerbsfähigkeit (zu) stärken, indem Forschung und Entwicklung und der der Technologieexport rund um innovative Wasserstofftechnologien forciert werden.
- die zukünftige nationale Versorgung mit CO₂-freiem Wasserstoff und dessen Folgeprodukte (zu) sichern und (zu) gestalten.“

Wasserstoffwirtschaft gilt in der Regel als ein eher abstrakter Begriff für eine noch zu schaffende Energiewirtschaft, die Wasserstoff – oder das daraus erzeugte Methan – als Energieträger und damit auch als Energiespeicher verwendet. Die Wasserstoffwirtschaft verknüpft – vereinfacht dargestellt – das Elektrizitätssystem mit der stofflichen Welt des Wasserstoffs, der auch Rohstoff sein kann.

Grob skizziert sind die wichtigsten elektrischen Anwendungen folgende:

- *Wasserstoffproduktion durch Wasserelektrolyse:* Das Wasser wird in einem Elektrolyseur durch Zufuhr von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.
- *Anwendung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle zur Stromerzeugung:* Der Wasserstoff (oder auch das in Erdgas enthaltene Methan) und aus der Luft zugeführter Sauerstoff reagieren in der Brennstoffzelle unter Abgabe elektrischer Leistung zu reinem Wasser. Die bei der üblichen Stromerzeugung nötige Verbrennung eines Kraftstoffs (Kohle, Erdgas, Mineralöl) mit Wärmeerzeugung und Umsetzung der Wärme in mechanische Bewegung der Stromgeneratoren, entfällt bei Brennstoffzellen als Energiewandler. Sie eignen sich für die stationäre Stromerzeugung von Privathaushalten bis zu stromnetzfernen Anwendungen.
- *Stationärer Einsatz zur Speicherung von elektrischer Energie, bei dem der erzeugte Wasserstoff resp. das Methan in Drucktanks, Kavernen oder in einer vorhandenen Infrastruktur wie dem Erdgas-Rohrleitungsnetz gespeichert wird:* Hier steht vor allem die Speicherung von „überschüssigem“ Strom aus regenerativen Quellen wie Windenergieanlagen im Fokus, da elektrische Energie in dem Moment verbraucht werden muss, in dem sie erzeugt wird. Da die regenerativen Energiequellen Sonne und Wind streng angebotsorientiert arbeiten, kann die Energiespeicherung Angebot und Nachfrage zusammenbringen. Die sogenannte „Rückverstromung“ erfolgt derzeit meist ohne Brennstoffzellen durch Verbrennung des geringen Wasserstoffanteils im Erdgas in klassischen Gaskraftwerken.
- *Mobiler Einsatz zur Stromerzeugung für elektrische Antriebe:* Das können sowohl Sonderfälle wie Flurförderzeuge sein, die im industriellen Umfeld abgasfrei fahren müssen, als auch Pkw und Nutzfahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr und Schienenverkehrsmittel. In der Regel sind die Brennstoffzellen-Pkw und -Nutzfahrzeuge mit einer Batterie kleiner Kapazität ausgestattet, die die Leistungsspitzen abfängt, während die Brennstoffzelle recht kontinuierlich aus dem Wasserstoff Strom erzeugt. Das Fahrverhalten von Brennstoffzellenfahrzeugen ist daher den heute gängigen batterieelektrischen Fahrzeugen sehr ähnlich.

In der chemischen Industrie werden z. B. mehrere Pfade gleichzeitig verfolgt. Wasserstoff wird dort sowohl als Energieträger als auch für die Herstellung von Grundchemikalien verwendet. In der Stahlerzeugung werden z. B. neue Verfahren im industriellen Maßstab erprobt, um mittels Wasserstoff den Kohlendioxid-Ausstoß zu verringern.

Die auf Wasserstoff basierenden Technologien repräsentieren derzeit weltweit noch keine einheitliche Wasserstoffwirtschaft. Das ist am Begriff „Sektorkopplung“ erkennbar. Traditionell wurde zwischen den Wirtschaftssektoren Elektrizität, Verkehr und Industrie getrennt gearbeitet. Heute geht es vielfach um die Vernetzung der Sektoren. Sie können über z. B. über Wasserstofftechnologien „gekoppelt“ werden: Wasserstoff für industrielle Zwecke oder als industrielles Nebenprodukt kann im Verkehr genutzt werden, regenerativ erzeugter Strom kann mittels Wasserstoff außerhalb des Energiesektors gespeichert und in Verkehr und Industrie genutzt werden. Stoffliche und energetische Nutzung des Wasserstoffs gehen ineinander über, das elektrische Energiesystem wird mit Materialströmen verbunden. Der aufstrebenden Nutzung als Energieträger steht womöglich eine geringere Bedeutung als Rohstoff entgegen, falls sich der Bedarf an Grundstoffen ändern wird, zumal Materialien durchaus verschiedenartig genutzt werden.

Derzeit wird Wasserstoff fast ausschließlich aus fossilen Quellen wie Erdgas und Kohle hergestellt, jährlich etwa 118 Millionen t. Davon werden lediglich ca. 5 Prozent gehandelt und der Rest am Ort der Erzeugung weiter verarbeitet, so dass es noch keine nennenswerten Transportkapazitäten für Wasserstoff gibt (Hebling, C. et al. 2019).

Eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft basiert stets auf dem Idealfall des „grünen“ Wasserstoffs, der aus erneuerbarem Strom, also Photovoltaik, Windenergie, Biomasse oder Wasserkraft, klimaneutral hergestellt wird. Dem an sich farblosen Gas Wasserstoff werden in der öffentlichen Diskussion noch weitere Farben zugeordnet, um dessen Herkunft aufzuschlüsseln: „Grauer“ Wasserstoff wird mittels Dampf-Reformierung aus Erdgas produziert, dabei entweicht klimaschädliches Kohlendioxid in die Atmosphäre. Diese Produktionsart ist derzeit der weltweite Standard. Bei „blauem“ Wasserstoff wird das Kohlendioxid bei der Entstehung abgeschieden und unterirdisch gespeichert (engl. Carbon Capture and Storage, CCS). Dies geschieht nur im experimentellen Maßstab, einzig Norwegen plant diesen Weg in größerem Umfang. Bei „türkischem“ Wasserstoff entsteht durch die thermische Spaltung von Methan mittels Methanpyrolyse anstelle von Kohlendioxid fester Kohlenstoff, ein in der chemischen Industrie begehrter Rohstoff (BMBF 2020a). Verschiedene Verfahren werden wissenschaftlich untersucht, eine industrielle Umsetzung ist erst nach 2030 zu erwarten (Berkel 2020). „Türkiser“ und „blauer“ Wasserstoff gelten als weitgehend klimaneutrale Verfahren.

Eine Studie des Hydrogen Council aus dem Jahr 2020 weist ausdrücklich darauf hin, dass Wasserstofftechnologien derzeit zwar technisch erprobt sind, aber einen Nischenstatus besitzen. Allein Skaleneffekte durch die die Verbreitung der Brennstoffzellentechnik könnten die

Investitionskosten für Brennstoffzellen als auch die Kostenreduktion in der Produktion und Verteilung von grünem Wasserstoff senken. Als Beispiel wird die heute etablierte Solar- und Windkraft genannt, bei der eine Verdopplung der erzeugten Strommenge zu Kostensenkungen von 19 bis 35 Prozent führte (Hydrogen Council 2020). Die als wettbewerbsfähig identifizierten Anwendungsfelder werden im Kapitel „Sozio-ökonomische Aspekte in Gegenwart und Zukunft“ behandelt.

Die öffentliche Wahrnehmung von Wasserstoff und der technisch sehr gut beherrschten Elektrolyse ist gelegentlich etwas verzerrt. Der sehr bekannte Absturz des Hindenburg-Zeppelins im Jahr 1937 resultierte nicht aus einer Explosion, sondern es war ein Wasserstoffbrand, der das Unglück verursachte. So können sich heute behördliche Genehmigungsprozesse in Verbindung mit Produktion oder der Anwendung von Wasserstoff verzögern, wenn die Mitarbeitenden in den Behörden noch keine Berührung zu Wasserstoff-Themen hatten und nur schwer die tatsächlichen Risiken bewerten können, zumal die Genehmigungsprozesse bisher nicht vereinheitlicht sind.

1.2 Straßenverkehr

Pkw mit Brennstoffzellen sind – nach Kleinserienfertigungen zu Erprobungszwecken – heute kommerziell erhältlich und können von privaten Endkunden regulär gekauft, geleast oder gemietet werden. Hyundai liefert den NEXO, der auch in Deutschland vertrieben wird. Toyota legte 2015 mit dem Modell „Mirai“ vor, ähnlich wie 2001 beim ersten serienmäßigen Vollhybrid-Pkw „Prius“. Mit der nächsten Modellgeneration Mirai 2 können ab 2020 jährlich max. 30.000 Stück in einer eigenen Fabrik nahe des Toyota-Stammwerks in Japan produziert werden (Fritz 2019).

In Deutschland ist im Koalitionsvertrag 2018 zwischen CDU, CSU und SPD festgehalten worden, dass in eine flächendeckende Tankinfrastruktur für Elektrofahrzeuge mit Wasserstoff und Brennstoffzelle investiert werden soll. Auch wurde das seit 2007 bestehende Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) bis 2026 verlängert. Unterdessen Förderung haben sechs Unternehmen (Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell, Total) das Joint Venture H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG gegründet, mit den assoziierten Partnern BMW, Honda, Hyundai, Toyota und Volkswagen. Bis Ende 2019 ist die Zahl der öffentlichen Tankstellen, von 50 auf 100 gestiegen. Abhängig von den Zulassungszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen soll ein flächendeckender Ausbau mit bis zu 400 Wasserstofftankstellen erfolgen (NOW o. D.).

Im Jahr 2019 waren in Deutschland ca. 550 Straßenfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb zugelassen (Doll 2019; Hübner 2020) vom Toyota Mirai wurden bis Ende 2019 weltweit 10.000 Stück verkauft (Toyota 2019). Nicht nur bei Privatbesitzern, auch bei Fahrdiensten wie der DB-Tochter „Clever Shuttle“ sind ca. fünfundvierzig Toyota Mirai im Einsatz, in Hamburg, Stuttgart und München. Von deutschen Herstellern war bis Sommer 2020 der Mercedes GLC F-Cell verfügbar, der allerdings lediglich vermietet wurde, so dass das Modell nicht in das Eigentum des Besitzers gelangen kann. Wie jeder Brennstoffzellen-Pkw enthält das Mercedes-Modell eine Batterie, die die Leistungsspitzen abfängt, während die Brennstoffzelle selbst kontinuierlich Leistung bereitstellt. Mercedes hat die Kapazität der Batterie so weit erhöht, dass sie allein etwa 50 km zur Reichweite beiträgt und aus einer Steckdose geladen werden kann; der GLC F-Cell ist somit ein Plug-in-Hybridfahrzeug.

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, dass bisher wenige Pkw in Deutschland unterwegs sind, die mit Wasserstoff und Brennstoffzelle betrieben werden. Deutlich wird auch, dass vielfach sogenannte Global Innovation Networks (GINs) eine relevante Rolle einnehmen. Bei den GINs handelt es sich um globale Netzwerke von Unternehmenspartnern, Forschungseinrichtungen, öffentlichen Institutionen und weiteren Stakeholdern, die Innovationen im Bereich Wasserstoff ermöglichen und/oder fördern. In der Regel werden GINs beschrieben als „global organisiertes Geflecht komplexer Interaktionen zwischen Unternehmen und anderen Organisationen, die in der Wissensproduktion mit Bezug auf und resultierend in Innovation tätig sind“ (Barnard & Chaminade 2011, S. 2–3, eigene Übersetzung).

Omnibusse

Bei Nutzfahrzeugen waren von 2012 bis 2018 z. B. bei der Hamburger Hochbahn vier Brennstoffzellen-Omnibusse in Betrieb. Das Vorhaben wurde beendet, da zum einen Mercedes keine neuen Brennstoffzellen-Busse zum Ausbau der Flotte liefern kann (Spiegel Mobilität 2019a) und zum anderen für die Lagerung bzw. Produktion einer großen Menge Wasserstoff auf den Betriebsgeländen, die für eine vergrößerte Flotte dieser Busse benötigt würde, die gesetzlichen Auflagen als zu hoch empfunden werden (Seidel 2019). Als Option wird bei den Omnibussen der Einsatz von Batteriebussen mit Brennstoffzelle als Range-Extender erhalten bleiben, mit der 4,5fachen Batteriekapazität bei geringerer Brennstoffzellenleistung und kleinerer Kapazität des Wasserstofftanks. Ein ähnliches Konzept wurde bereits mit dem o. g. Pkw Mercedes GLC F-Cell in Plug-in-Hybridtechnik vorgestellt.

Insgesamt soll in den nächsten Jahren die Zahl der Brennstoffzellenbusse in Deutschland stark steigen. Die meisten Neubeschaffungen sind

in Hamburg und in der Region Köln/Wuppertal geplant. Hamburg wird zu den verbliebenen zwei Bussen, bei denen Brennstoffzellen als Range Extender dienen, bis zu 50 neue Brennstoffzellenbusse bestellen (Pillau 2020). Wuppertaler Stadtwerke und Regionalverkehr Köln bestellten 2019 bereits 40 Brennstoffzellenbusse und schrieben 2020 36 weitere aus. Anbieter sind der belgische Hersteller Van Hool und Solaris aus Polen (Marquardt 2020a). Im Rahmen einer gemeinsamen Beschaffungsinitiative planen mehrere deutsche Verkehrsunternehmen, ab etwa 2022 nur noch lokal emissionsfreie Elektrobusse anzuschaffen (Seidel 2017). Anhand dieser wenigen Beispiele wird deutlich, dass bisher in Deutschland auch recht wenige Linienbusse unterwegs sind, die mit Wasserstoff und Brennstoffzelle betrieben werden.

1.3 Schienenverkehr

Im Schienenverkehr war im April 2018 ein wichtiger Meilenstein erreicht, als mit einer Sonderfahrt zwischen Wiesbaden und Frankfurt-Höchst der Wasserstoffbetriebene Nahverkehrstriebzug Coradia iLint des Herstellers Alstom eine medial begleitete Fahrt mit 150 geladenen Gästen unternahm. Dessen Entwicklung wurde 2013 bis 2016 mit Bundesmitteln unterstützt, im Alstom-Werk Salzgitter fand 2017 die erste Testfahrt des „weltweit einzigen brennstoffzellenbetriebenen Personenzugs“ statt (Alstom 2017). Nach Zulassung durch das Eisenbahn-Bundesamt für den Fahrgastbetrieb sind die zwei Brennstoffzellen-Züge im nicht elektrifizierten, niedersächsischen Elbe-Weser-Streckennetz zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde und Buxtehude im öffentlichen Linienbetrieb unterwegs. Hier sollen ab 2021 insgesamt 14 in Salzgitter gefertigte Züge den Regelbetrieb aufnehmen und die Dieseltriebwagen der Elbe-Weser-Verkehrsbetriebe ersetzen.

Siemens plant mittelfristig, die neue Regionalzug-Plattform Mireo mit Brennstoffzellen auszurüsten. Dazu läuft ein Förderprojekt des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP 2) mit 12 Millionen Euro Volumen, um zusammen mit dem kanadischen Zulieferer Ballard Power Systems Inc. Brennstoffzellen mit besonders langer Lebensdauer zu entwickeln. Die Einsatzreife wird für 2021 erwartet.

In Hessen hat sich der Rhein-Main-Verkehrsverbund bereits auf die Anschaffung von 27 Brennstoffzellenzügen festgelegt, die ebenfalls ab Dezember 2022 vier Strecken im Taunus bedienen sollen, die nicht elektrifiziert sind und bisher mit Dieseltriebwagen befahren werden. Die Fahrzeuge sollen mit Wasserstoff aus dem Industriepark Frankfurt-

Höchst betankt werden, wo bei der Herstellung von Chlor und Natronlauge Wasserstoff als Restprodukt anfällt (Winter 2019). Der Coradia iLint des Herstellers Alstom soll auch für die Schwarzatalbahn in Ostthüringen und die Heidekrautbahn in Brandenburg beschafft werden, wobei die Wasserstoffproduktion am Ort durch Windenergie erfolgen soll. Bei der Heidekrautbahn soll im Reallabor „H2Rail.Prignitz“ der wasserstoffbasierte Schienenverkehr technologisch weiterentwickelt und auf seine Praxistauglichkeit getestet werden. Es sind Einsätze auch in anderen Regionen wie in der Ortenau oder im nördlichen Ruhrgebiet möglich, wobei hier wegen technologieoffener Ausschreibungen auch batterieelektrische Züge angeschafft werden könnten.

Ablösung des Dieselantriebs

Unter dem Eindruck des Koalitionsvertrages 2018 zwischen CDU, CSU und SPD hat die Eisenbahnbranche im April 2018 einen radikalen Wandel weg vom Dieselantrieb, hin zu alternativen elektrischen Antrieben verkündet. Der Koalitionsvertrag sieht eine Elektrifizierung von Eisenbahnstrecken vor sowie „Investitionszuschüsse für Brennstoffzellen-Hybrid-Triebwagen“ und Wasserstofftankstellen. In einer gemeinsamen „Branchenvision“ der Verbände Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Allianz pro Schiene und Herstellern wie Siemens, Bombardier und Alstom und der Deutschen Bahn AG sowie der Gewerkschaft Deutscher Lokomotivführer (GDL) und der Eisenbahn- und Verkehrsgewerkschaft (EVG) wird die CO₂-freie Mobilität mit der nächsten Fahrzeuggeneration angestrebt, um im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) hundertprozentige Elektromobilität bei Neubeschaffungen zu erreichen.

Dabei wird konkret von zwei Alternativmöglichkeiten ausgegangen: entweder Brennstoffzellenfahrzeuge mit hoher Reichweite, aber eigener Tankinfrastruktur, oder Batteriegespeiste Fahrzeuge mit geringer Reichweite, die womöglich die vorhandenen Streckenoberleitungen zum Nachladen nutzen könnten, verbunden mit entsprechenden Stillstandszeiten. Ab Ende 2024 sollen Neufahrzeuge generell vollständig ohne Dieselantrieb auskommen (Allianz pro Schiene 2018a). Dazu gehören neben Brennstoffzellen-Zügen auch Akku-Triebzüge, die seit 50 Jahren nicht mehr in Deutschland gefertigt wurden, Hybrid-Lokomotiven vor allem für Rangierverkehre sowie Last-Mile- und Dual-Mode-Lokomotiven. Mit dieser Selbstverpflichtung zur Systemumstellung auf alternative Antriebe folgt die Eisenbahn-Branche den umweltpolitischen Plänen der Bundesregierung und geht mit der Elektrifizierung der Fahrzeuge über die vorgesehene Streckenelektrifizierung hinaus. Obwohl der ab 2021 für neue Diesel-Eisenbahnfahrzeuge gültige Emissionsstandard *Stage V*

durchaus erfüllbar ist, scheint die Branche im Schienenverkehr ein „Dieselproblem“ in der öffentlichen Wahrnehmung vorauszuahnen.

Eine Anfang 2020 erschienene Marktanalyse im Auftrag der NOW GmbH unterstreicht, dass die Ablösung von Dieseltriebfahrzeugen durch Hybridfahrzeuge bei der Eisenbahn stattfinden kann. Für die über 130 untersuchten Linien auf nicht elektrifizierten Nebenstrecken wird bis zum Jahr 2038 ein Marktpotenzial von bis zu 2.500 Hybridfahrzeugen – Wasserstoff- oder batteriebetrieben – prognostiziert (Pagenkopf et al. 2020).

1.4 Chemie

Wasserstoff wird bisher in der chemischen Industrie vorrangig als Grundstoff verwendet. Er wird Kohlendioxid-intensiv mittels Erdgas-Dampfreformierung gewonnen. Ziel ist eine Umstellung auf „grünen Wasserstoff“, der aus erneuerbaren Stromquellen durch Elektrolyse von Wasser erzeugt wird. Mit der elektrischen Leistung („Power“) können flüssige („Power-to-Liquid“) oder gasförmige („Power-to-Gas“) Energieträger gewonnen werden, die als „E-Fuels“ oder synthetische Kraftstoffe bezeichnet werden. Werden aus Wasserstoff und elektrischem Strom Ausgangsstoffe für die chemische Industrie gewonnen, handelt es sich um „Power to Chemicals“. Alle Umwandlungsverfahren werden als „Power-to-X-Technologien“ zusammengefasst.

Bei Power-to-Chemicals geht es vorrangig um die Grundchemikalien Methanol, Propylen, Ethylen und Ammoniak, die bisher aus fossilen Rohstoffen gewonnen werden. Sie werden u. a. zu Düngemitteln weiterverarbeitet. Zusammen mit Kohlendioxid werden aus Wasserstoff Grundstoffe wie Monomere und Polymere für die Kunststoffproduktion erzeugt.

Energiespeicherung

Wie bereits erwähnt, muss elektrischer Strom in dem Moment verbraucht werden, in dem er erzeugt wird. Angesichts der dezentralen Einspeisung der wetterabhängigen, erneuerbaren Energien ist das Management der Energieflüsse gegenwärtig noch schwierig. Elektrische Energie wird derzeit nur im kleinen Rahmen in Pumpspeicherwerken oder Batterien gespeichert. E-Fuels sind dagegen nicht nur lagerfähig, sondern haben – wie Mineralölprodukte – eine hohe Energiedichte und können als Ersatzstoffe in die bestehende Infrastruktur wie Gasnetze und Tankstellen integriert werden.

Unterschieden wird wie folgt:

- Power-to-Gas, hier ist entweder der durch Elektrolyse hergestellte Wasserstoff selbst gemeint, oder synthetisches Methan, das durch anschließende Methanisierung des Wasserstoffes entsteht. Die Speicherung ist im bestehenden Erdgasnetz möglich, entweder als Methan oder von Wasserstoff bis zu einem definierten Anteil.
- Power-to-Liquid, der Wasserstoff wird zu flüssigen Kraft- und Brennstoffen weiterverarbeitet und ersetzt als synthetischer Stoff Benzin, Diesel und Kerosin aus fossilem Erdöl (Deutsche Energie-Agentur o. D.).

2. Technische Perspektiven

Wasserstofftechnologien sind lange bekannt, bedürfen aber in vielen Feldern noch der technischen Weiterentwicklung, um sie verstärkt anwenden zu können. Dazu gehört auch das Hochskalieren vom Labormaßstab in einen industriellen Maßstab. Dies ist sicherlich eine wissenschaftliche Aufgabe, aber ebenso eine der konsequenten und breiten Anwendung der Technik.

2.1 Straßenverkehr

Omnibusse

Brennstoffzellen-Busse werden derzeit in Serie von van Hool in Belgien und Solaris in Polen gebaut. Der belgische Nutzfahrzeughersteller van Hool liefert seit 2019 40 Serienexemplare nach Nordrhein-Westfalen, nachdem dort bereits 2014 zwei erste Prototypen in Betrieb gingen (Marquardt 2020b). Solaris hat bereits Erfahrung mit Brennstoffzellen als Range Extender, 2019 erschien ein Modell, bei dem die Brennstoffzellen die primäre Energiequelle darstellen. Mercedes hat derzeit die nächste Generation der batterie-elektrischen eCitaro-Plattform in der Erprobung und plant deren Serienfertigung mit Brennstoffzelle als Range-Extender für eine Reichweite von 400 km ab 2022 (Werwitzke 2020). Als neuer Player entwickelt die Berliner ELO Mobility GmbH einen Brennstoffzellenbus, der frühestens 2021 vom finnischen Elektrobust-Hersteller Linker Oy produziert werden soll. Partner sind das niederländische Unternehmen HyMove, WS Consulting aus Augsburg und Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI in Dresden (Werwitzke 2020). Auch hier wird deutlich, dass es sich um ein Globales Innovationsnetzwerk (GIN) handelt.

Lastkraftwagen

In den USA entwickelt der Lkw-Hersteller Paccar Inc. zusammen mit Toyota einen Brennstoffzellen-Lkw mit 480 km Reichweite. Die Robert Bosch GmbH und das Start-up Nikola Motors Company aus den USA entwickeln zwei elektrisch angetriebene Lkw-Modelle mit Wasserstoffantrieb und einer Reichweite von bis zu 1.900 km. Die Markteinführung ist in Nordamerika für das Jahr 2021 vorgesehen. Noch 2017 wollte Bosch seine für Nutzfahrzeuge weiterentwickelte E-Achse mit Motor, Leis-

tungselektronik und integriertem Getriebe beisteuern (Schmale 2017). Im Jahr 2019 kündigte Bosch an, die Brennstoffzellenstacks für Automotive-Anwendungen in Bamberg zu fertigen, in Lizenz der schwedischen Powercell Sweden AB. Der Markteintritt ist nach der gemeinsamen Weiterentwicklung für 2022 vorgesehen. Damit findet sich hier ebenfalls ein Globales Innovationsnetzwerk (GIN).

Daimler gibt nach Jahrzehnten die Entwicklung von Pkw mit Brennstoffzellen auf und konzentriert die Aktivitäten auf schwere Nutzfahrzeuge. Dazu gründen Daimler und Volvo ein Gemeinschaftsunternehmen und streben nach eigenen Angaben eine erste Kleinserienfertigung ab 2025 an. Die Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH bringt in das gemeinsame Entwicklungsunternehmen über 200 Mitarbeiter, Patente und Werke in Deutschland und Kanada ein. Die Serienfertigung geschieht später in Modellen der jeweiligen Konzernmarken (Kuhn 2020b).

In Deutschland fehlen bisher allerdings geeignete Wasserstoff-Tankstellen für Nutzfahrzeuge (BDI 2019, S. 11). Würden in der Logistik Hub-to-Hub-Verbindungen etabliert, könnte dafür eine überschaubare Tankstellen-Infrastruktur ausreichen. Für diese Hub-to-Hub-Verbindungen scheinen aber eher Hybrid-Lkw in Frage zu kommen, die über eine Oberleitung, ähnlich wie bei der Eisenbahn, temporär mit Fahrstrom versorgt werden.

Pkw

Die Kosten für Brennstoffzellenstacks sinken deutlich. Toyota hat seit dem Mirai-Prototypen aus dem Jahr 2008 inzwischen die „Kosten für bedeutende Teile“ um ein Fünftel reduzieren können (Burkert 2018). Die nächste Modellgeneration des Mirai ab 2020 soll 40 Prozent weniger kosten (Fritz 2019). Bei Audi soll bis 2025 ein Brennstoffzellen-Pkw in Kleinserie auf den Markt gebracht werden. Für eine Produktion von jährlich ungefähr 100.000 Einheiten nach 2025 geht man davon aus, dass sich der Preis für eine Brennstoffzelle ungefähr auf ein knappes Drittel bis ein Viertel der heutigen Kosten reduzieren lässt (Heintzel et al. 2018). Bei der Entwicklung von Brennstoffzellen wird Audi mit Hyundai im Rahmen eines Globalen Innovationsnetzwerkes (GIN) zusammenarbeiten und dazu Patente und Zugang zu nicht wettbewerbsrelevanten Bauteilen wechselseitig teilen (Stüber 2018). Japan, Südkorea und China haben sich für Wasserstoffmobilität entschieden.

2.2 Flugverkehr

Bei Mobilitätsanwendungen ist der Luftverkehr von großem Interesse, da die gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff größer ist als die von Kerosin, allerdings bei vielfachem Volumenbedarf. So hat das US-Startup Alaka'i Technologies mit Designworks, einer selbständigen Tochter der BMW Group, ein Flugtaxi mit Wasserstoffantrieb entwickelt. Die Reichweite des Prototyps soll bei einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 137 km/h über 600 Kilometer betragen, die Nutzlast 450 kg. Die Höchstgeschwindigkeit liegt bei 190 km/h, das Befüllen des Wasserstofftanks dauert 10 Minuten. Ein für 2019 angekündigter Testflug ist bis Juni 2020 noch nicht erfolgt (Spiegel Mobilität 2019b). Als weltweit erstes pilotengesteuertes Flugzeug mit Brennstoffzellenantrieb gilt seit 2009 das Forschungsflugzeug Antares DLR-H2, dessen Brennstoffzellensysteme zuletzt 2012 auf den neuesten technischen Stand gebracht wurden (DLR o. D.). Das viersitzige Nachfolgemodell HY4 machte 2016 seinen Erstflug (Deutschlandfunk 2016). Geforscht wird allerdings weniger an einem elektrischen Antrieb durch Brennstoffzellen, als an wasserstoffbasierter Strom- und Druckluftherzeugung an Bord, die die übliche Hilfsgasturbine (APU) ersetzen soll (Thomalla 2018).

Eine naheliegende Methode ist die Gewinnung von Kerosin aus regenerativ erzeugtem Strom und abgetrenntem Kohlendioxid aus industriellen Abgasströmen. In einem chemischen Syntheseverfahren werden langkettige Kohlenwasserstoffe erzeugt, das Endprodukt ist synthetisches, strombasiertes Kerosin. Der konzeptionelle Aufbau und Probebetrieb einer solchen Power-to-Liquid-Anlage wird im vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt KEROSyN100 angegangen. Nach 2021 kann dann in einer Raffinerie in der norddeutschen Stadt Heide (Holstein) eine Demonstrationsanlage entstehen. Mit den für 2024 geplanten 20.000 Tonnen PtL-Kerosin könnte sie 5 Prozent des Kerosinbedarfs am Hamburger Flughafen decken. Perspektivisch könnte ein Raffinerie-eigener Windpark bei Sylt Energie für die Kerosinproduktion liefern, die dann etwa ein Drittel des Hamburger Flughafenbedarfs deckt. Das nötige Kohlendioxid könnte auch aus einem Zementwerk stammen (airliners.de 2019).

Für eine Mondmission mit großem Nutzvolumen plant Toyota für die japanische Raumfahrtagentur Japan Aerospace (JAXA) ein mit Wasserstoff angetriebenes Fahrzeug. Der erste Prototyp soll 2022 gezeigt werden, ab 2029 könnte – so der Plan – eine Fahrt auf der Mondoberfläche stattfinden (Wissenschaft.de 2019).

2.3 Energietechnik

Bei der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen steht neben der Reduzierung der Herstellungskosten die Erhöhung der Effizienz und Lebensdauer und damit der generellen Wettbewerbsfähigkeit im Vordergrund. Neben der Umwandlungseffizienz spielt bei Power-to-Gas auch eine geeignete Betriebsführung eine Rolle. Die erprobt beispielsweise das japanische Unternehmen Asahi Kasei in einem Demonstrationsprojekt in Herten, um bei schwankendem Energiezufluss aus erneuerbaren Energiequellen in einem Elektrolyseur mit bis zu 10 MW Wasserstoff zu generieren.

Vorrangig für stationäre Anwendung hat das Forschungszentrum Jülich eine „reversible Solid Oxide Cell“, kurz rSOC, entwickelt, die aus elektrischer Energie Wasserstoff und wieder umgekehrt erzeugen kann und damit besonders geeignet für eine Anlage ist, die Elektrizität in Form von Wasserstoff zwischenspeichert und zu einem späteren Zeitpunkt rückverstromt. Das verbesserte Stackdesign in Verbindung mit einer optimierten und hochintegrierten Anlagentechnik setzt mehr als 97 Prozent des zugeführten Wasserstoffs elektrochemisch um. Dadurch wird bei der Verstromung bei einer Stack-Leistung von 5 kW ein Systemwirkungsgrad von 62 Prozent erzielt. Bisher galten 45 Prozent als guter Wert (Physik-Journal 2019). Im reversiblen Fall, der Erzeugung von Wasserstoff, beträgt der Wirkungsgrad bei einer Leistung von 15 kW 70 Prozent (Blum 2018). Ebenfalls am FZJ werden erstmals die Eigenschaften einer Solid Fuel Oxide Cell nach 100.000 Betriebsstunden untersucht, was wichtige Erkenntnisse zur Lebensdauerverbesserung liefern wird (Physik-Journal 2019).

Auch Nebenaggregate spielen eine Rolle. Um aus dem mitgeführten Wasserstoff in der Brennstoffzelle Strom zu erzeugen, ist Sauerstoff nötig. Im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – Phase II wird daher im Verbundprojekt ARIEL (kurz für: Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte Elektrische Luftverdichter) an der Optimierung des elektrischen Aufladesystems zur Versorgung der Brennstoffzelle mit Sauerstoff geforscht, um Wirkungsgrad und Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Im Oktober 2021 soll ein vollständig erprobtes Aufladesystem präsentiert werden, das als Basis für eine Serienfertigung genutzt werden kann (Leibniz Universität Hannover 2019).

Für die Wasserstoff-Elektrolyse mit Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Brennstoffzellen ist oxidiertes Iridium (IrO_2) als Katalysator nötig, das sehr teuer ist. In einem vom BMBF geförderten Power-2-X-Verbundprojekt wurde 2019 eine hochporöse Katalysator-Trägerstruktur

entwickelt, mit der bei gleicher Leistung von Iridiumoxid nur noch ein Achtel der Menge eingesetzt werden muss. An einer praxisreifen Langzeitstabilität wird noch geforscht (Analytik News 2019).

2.4 Wasserstoffspeicherung

Für mobile Anwendungen wird Wasserstoff mit 350 bis 900 bar in Drucktanks gespeichert, was ein enormer Druck ist. Eine bessere Variante könnte die Bindung des Wasserstoffs an nanostrukturierte Leichtmetallhydride sein, deren Metall-Kristalle Wasserstoff besonders effizient speichern. Es sind ein wesentlich geringerer Druck und weniger Volumen nötig. Sie lassen sich trotzdem schnell beladen und geben den Wasserstoff bei technisch akzeptablen Temperaturen wieder frei. Forschungsgegenstand im Projekt „H2HybridTank“ ist unter anderem, den Wärmebedarf der Hydride für die Wasserstoff-Freisetzung und ihren Kühlbedarf während der Betankung in ein kompaktes, leichtes und kostengünstiges Konzept umzusetzen. Durch den geringeren Druck würden recyclingfähige Tankhüllen möglich sowie eine freiere Gestaltung der Tankgeometrie, um Tanks besser in die Fahrzeugform zu integrieren (Helmholtz-Zentrum Geesthacht 2019).

Flüssige Speichermedien

Marktnah ist die Technik des Erlanger Unternehmens Hydrogenious Technologies GmbH, das den Wasserstoff an einen flüssigen organischen Träger (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) bindet und damit auf Drucktanks verzichten kann. Genutzt wird das nicht explosive Dibenzyltoluol, das im industriellen Umfeld als Wärmeträgeröl dient und aus Toluol gewonnen wird. Es wird in großen Mengen als Benzinbestandteil verbrannt. Der auf diese Weise gebundene flüssige Wasserstoff kann gefahrlos wie herkömmlicher Kraftstoff in Kanistern, Tanks, Pipelines, Tankwagen und Tankschiffen transportiert werden. Die erste kommerzielle Anlage wurde Anfang 2019 in die USA geliefert (Höpner 2019). Die Hydrierung beim Einspeichern erfolgt in einer exothermen Reaktion mit Wärmeerzeugung von etwa 200°C, bei der Dehydrierung wird über einen kontinuierlichen Prozess Energie bei etwa 300°C zugeführt. Ein Liter des LOHC kann 600 l gasförmiges H₂ speichern. Durch die Speicherung von Wasserstoff im LOHC können Transportkapazitäten um den Faktor fünf erhöht werden, womit sich die Transportkosten um bis zu 80 Prozent reduzieren können. Allerdings muss das Träger-

material wieder zur Wasserstoffquelle zurücktransportiert werden, und der Wasserstoff ist nicht vollständig rein.

In die Hydrogenious Technologies GmbH investieren auch asiatische Unternehmen wie die *Mitsubishi Corporation* und die *Hyundai Motor Company (Hydrogenious 2020)*. Das Unternehmen ist mit dem Projekt SmartQuart Teil des Reallabors der Energiewende und wirkt in verschiedenen Konsortien mit, u. a. in der Initiative GET H2, in der sich RWE Generation SE, Siemens, ENERTRAG, die Stadtwerke Lingen, das Forschungszentrum Jülich und das IKEM (Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität) zusammengeschlossen haben. Durch den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Emsland sollen die Sektoren Energie, Industrie, Verkehr und Wärme verbunden werden. Neben dem bestehenden Gaspipelinennetz als Speicher- und Transportinfrastruktur wird die LOHC-Technologie zur Wasserstoffhandhabung erprobt werden. Am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (HI ERN) wird die Adaption an die mobile Anwendung bei der Eisenbahn entwickelt, neben Größe und Gewicht der Anlagen spezielle Freisetzungsapparate, die gut auf dynamische Lastwechsel reagieren, etwa beim Anfahren des Zuges mit hohem Leistungsbedarf. Speziell für mobile Anwendung ist eine Direkt-LOHC-Brennstoffzelle in der Entwicklung, bei der das Wasserstoffgas nicht aus dem Trägermaterial dehydriert werden muss, bevor daraus Energie gewonnen wird. Die Laborergebnisse sollen von 2020 an innerhalb von fünf Jahren als Demonstrator für den Triebwagen Coradia iLint von Alstom weiterentwickelt werden.

Beimischung im Erdgasnetz

Generell soll die Beimischung von Wasserstoff in einzelnen Gasnetzabschnitten von einem geringen einstelligen Prozentbereich auf bis zu 20 Volumen-Prozent ansteigen, etwa in einem Pilotprojekt in Sachsen-Anhalt (engergie.de 2019). Nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur IEA reduziert eine Beimischung von 20 Prozent Wasserstoff im europäischen Gasnetz die CO₂-Emissionen um jährlich 60 Millionen Tonnen – die Menge, die ein Land wie Dänemark in einem Jahr ausstößt.

Auch aus Russland über die Pipeline Nord Stream 2 importiertes Erdgas soll durch Dampfreformierung in Deutschland zur Wasserstoffversorgung beitragen (Vetter 2020). Prinzipiell ist Nord Stream 2 auch darauf vorbereitet, mit 80 Prozent Anteil bereits in Russland hergestellten Wasserstoff zu transportieren (Schlandt et al. 2020).

Neben der Elektrolyse könnte auch mittels Methanpyrolyse Wasserstoff aus Methan – also Erdgas oder „Biogas“ – und regenerativem Strom gewonnen werden. Wasserstoff aus diesem Prozess wird auch als „türkiser Wasserstoff“ bezeichnet. Das Karlsruher Institut für Technologie KIT, das Institute for Advanced Sustainability Studies in Potsdam und der Industriepartner Wintershall Dea haben ein Verfahren entwickelt, bei dem Methan in einem mit Flüssigmetall befüllten Blasensäulenreaktor kontinuierlich in seine Bestandteile zerlegt wird: zum einen in Wasserstoff und zum anderen in festen Kohlenstoff, der als Reinstoff gelagert und in vielen industriellen Bereichen genutzt werden kann. Der industrielle Einsatz der Methanpyrolyse wird in den nächsten Jahren erprobt werden (Pro-physik.de 2019).

Schwankungen in der Gasbeschaffenheit könnten negative Folgen für die der Glas- und die Keramikindustrie haben. Eine Wasserstoffbeimischung in Erdgas beeinflusst die stoffliche Nutzung von Erdgas in der chemischen Industrie, hier liegt die Grenze bei 1,5 Prozent. Ein sicherer Betrieb von Gasturbinen ist mit den bestehenden Maschinen nur bis zu einer Konzentration von 1 Prozent Wasserstoff im Brenngas möglich, bis zu 5 Prozent wären nachträglich technisch implementierbar (BDI 2019, S. 19).

Perspektivisch soll in Deutschland eine überregionale Gasnetz-Infrastruktur ausschließlich für Wasserstoff entstehen. Dieses Fernleitungsnetz verbindet dann Verbrauchs- mit Aufkommensschwerpunkten und integriert Kavernenspeicher und industrielle Standorte. Diese „Netzvision“ der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas (FNB Gas) sieht vor, dass auf der Fernleitungsebene nur Wasserstoff transportiert wird, der auf der Verteilnetzebene dem Erdgas beigemischt wird. Das 5.900 Kilometer lange Netz soll mehrheitlich aus umgewidmeten, bestehenden Erdgasfernleitungen bestehen (Lohmann 2020).

2.5 Wasserstoffherzeugung offshore

Bei der Offshore-Windenergie diskutieren diverse Akteure gegenwärtig die Frage, ob es notwendig ist, die elektrische Energie an Land zu übertragen. Stattdessen wird in Konzeptstudien geplant, die Energie gleich auf hoher See mittels Elektrolyse auf einer „Wasserstoff-Plattform“ in Wasserstoff umzuwandeln. E.ON Climate & Renewables geht von Elektrolyseuren mit einer elektrischen Eingangsleistung von insgesamt 280 MW aus, die von einem Windpark mit 400 MW versorgt würden, um im Jahr 25.000 Tonnen Wasserstoff zu erzeugen, der für Power-to-X per Pipeline an Land gebracht würde (Hanke 2019a). Eine große technische

Herausforderung wäre die Elektrolyse von Salzwasser, sofern keine voluminösen Entsalzungsanlagen installiert werden. Einen Offshore-Windpark ohne Stromnetzanschluss zu planen, ist seit Anfang 2019 durch das Energiesammelgesetz möglich geworden, das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) wurde bereits beauftragt, in einem Flächenentwicklungsplan für Nord- und Ostsee Gebiete ohne Netzanschluss für die Wasserstoff-Elektrolyse auszuweisen (Hanke 2019b).

2.6 Direkte Konversion ohne elektrische Energie

Um bei erneuerbaren Energien die Elektrolyse von Wasser perspektivisch als Zwischenschritt einzusparen, kann Sonnenlicht auch direkt in Wasserstoff umgesetzt werden. Im Labormaßstab gelang das einem internationalen Forscherverbund aus Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, des California Institute of Technology und der University of Cambridge mit einer Solarzelle, die 19 Prozent der zugeführten Sonnenlichtenergie direkt in die Gewinnung von molekularem Wasserstoff umsetzte. Mit diesem Wirkungsgrad wurde ein Weltrekord aufgestellt. Selbst mit diffuser Bestrahlung wurden 18,5 Prozent Wirkungsgrad realisiert. Für den realisierten Schichtaufbau der Tandemzelle wurde ein theoretischer Wirkungsgrad von 23 Prozent berechnet. Wesentlicher Nachteil ist allerdings die geringe Standzeit von nur 100 Stunden, bedingt durch Korrosionseffekte. Im Vergleich zur Vorgängerversion mit 40 Stunden Standzeit gab es aber schon einen deutlichen Fortschritt (Grävemeyer 2018).

Ein weiterer wissenschaftlicher Ansatz zur „stromlosen“ Erzeugung von Wasserstoff ist die aus biogenen Reststoffen. An der FH Münster entstehen die Wasserstoffmoleküle in einem Bioreaktor aus Abwässern. Das Forschungsprojekt „BioTech2 – Biowasserstoffproduktion als zukunftsweisende Technologie zur Energie- und Kraftstofferzeugung“ wird vom deutsch-niederländischen Forschungsprogramm Interreg V A mit 700.000 Euro gefördert, so dass eine Versuchsanlage für größere Reststoffmassen gebaut werden kann (Schäfer 2018).

2.7 Stahlproduktion

Im industriellen Umfeld entstehen bei der Herstellung von Roheisen aus Eisenerz und Koks-kohle große Mengen Kohlendioxid. Um dies zu unterbinden, werden von Unternehmen wie Thyssenkrupp, Salzgitter und Vo-

estalpine Verfahren ohne Kokskohle erprobt, bei denen Wasserstoff mit dem Sauerstoff im Eisenerz reagiert und dabei anstelle von Kohlendioxid Wasser bildet. Wird der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gewonnen, könnte mit diesem Direktreduktionsverfahren eine „grüne Stahlproduktion“ möglich werden, die noch zur industriellen Marktreife gebracht werden muss. Denn neben der Energiebereitstellung müssen die üblichen Hochofenanlagen durch Reduktionsanlagen ersetzt werden, in denen das Eisenerz zunächst mithilfe von Wasserstoff in Eisenschwamm umgewandelt und dann in einem Elektroofen unter Beigabe von Schrott zu Stahl geschmolzen wird. Herstellungsverfahren müssen daher an vielen Stellen verändert werden. Die Stahlindustrie produziert mit jährlich 55 Millionen Tonnen CO₂ lt. Umweltbundesamt über 5 Prozent des gesamten CO₂-Ausstoßes, der jährlich in Deutschland entsteht. In einem anderen Ansatz werden bei Thyssenkrupp die Hüttengase und damit auch Kohlendioxid in chemische Rohstoffe wie Methanol umgewandelt, was in Duisburg seit 2018 in der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten „Carbon2Chem“-Initiative erprobt wird. Kohlenstoff lässt sich unter anderem in der Gummiindustrie und bei der Herstellung von Batteriezellen einsetzen.

In einem anderen Verfahren löst die Salzgitter AG den Sauerstoff nicht mit Kohlenstoff aus den Eisenerzen, sondern mit Erdgas. Dieses könnte perspektivisch durch immer höhere Anteile an Wasserstoff ersetzt werden (Höfer 2019). Im Hüttenwerk der Salzgitter Flachstahl GmbH startete Anfang 2019 das Projekt GrInHy2.0. Wie im Vorgängerprojekt wird 150°C heißer Dampf aus Abwärmequellen der Stahlerzeugung mit regenerativem Strom elektrochemisch Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Die elektrische Leistung der Elektrolysezellen wurde allerdings auf 720 kW mehr als vervierfacht. Der Wasserstoff dient als reduzierende Schutzgasatmosphäre beim Glühen von kaltgewalztem Stahl (Salzgitter AG 2019). Der österreichische Stahlkonzern Voestalpine hat in Linz einen Elektrolyseur zur Produktion von grünem Wasserstoff in Betrieb genommen. Mit einer Anschlussleistung von 6 MW sollen im Pilotprojekt „H2Future“ rund 110 Kilogramm Wasserstoff in der Stunde gewonnen werden, um die Nutzung von grünem Wasserstoff im großindustriellen Maßstab zu testen (energate-messenger 2019).

3. Stellung des Standorts Deutschland im internationalen Wettbewerb

3.1 Japan und Australien

Die internationale Wasserstoffwirtschaft hat mit Japan, USA und Europa im Wesentlichen drei große Zielmärkte. Die japanische Regierung hat öffentlichkeitswirksam die „Hydrogen Society“ ausgerufen, die sie bis zu den auf 2021 verschobenen Olympischen Spielen realisieren will. Wasserstoff dient in Japan weniger dem Klimaschutz, da der Wasserstoff nur z. T. aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, sondern wird als klassische Innovations-, Technologie- und Wachstumspolitik positioniert (Kölling 2019).

In über 300.000 japanischen Haushalten sind bereits Brennstoffzellen-Heizgeräte anstelle von Brennwertgeräten in Betrieb, die Strom und Wärme erzeugen; im Jahr 2013 waren es lediglich 40.000 Haushalte (Ingenieur.de 2013). Um die stationären und mobilen Anwendungen auszustatten, wird die Produktion von Brennstoffzellenstacks stark hochgefahren. Dabei folgt Japans Regierung seit 2017 ihrer nationalen Wasserstoffstrategie mit dem Ziel, ab 2030 einen großen Heimatmarkt mit einer globalen Lieferkette aufgebaut zu haben. Vorgesehen sind 800.000 Brennstoffzellenautos und 5,3 Millionen Brennstoffzellen für Eigenheime, wobei die Bemühungen im Mobilitätsbereich erst einmal auf Tokyo konzentriert sind. Der steigende Wasserstoffbedarf kann jedoch nicht vollständig in Japan selbst gedeckt werden, daher wird Wasserstoff aus dem australischen Bundesstaat Victoria importiert, wo er aus Braunkohle hergestellt wird (Aqua & Gas 2019). Bei der Zahl der Patentanmeldungen zu Brennstoffzellentechnologien ist Japan weltweit führend, Deutschland folgt auf dem zweiten Platz (Kuhn 2020a).

Die Klimabilanz ist daher für Australien negativ, doch binnen fünf Jahren wird in Australien von einer wettbewerbsfähigen Wasserstoffproduktion aus Solar- und Windparks ausgegangen (Eckardt 2019). Der australische Bundesstaat Südaustralien will Nettoexporteur für erneuerbare Energien zu werden, dazu soll die 2017 zur Beschleunigung der Wasserstoffwirtschaft entwickelte Wasserstoff-Roadmap in einen Aktionsplan überführt werden (SSES 2019). Die australische Regierung hat für das ganze Land Ende 2019 eine Nationale Wasserstoffstrategie verabschiedet (Australian Government 2019). Basis war die Arbeit der „Hydrogen Working Group“, angeführt von Prof. Alan Simon Finkel als australischer „Chief Scientist“, einem promovierten Elektrotechniker. Die Strategie be-

nennt 57 gemeinsame Maßnahmen bis 2030. Dabei erkennen die Autoren durchaus die Unsicherheiten bei der Durchführung einzelner Maßnahmen an, räumen aber ein, dass ein zu spätes Handeln insgesamt risikoreicher wäre als einzelne Rückschläge. Um Kosteneffizienz bei der Infrastruktur und Skalierungseffekte zu forcieren, wird auf „hydrogen hubs“ gesetzt, Cluster mit großem Wasserstoffverbrauch, bei denen Synergien durch Sektorkopplung erzielt werden können (COAG Energy Council 2019).

3.2 Südkorea, China und USA

Auch in Südkorea wird mit einem Markthochlauf gerechnet: im Rahmen der „FCEV Vision 2030“ will Hyundai für die eigene Pkw-Herstellung und externe Kunden 700.000 Brennstoffzellen pro Jahr bauen, davon 500.000 für den Automobilsektor. Die Hyundai-Tochter Mobis baut derzeit jährlich 3.000 Brennstoffzellen, durch die Produktion in einer zweiten Fabrik sollen es bis 2022 40.000 Einheiten sein (Conrad 2018).

China hat bereits mit dem Bau und Betrieb von Brennstoffzellen-Omnibussen begonnen. Brennstoffzellen-Pkw und -Lkw müssen noch entwickelt werden, das Tankstellennetz soll ausgebaut werden. Auch am Stack selbst wird entwickelt, teils in Kooperation mit dem kanadischen Unternehmen Ballard Power (Hydrogeit 2018). Seit April 2019 gibt es im „Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) Phase II“ eine auf zwei Jahre angelegte „Chinese German Fuel Cell Collaboration“ durch das Freiburger Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Enargus o. D.). Ende 2019 haben der Gasehersteller Linde und eine neue Tochtergesellschaft der Baowu Steel Group bekanntgegeben, bei der Weiterentwicklung des chinesischen Wasserstoffmarktes für Industrie- und Mobilitätsanwendungen zusammenarbeiten (Chemie Technik 2019).

In den USA setzt der impulsgebende Bundesstaat Kalifornien auf emissionsfreie Fahrzeuge, bis 2030 soll deren Zahl von derzeit 350.000 auf fünf Millionen steigen. Die Zahl der Wasserstofftankstellen soll dort von 32 auf 200 wachsen (Heuer 2018).

3.3 Frankreich, Schweiz und Niederlande

Im Rahmen eines Maßnahmenplans für Industrie, Energiespeicherung und Transport plant die französische Regierung, die Wasserstoffwirtschaft mit staatlichen Krediten in Höhe von 100 Millionen Euro zu unter-

stützen. Bis 2023 könnten etwa 250 Megawatt Elektrolysekapazitäten gefördert werden, die Hälfte der Kreditmittel ist für neue Elektrolyseanlagen vorgesehen. Bis 2023 sollen 10 Prozent des in der Industrie produzierten Wasserstoffs aus erneuerbaren Quellen stammen, bis 2028 könnten es zwischen 20 und 40 Prozent sein (Buerstedde 2018).

In der Schweiz arbeitet der „Förderverein H2 Mobilität Schweiz“ seit 2018 an einem Wasserstofftankstellen-Netz sowie an einem Lkw-Ankaufsprogramm, das vor allem den Mitgliedern aus dem Einzelhandel wie der Coop Genossenschaft und des Migros-Genossenschaftsbunds dienen wird. Die ersten Lkw des südkoreanischen Unternehmens Hyundai sind bereits im Einsatz, bis 2023 sollen es eintausend sein. Die Entscheidung für den außereuropäischen Hersteller fiel, weil die deutsche Lkw-Industrie bei dieser Antriebsart noch nicht lieferfähig sei (Rathmann 2020). Daimler hat im April 2020 bekanntgegeben, Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellen in einem Joint Venture zusammen mit Volvo fertigen zu wollen, beginnend mit Kleinserien im Jahr 2025. Die Pkw-Sparte von Daimler gibt dafür die Entwicklung von Wasserstoff-Pkw vollständig auf und fertigt 2020 die letzten Exemplare des Mercedes GLC F-Cell (Kuhn 2020b). In Deutschland sollen am Iveco-Standort in Ulm frühestens 2023 Brennstoffzellen-Lkw gefertigt werden, in einem Joint Venture der US-amerikanischen Nikola Motor Company und der niederländischen CNH Industrial N.V., Eigentümerin der Marke Iveco (IVECO Presseinformationen 2020).

Auch in den Niederlanden stehen Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb noch am Anfang. Der heimische Hersteller VDL hat den Prototypen eines Schwerlast-Lkw auf der Straße, der immerhin von einer deutschen mobilen Wasserstofftankstelle gespeist wird (EnergieAgentur.NRW 2020). Dafür konzipieren die Niederlande in der Region Groningen, im Nordosten des Landes, eine umfassende Wasserstoffwirtschaft über mehrere Sektoren. Initialzündung war das Gasfeld Slochteren, aus dem die Erdgasförderung bis 2030 enden wird, um Erdbebenschäden zu vermeiden. Mit der vorhandenen Leitungsinfrastruktur, der Chemieindustrie in Delfzijl und dem Hafen von Eemshaven, bei dem drei in ein Fernleitungsstromnetz eingebundene Großkraftwerke betrieben werden, ist bereits ein „Ökosystem“ vorhanden. Dieses soll für Wasserstoff konkret genutzt werden: der Wasserstoffspeicher HyStock, 20 Brennstoffzellenbusse des belgischen Herstellers van Hool für den Groninger Stadtverkehr, die mit 20 MW größte Elektrolyse-Anlage Europas, die auch an einen benachbarten Methanolhersteller liefern wird. „Grüner Strom“ kommt in Eemshaven von den Offshore-Windparks in der niederländischen Nordsee an (Fischer 2020). Die Region erklärt sich mit diesen Vorhaben zum „Hydrogen Valley“ und wird seit Anfang 2020

von der EU mit 20 Millionen Euro über 6 Jahre lang gefördert (New Energy Coalition o. D.).

3.4 Deutschland

Für den Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb gilt gegenwärtig, dass die Hersteller von Brennstoffzellen – ähnlich wie die Hersteller der Batteriezellen als kleinste Einheit eines Batteriemoduls – häufig nicht in Deutschland, sondern im Ausland angesiedelt sind. Die Brennstoffzellen-Branche machte in Deutschland im Jahr 2018 einen Umsatz von nur 60 Millionen Euro (Wenzel 2019).

In der „Wasserstoff-Roadmap für Deutschland“ der Fraunhofer-Gesellschaft sehen die Autoren dennoch ein deutliches Exportpotenzial für die deutsche Industrie, maßgeblich durch die Generierung von Vorreitermärkten. Angesichts einer prognostizierten, global installierten Kapazität von Elektrolyseuren von 3.000 GW bis 2050 wird die mögliche Wertschöpfung für die deutsche Industrie auf etwa 5,5 Milliarden Euro pro Jahr geschätzt. Bei den Brennstoffzellen für den Verkehrssektor werden jährlich etwa 2,4 Milliarden Euro bis 2030 prognostiziert. Die Ende 2019 erschienene Studie sieht neben der direkten Wertschöpfung bei Wasserstoff und Brennstoffzellen auch wachsende Potenziale bei der Energieerzeugung mittels Windenergie und Photovoltaik und bei den Power-to-Liquid-Technologien. Hinzu kommen die Gasturbinen und neuer Gasinfrastrukturen für Wasserstoff sowie die industrielle Nutzung des Wasserstoffs einschließlich Methanisierung (Hebling et al. 2019).

4. Fördernde und hemmende Einflussfaktoren

4.1 Fördernde Faktoren

Gesamteuropäisches Thema

Das Thema Wasserstoff ist auf EU-Ebene angekommen und Bestandteil des „European Green Deal“. Dieses im Dezember 2019 von der Europäischen Kommission vorgestellte Konzept hat das Ziel, die Netto-Emissionen von Treibhausgasen in der Europäischen Union bis zum Jahr 2050 auf null zu reduzieren. Die Bundesregierung hat im Zuge ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie erklärt, dass Wasserstoff das Mittel der Wahl zur Dekarbonisierung ist (BMWi 2019). In beiden Fällen sollen Globale Innovationsnetzwerk (GIN) eine wichtige Rolle spielen.

Gesicherte Industriearbeitsplätze

Die technologische Kompetenz in Forschung und Entwicklung zum Thema Wasserstoff sind in Deutschland vorhanden, ebenso Industriezweige für die Umsetzung und Anwendung der Erkenntnisse. So kann die Stahlindustrie, deren Kohlendioxidausstoß in der Regel als klimaschädlich eingeordnet wird, durch das Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff annähernd klimaneutral werden. Voraussetzung ist dabei jedoch die Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Strom zur Wasserstoffherzeugung in Deutschland, da ansonsten eine Abwanderung in Regionen mit „grüner Stromerzeugung“ möglich werden kann.

Innovations-Aufgeschlossenheit

Die Eisenbahn-Branche hat in den letzten Jahren demonstriert, dass sie im Personenverkehr eine etablierte Techniklinie wie den Dieselantrieb im Sinne des Klimaschutzes ablösen wird. Elektrische Akku-Triebwagen wurden in Deutschland nur bis 1965 gebaut und bis 1995 gefahren – sie erfahren gegenwärtig eine Renaissance, als elektrische Akku- oder Brennstoffzellenfahrzeuge. Entscheidend dafür waren die politischen Vorgaben zur Erreichung der Klimaziele durch die Elektrifizierung des Schienenverkehrs im Koalitionsvertrag von 2018 und die daraus abgeleitete Branchenvision zur gemeinschaftlichen Umsetzung von zahlreichen

Verbänden, den drei führenden Fahrzeugherstellern, der Deutschen Bahn AG und der Gewerkschaften EVG und GDL. Damit ist die vollständige Elektromobilität auf der Schiene einstimmig avisiert worden.

Mittel zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes

Wasserstoff ist eine Möglichkeit, die gesetzlichen Vorgaben zur CO₂-Minderung im Straßen- und vor allem im Schwerlastverkehr umsetzen zu können.

Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung im Verkehrssektor zu erreichen, ist dort bis zum Jahr 2030 eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 42 bis 40 Prozent gegenüber 1990 notwendig. Nutzfahrzeuge auf der Straße, Lkw und Busse, verursachen 35,6 Prozent aller Emissionen im Verkehrssektor (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2019). Die ersten europäischen CO₂-Emissionsnormen für Lkw und andere schwere Nutzfahrzeuge wurden vom Rat der EU im Jahr 2019 angenommen. Nach diesen neuen Vorschriften müssen die Hersteller die CO₂-Emissionen von neuen Lkw bis 2025 im Durchschnitt um 15 Prozent und bis 2030 um 30 Prozent im Vergleich zu 2019 senken (Rat der EU 2019). Die Arbeitsgruppe „Klimaschutz und Mobilität“ der „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität“ nennt zur Erreichung der Klimaziele in Deutschland eine Anzahl von 20 bis 130 Tausend Lkw über 20 Tonnen bis 2030 – mit den Optionen Batterie-Lkw, Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw und Oberleitungs-Lkw. Gerade bei schweren Lkw über 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht wird die Elektrifizierung mit Brennstoffzellenantrieb für aussichtsreich gehalten (Bundesministerium Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2019).

4.2 Hemmende Faktoren

Wettbewerb mit Batterien und Flüssigkraftstoffen

Jedes rein elektrisch angetriebene Fahrzeug ist vom Prinzip her ein Elektrofahrzeug, ob mit Batterien oder einer Wasserstoff-gepeisten Brennstoffzelle an Bord. In der öffentlichen und auch politischen Wahrnehmung gilt die Batterie dabei häufig als gesetzte Universallösung für die Elektromobilität – gegen diese Annahme muss die Diskussion über Wasserstoff entsprechend ankämpfen. Auch scheint damit in der Elektromobilität ein Innovationspfad festgelegt, der Infrastruktur-Investitionen

und Betrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen parallel zu Batterie-Fahrzeugen unattraktiv erscheinen lässt.

Weiterhin gibt es den Pfad der synthetischen Flüssigkraftstoffe, die mit regenerativem Strom hergestellt werden können – E-Fuels aus einem „Power-to-Liquid“-Prozess. Gerade bei Pkw fördern die E-Fuels den Verbleib im bestehenden System mit den bekannten Verbrennungsmotoren, ein Systemwandel würde dadurch langfristig herausgezögert (Klima Allianz 2020). In der gewerbsmäßigen Luftfahrt könnte synthetisches Kerosin hingegen eine wichtige Rolle spielen, da hier elektrische Brennstoffzellenantriebe auf lange Sicht technisch eher unrealisierbar erscheinen. Nachteilig sind allerdings die Gestehungskosten von synthetischen Kraftstoffen – mit Hilfe preiswerten norwegischen Ökostroms könnte ein Literpreis um 1,50 Euro realisiert werden, was etwa dem heutigen Pkw-Benzinpreis (Stand: Juni 2020) einschließlich aller Steuern und Abgaben entspricht. Da Kerosin jedoch steuerbefreit ist, fällt der Preisunterschied umso deutlicher ins Gewicht (Hans-Böckler-Stiftung 2020).

Energetische Effizienzverluste

Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist immer mit Umwandlungsverlusten verknüpft. Diese Verluste werden akzeptiert, wenn etwa überschüssiger Windstrom für die Wasserstofferzeugung genutzt und anschließend in Brennstoffzellen wieder rückverstromt wird. Die klaren Vorteile sind hier die Transport- und Speicherfähigkeit des Wasserstoffs. Elektrolyse, Brennstoffzellen und Kavernen als Speicher sind vor allem in stationären Anwendungen preiswerter als Batteriespeicher.

Die Bundesregierung hat im Mai 2020 einen Roadmap-Prozess zur Energieeffizienzstrategie 2050 gestartet. Hierin werden bis 2022 die Energieeffizienzziele für 2030 und 2050 in verschiedenen Branchen und Sektoren festgelegt (BMW 2020a). Dabei wird – gerade auch in Verbindung mit der Nationalen Wasserstoffstrategie – zu beachten sein, dass bei Wasserstoff-Anwendungen gerade die physikalisch bedingten und damit unvermeidbaren Wirkungsgrade ausreichend beachtet werden, um hier eine unnötige Benachteiligung des Wasserstoff-Gesamtsystems zu vermeiden.

Wasserstoff als Lösung für „überschüssigen Strom“

Den zahlreichen Windenergieanlagen an Land und auf See in Norddeutschland stehen die industriellen Abnehmer des Stroms in West- und Süddeutschland entgegen. Das verbindende Übertragungsnetz muss entsprechend ausgebaut werden, was aus verschiedenen Gründen nur sehr schleppend geschieht. In der Diskussion wird daher Wasserstoff als Energiespeicher angeführt: wenn die Leitungskapazitäten überschritten sind, sollen die Windenergieanlagen nicht abgeregelt werden, sondern diesen „überschüssigen Strom“ über Elektrolyseure in der Nähe in Wasserstoff umgesetzt werden, der dann als Energieträger oder Rohstoff genutzt wird.

Dieses Vorgehen ist naheliegend und wird daher oft diskutiert, ist jedoch äußerst unwirtschaftlich. Industrielle Anlagen sollten möglichst ganzjährig, also über 8.760 Stunden, unter Vollast betrieben werden. Für Elektrolyseure werden Laufzeiten von mindestens 1.500 Jahresstunden, idealerweise 3.000 Jahresstunden für einen wirtschaftlichen Betrieb genannt. In der gegenwärtigen Lage würden sie den ansonsten abgeregelten Strom aber nur einige hundert Stunden im Jahr aufnehmen (Urbansky 2020). Für einen Elektrolyseur mit 1 MW Leistung und Strombezugskosten von 4 ct/kWh unterscheiden sich die Gestehungskosten des Wasserstoffs bei nur 500 Stunden gegen 8.000 Stunden Betrieb um den Faktor 4 (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität o. D.). Daher ist der Leitungsausbau der Stromnetze vorzuziehen, während grüner Wasserstoff über ständig betriebene Elektrolyseure erzeugt wird.

Der Mangel an „grünem“ Wasserstoff

Der aus erneuerbarem Strom, also Photovoltaik, Windenergie, Biomasse oder Wasserkraft, klimaneutral hergestellte „grüne“ Wasserstoff wird als anzustrebendes Ziel einer Wasserstoffwirtschaft angenommen. Allerdings reicht in Deutschland die Menge des hier erzeugten Ökostroms nicht aus, um die geplanten Wasserstoff-Anwendungen, z. B. im Zuge der Nationalen Wasserstoffstrategie, nur ansatzweise damit umzusetzen, der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland bräuchte erhebliche Ressourcen. Allein die Stahlindustrie in Deutschland würde bei einer vollständigen Umstellung auf Wasserstoff als Reduktionsmittel 75 TWh Strom benötigen, beinahe 15 Prozent des gesamten deutschen Stromverbrauchs (Berkel 2020). Ein gegenwärtiger Ausweg scheint daher in Afrika produzierter Ökostrom. Der dort in Elektrolyseuren erzeugte Wasserstoff wird dann nach Deutschland transportiert. Dazu plant die

Bundesregierung Wasserstoff-Partnerschaften mit West- und Nordafrika, etwa dem Niger (BMBF 2020b). In Marokko soll aus Sicht der Bundesregierung bis 2025 eine Referenzanlage für Wasserstoff und synthetische Flüssigkraftstoffe entstehen (Becker et al. 2020a). Kritiker verweisen auf neue Abhängigkeiten, vergleichbar mit den fossilen Brennstoffen, da mit politisch mitunter instabilen Ländern zu kooperieren wäre (Becker et al. 2020b).

5. Sozio-ökonomische Aspekte in Gegenwart und Zukunft

Die zukünftige Wasserstoffwirtschaft im Ganzen wird auf Dauer abhängig sein von „grünem“ Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen. Die Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Quellen ist gängig, aber nicht nachhaltig. Die Agora Energiewende gGmbH, die sich in der Eigendarstellung als Denkfabrik bezeichnet, fordert in einem Eckpunktepapier, in Deutschland bis 2030 als Basisinfrastruktur Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von zehn Gigawatt zu installieren. Die Nachfrage nach „grünem“ Wasserstoff soll durch dessen gesetzlich vorgegebenen Anteil von mindestens 0,5 Prozent im Erdgasnetz geschaffen werden. Bis zum Jahr 2030 soll der maximal einspeisbare Anteil von 5 Prozent erreicht werden (Wenzel 2019).

Die Einspeisung von Strom aus Power-to-Gas-Anlagen betrifft die „ganzheitliche Behandlung“ des gesamten Energiesystems in Deutschland, die sogenannte Sektorkopplung der Energiesektoren Stromerzeugung, Wärme-/Kälteerzeugung und Verkehr. Gerade die Langzeitspeicherung von ursprünglich elektrischer Energie ist vor allem durch die Erzeugung von Wasserstoff, synthetischen Gasen wie Methan und Power-to-Liquids ein zentraler Punkt. Bei der Rückverstromung oder der anderweitigen Verwendung im Energiesystem oder in der Industrie sind physikalische Wandlungsverluste unvermeidbar, die die Energieeffizienz senken und damit die Kosten in gewissen Grenzen erhöhen. Dies wäre tolerierbar, sofern nicht wie im aktuellen Zustand durch Regularien zusätzliche Kosten entstehen. Die Strombezugskosten sind durch Abgaben und Umlagen hoch, die bilanzielle Weitergabe der „grünen“ Eigenschaft des erneuerbaren Stroms an die E-Fuels-Produkte ist beschränkt (dena o. D.). Strom für Elektrolysezwecke müsste von der EEG-Umlage befreit werden, die mit über 6 ct/kWh größer ist als der Stromgroßhandelspreis. All diese sektorspezifischen Gesetze und Regelungen aus der Vergangenheit behindern oder konterkarieren sich mitunter gegenseitig und verhindern eine zügige Zielerreichung bei der Kohlendioxidreduktion.

In der wissenschaftlichen Diskussion wird unter anderem ein einheitlicher Preis auf Kohlendioxid-Emissionen vorgeschlagen, für den das vorhandene ETS-System (Emissions Trading System) zum Handel von CO₂-Zertifikaten reformiert werden müsste. Schweden und Großbritannien haben CO₂-Mindestpreise eingeführt, in Großbritannien etwa sank die Stromerzeugung aus Kohle binnen 5 Jahren von etwa 150 TWh auf unter 30 TWh (Umbach et al. 2019). Diese eher pauschalen Betrachtungen sollten aber mit einer genauen Betrachtung der Energieflüsse und Speicherszenarien in Einklang gebracht werden (Neldner Consult 2018).

Nationale Wasserstoffstrategie in Deutschland

Im Rahmen einer Stakeholder-Konferenz hatte die Bundesregierung bereits im November 2019 eine „Nationale Strategie Wasserstoff“ mit einem Aktionsplan für das Jahr 2020 angekündigt (BMW i 2019), die jüngst (Juni 2020) verabschiedet worden ist. Die Bundesregierung will nach eigenen Angaben mit der Nationalen Strategie Wasserstoff einen Rahmen schaffen, „der die industrie-, energie-, klima-, innovations- und entwicklungspolitischen Chancen von Wasserstoff vereint. Ziel ist es, Innovationen und Investitionen in die vielfältigen Technologien zur Erzeugung und Weiterverarbeitung, Transport und Speicherung sowie Verwendung von CO₂-freiem Wasserstoff zu fördern und die gute Ausgangsposition der deutschen Industrie zu unterstützen“ (BMW i 2019). Dazu sind insgesamt 38 sogenannte Maßnahmen (in den Handlungsfeldern: Erzeugung von Wasserstoff, Anwendungsbereiche (Verkehr, Industrie, Wärme, Infrastruktur/Versorgung), Forschung, Bildung und Innovation, Europäischer Handlungsbedarf sowie Internationaler Wasserstoffmarkt und außenwirtschaftliche Partnerschaften) im Rahmen eines Aktionsplans festgehalten worden. „Die im Aktionsplan beschriebenen Maßnahmen bilden die erste Phase der NWS ab, in der bis 2023 der Markthochlauf und die Grundlagen für einen funktionierenden Heimatmarkt angestoßen werden. Parallel hierzu werden wegbereitende Themen wie Forschung und Entwicklung sowie internationale Fragestellungen vorangetrieben. In der nächsten Phase, ab 2024, wird der entstehende Heimatmarkt gefestigt und die europäische sowie internationale Dimension von Wasserstoff gestaltet und für die deutsche Wirtschaft genutzt“ (BMW i 2020b, S. 33).

Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie soll auch geklärt werden, wie mit den Strombezugskosten für Elektrolyseure und elektrischen Energiespeichern umgegangen werden soll. Diese gelten derzeit als Endverbraucher mit entsprechenden Steuern und Abgaben, obwohl sie tatsächlich „systemdienlich“ für die verschiedenen Energiesektoren sind, also der Sektorkopplung dienen. Es ist damit zu rechnen, dass die Bundesregierung der im Klimapaket beschlossenen Kohlendioxid-Bepreisung eine zentrale Rolle als industriepolitisches Instrument zuweist und die hohe Komplexität der bisherigen Rahmenbedingungen bei Steuern und Abgaben reduziert.

Die geplanten Investitionen in eine klimaneutrale Stahlproduktion müssen womöglich in einen Kontext mit dem Emissionsrechtehandel gesetzt werden. Dass Produkte mit einem gewissen CO₂-Fußabdruck in die EU importiert werden, könnte mit einer Carbon-Border-Tax verknüpft werden, mit der klimaneutrale Produkte „Made in Germany“ unter den Einflüssen der Weltmärkte eine Chance haben. Dem entgegen steht die

Komplexität einer Carbon-Border-Tax für eine exportorientierte Wirtschaft wie Deutschland. Der Wandel von einem Hochofen zum Wasserstoff-Reduktionsverfahren bedeutet eine Investitionsentscheidung über dreistellige Millionenbeträge und eine Pfadabhängigkeit über 20 Jahre, so dass sichere Rahmenbedingungen und auch Wirtschaftlichkeit unerlässlich sind. Andererseits ist es denkbar, dass die neuen Direktreduktionsanlagen an der Quelle für preiswerte und grüne Energie und dem dort erzeugten Wasserstoff angesiedelt sein werden. Hier kann die Versorgungssicherheit für grünen Strom gewährleistet werden – Eisenschwamm kann in Palletform statt flüssigem Roheisen verarbeitet werden, der Transport des Endprodukts Stahl von einem neuen Standort aus stellt nur einen kleinen Kostenfaktor dar.

Mobilitätssektor

Bei den Personenkraftwagen bleibt die Brennstoffzellentechnologie trotz aller Fortschritte und Vorhaben mittelfristig eine Nischenanwendung und der Verbrennungsmotor scheint in den nächsten Jahren nur marginal betroffen zu sein. Die intensiven Kooperationen deutscher Hersteller mit asiatischen Zulieferern von Brennstoffzellentechnik könnte dazu führen, dass in Zukunft bei einem steigenden Anteil von Brennstoffzellen-Pkw eher Arbeitsplätze in Fernost aufgebaut werden und die Wertschöpfung in Deutschland verlorengelht, wie das bereits mit Batteriezellen geschah. Dennoch gibt es Fertigungs-Knowhow in Deutschland, etwa in den Bosch-Werken Homburg (Mayer 2020) und Bamberg (BR²⁴ 2020), hier in Kooperation mit dem schwedischen Unternehmen PowerCell, mit dem eine Serienfertigung ab 2022 gestartet werden soll (Bosch o. D.).

Im Schwerlastfernverkehr könnten Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine wichtige Option sein, da hier eine Elektrifizierung mittels Batterien eine starke Verringerung der Zuladung bedeuten würde. Oberleitungs-Hybrid-Lkw werden in Pilotprojekten in Deutschland erprobt, sie benötigen eine der Eisenbahn vergleichbare Oberleitung, die an Teilstücken von Bundesautobahnen montiert werden müssen. Abseits der Oberleitung fahren die Hybrid-Lkw als bimodale Fahrzeuge weiterhin mit einem Verbrennungsmotor. Im Gegensatz dazu würden Brennstoffzellen-Lkw einen elektrischen Betrieb an jedem Ort ermöglichen, auch im Binnenverkehr (Rother 2020).

Im Schienenfahrzeugbau könnte innerhalb der nächsten zehn Jahre das Ende des Dieselmotors eingeläutet sein. Die Branchenvision des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), der Allianz pro Schiene und Herstellern wie Siemens, Bombardier und Alstom sowie der

DB und GDL strebt die CO₂-freie Mobilität mit der nächsten Fahrzeuggeneration nach 2024 an, um im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) vollständige Elektromobilität zu erreichen (Allianz pro Schiene 2018b). Das kann für den Schienenpersonennahverkehr einen starken Trend zu Brennstoffzellenfahrzeugen führen, auch wenn heutige Fahrzeugausreibungen meist noch technologie-neutral formuliert sind. Ähnliche Entwicklungen im Schienenverkehr sind in Großbritannien (Jendrischik 2018) und Frankreich (Buerstedde 2018) zu beobachten.

Während die Mehrzahl der Automobilhersteller auf Batterien anstelle von Brennstoffzellen setzen, könnte der Flugverkehr langfristig am meisten von einem Wasserstoffbasierten Antrieb profitieren, da hier die Batterietechnik aus physikalischen Gründen nur für Kleinflugzeuge in Frage kommt.

Zukünftige wasserstoffbasierte Industrie, Beschäftigungsentwicklung und Qualifizierung

In der langfristigen Branchenvision des Hydrogen Council aus dem Jahr 2017 könnten in einer Wasserstoffwirtschaft bis 2050 weltweit über 30 Millionen Arbeitsplätze mit einem Jahresumsatz von über 2.000 Milliarden Euro entstehen (Hydrogen Council 2017). Der im Auftrag der IG BCE erstellte Potentialatlas für Wasserstoff geht bei 100 GW Elektrolyseleistung im Jahr 2050 davon aus, dass in Deutschland ab 2030 jährlich Elektrolyseure mit einer Leistung von 7 GW und einem Umsatzvolumen von über fünf Milliarden Euro produziert werden müssen (IG BCE Innovationsforum Energiewende e. V. 2018). Der Verband Hydrogen Europe geht für die EU von einem möglichen Umsatzvolumen von 130 Milliarden Euro im Jahr 2030 und 820 Milliarden Euro bis 2050 aus, verbunden mit einer Million hochqualifizierter Arbeitsplätze im Jahr 2030 und 5,4 Millionen bis 2050 (Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking 2019). In Deutschland hält der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband bis 2030 mehr als 70.000 neugeschaffene Arbeitsplätze für möglich (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband e. V. 2018).

Strategische Vorhaben wie „HYPOS – Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany“ sowie die zwanzig „Reallabore der Energiewende“ sind in Deutschland bereits gestartet.

Eine weitere Studie des Hydrogen Council aus dem Jahr 2020 schätzt die möglichen Kostenreduzierungen bei einer verstärkten Wasserstoffwirtschaft für die nächsten zehn Jahre ab. Grundlage sind Industrie-Daten aus Europa, den USA, Japan und Süd-Korea sowie China. Für

22 der betrachteten 35 Anwendungsfelder könnten die Gesamtbetriebskosten (total cost of ownership, TCO) von Wasserstoffanwendungen mit denen anderer Low-Carbon-Lösungen gleichziehen. Da diese 22 Anwendungsfelder etwa 15 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs darstellen, kann Wasserstoff zwar keine allumfassende, aber eine bedeutende Rolle bekommen. Zu den wettbewerbsfähigen Anwendungsfeldern gehören Nutzfahrzeuge und Flurförderfahrzeuge, die Eisenbahn und Heizkessel für Gebäude- und Industriewärme (Hydrogen Council 2020).

Der Verband der Chemischen Industrie (VCI) hat in einem von drei möglichen Pfaden den einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie bis 2050 skizziert, bei dem neuartige, strom- und auch wasserstoffbasierte Verfahren den Strombedarf der deutschen Chemie auf über 600 TWh jährlich steigen ließen, was mehr ist als der gesamte deutsche Stromproduktion im Jahr 2018. Dabei würden alle konventionellen Verfahren der Basischemie vollständig durch alternative Verfahren ersetzt, ohne Betrachtung ihrer Wirtschaftlichkeit (FutureCamp Climate 2019).

Derzeit werden Fertigungsschritte in der Montage der Brennstoffzellenstacks häufig von hochqualifizierten Arbeitskräften durchgeführt. Eine Studie zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE skizziert, dass künftig weniger hochqualifizierte Arbeitskräfte in der Montage einzusetzen wären, um die Herstellkosten zu senken. Neben der Standardisierung von Komponenten und Montageschritten im Prozess sei auch die Investition in Automatisierung wirtschaftlich sinnvoll, was bislang wegen des geringen Produktionsvolumens nicht geschehen sei (BMVI 2018). Einen ersten Schritt zur Automatisierung machte Ende 2019 die Proton Motor Fuel Cell GmbH aus Puchheim bei München. Sie nahm eine automatisierte Fertigungsanlage mit einem Stackroboter in Betrieb, der im Rahmen des Projektes „Fit-4-AMandA“ (Fit for Automatic Manufacturing and Assembly) realisiert und von der europäischen Agentur „FCH-JU“ (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) finanziert wurde (Proton Motor 2019). Die Erhöhung der Fertigungskapazität führt auch zu Neueinstellungen von Mitarbeitern (Bünnagel 2020). Produktionsplanung, Qualitätssicherung und Entwicklung verbleiben bei hochqualifizierten Arbeitskräften.

In der Nationalen Wasserstoff werden im Handlungsfeld „Forschung, Bildung und Innovation“ insgesamt 7 Maßnahmen thematisiert, die sich z. T. explizit auf einige der oben genannten arbeitnehmer-relevante Aspekte beziehen. Mit diesen Maßnahmen sollen aus der Sicht der Bundesregierung „entlang der gesamten Wasserstoff- Wertschöpfungskette

die Basis für künftige Markterfolge gelegt werden“ (BMW 2020b, S. 24). Diese sind

- eine Roadmap für eine deutsche Wasserstoffwirtschaft mit internationaler Ausstrahlungswirkung, die gemeinsam mit Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft erreicht werden soll.
- Demonstrationsprojekte zu grünem Wasserstoff.
- eine ressortübergreifende Forschungsoffensive „Wasserstofftechnologien 2030“, in der die Forschungsmaßnahmen an Wasserstoff-Schlüsseltechnologien strategisch gebündelt werden (u. a. geht es um großangelegte Forschungsvorhaben zu Wasserstoff in der Stahl- und Chemieindustrie als zukunftsweisende Angebote, um Klimaneutralität und Vorhaben im Verkehrssektor).
- „innovationsfreundliche“ Rahmenbedingungen, die den Weg für den Praxiseinsatz von Wasserstofftechnologien ebnen sollen (u. a. Hindernisse im nationalen und europäischen Rechtsrahmen identifizieren und Vorschläge zu deren Überwindung und zur Weiterentwicklung des Rechtsrahmens formulieren).
- für den Bereich Wasserstofftechnologien von 2020 bis 2024 eingeplante 25 Millionen Euro im Luftfahrtforschungsprogramm.
- für das Maritime Forschungsprogramm von 2020 bis 2024 eingeplante ca. 25 Millionen Euro, wovon auch Teile im Kontext Wasserstoff genutzt werden können.
- die nationale und internationale Stärkung von Bildung und Ausbildung. Dies bezieht sich vor allem auf die Bereich Qualifizierung von Personal zur Produktion sowie Betrieb und Wartung in Bereichen, in denen Wasserstoff bisher nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat (z. B. Anlagenbau, Werkstattpersonal für Brennstoffzellenfahrzeuge). Neben qualifizierten Fachkräften sollen zudem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neue Wege der Zusammenarbeit suchen, um Bildung und Forschung stärker zu verbinden. Darüber hinaus sind mit Exportländern Berufsausbildungsk Kooperationen geplant.

Damit sind sicherlich mehrere Maßnahmen aufgespannt, die arbeitnehmer-relevante Aspekte im Zuge der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft berücksichtigen. Diese können passende Anknüpfungspunkte für Arbeitnehmerakteure wie Betriebsräte und Gewerkschaften bieten, bedürfen jedoch der weiteren Konkretisierung und dem partizipativen Gestalten der Umsetzung. Zudem scheint die Bedeutung der Ingenieur-Disziplinen (Maschinenbau, E-Technik, IT) für den Ausbau und die Industrialisierung der Wasserstofftechnologien groß zu sein, ohne dass sie in der NWS abgebildet wird (VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt o. D.).

6. Thesen für die weitere Diskussion

Das vorliegende Working Paper zielt zum einen darauf ab, das Thema „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Verkehr und Chemie“ im Kontext des derzeitigen techno-ökonomischen Standes und der Fortschritte in näherer Zukunft, fördernder und hemmender Faktoren beim Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft sowie der sozio-ökonomischen Bedeutung (u. a. Beschäftigungsentwicklung, Qualifizierung) und der Stellung des Standortes Deutschland zu strukturieren und zu diskutieren. Zum anderen will es Denkanstöße für eine breitere öffentliche Diskussion des Themas in einem innovations- und industriepolitischen Kontext liefern.

Die Impulse für eine weitere Diskussion werden hier im Rahmen von 12 Thesen eingebracht. Diese Thesen basieren zum einen auf einer Literaturanalyse (Stand Juni 2020) und zum anderen auf dem Input der Fachleute, die am Vertiefungsworkshop „Zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Verkehr und Chemie“ im Januar 2020 teilnahmen. Die Thesen dienen in ihrer zugespitzten Form vor allem dazu, den Gestaltungsdiskurs über die zukünftige Wasserstoffwirtschaft weiter voran zu treiben sowie relevante Trends immer auch frühzeitig zu erkennen und diese für eine prospektive Innovations- und Technikgestaltung im Dreiklang von Mensch, Organisation und Technik nutzbar zu machen.

1. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist der Einsatz von Wasserstoff aus heutiger Sicht unumgänglich. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber spielt Wasserstoff für die Direktnutzung sowie zur Weiterverarbeitung im Energiesystem kaum eine Rolle. CO₂-freier Wasserstoff, der auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wird („grüner“ Wasserstoff), ist auf Dauer nachhaltig. Für den zügigen Markthochlauf der Wasserstofftechnologien zur Dekarbonisierung in verschiedenen Anwendungsbereichen – auch bei der Herstellung von Grundchemikalien und dem Ersatz von Erdöl durch synthetische Kraftstoffe – wird zunächst aus ökonomischen Gründen auch CO₂-neutraler („blauer“) Wasserstoff eine Rolle spielen müssen.
2. In mobilen Anwendungsfällen stehen Brennstoffzellen in direktem Wettbewerb mit der Batterietechnik. Ein wichtiger Hebel für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist eine Reduktion des Preises von Wasserstoff, um Brennstoffzellen-Mobilität wirtschaftlich zu machen. Die Unterstützung eines Tankstellenaufbaus (inklusive praktischer Genehmigungsverfahren) sind mit öffentlicher Förderung fortzuführen – dies in einem europäischen Kontext. Dies gilt ebenso für die Infrastruktur für Lkw. Ein gangbarer Weg ist es, auf bestehende

- Infrastrukturen aufzusetzen und damit die Investitionskosten gering zu halten.
3. Die hohe Belastung von Strom mit Abgaben und Steuern begrenzt derzeit den verstärkten Einsatz von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien z. B. in den Bereichen Verkehr, Chemie und als Energiespeicher. Das Zielmodell für die regulatorischen Rahmenbedingungen sollte sowohl zu einem ökonomisch effizienten Gesamtsystem als auch zu einer weitgehenden Internalisierung von Umweltkosten (u. a. durch CO₂-Emissionen) führen. Es ist grundsätzlich technologieoffen zu gestalten.
 4. Investitionskosten in CO₂-freie Technologien für die Herstellung von Grundchemikalien und Stahl sowie den Ersatz von Erdöl durch synthetische Kraftstoffe etwa im Flugverkehr können aufgrund der internationalen Wettbewerbssituation nicht vollständig an den Kunden weitergegeben werden. Der Einsatz von Wasserstofftechnologien in der Industrieproduktion ist durch zusätzliche Fördermaßnahmen zu flankieren.
 5. Im Bereich Wasserstoff sind diverse Akteure unterwegs, dadurch geschieht die Umsetzung von Aktivitäten möglicherweise (zu) langsam. Eine konsequente Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie kann dem entgegenwirken.
 6. Ein erster gezielter Schritt in Richtung zukünftiger Wasserstoffwirtschaft bedeutet Technologieförderung, wie sie z. B. unter anderem in Reallaboren stattfindet. Im zweiten Schritt folgt die Frage der Regulierung, idealerweise eine Reform des Energieabgabensystems, das einen gezielten Anreiz zu Dekarbonisierungsstrategien in den Bereichen Verkehr und Chemie geben kann.
 7. Mehreinnahmen aus der Dekarbonisierungsstrategie können in den Markthochlauf neuer Technologien und den Schritt zum „regulatorischen Lernen“ investiert werden – ohne einen Umbau des Regulierungsrahmens müssten sich Regierungen auf technologische Unterstützung fokussieren. Ohne die Entwicklung eines EU-Binnenmarktes für CO₂-freien Wasserstoff wird der wettbewerbsfähige Einsatz von Wasserstoff in Deutschland und Europa suboptimal verlaufen. Als erster Schritt für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien ist jedoch eine starke inländische Wasserstoffproduktion und Wasserstoffverwendung – ein „Heimatmarkt“ – unverzichtbar.
 8. Es sind ergänzend zur Ausrichtung auf die EU bilaterale Energiepartnerschaften (z. B. verschiedene Regionen in Afrika und Australien) nutzen, um einen erweiterten Rahmen für Produktion, Einsatz und Export von CO₂-freiem Wasserstoff zu schaffen. Ein Herkunfts-

nachweis bietet die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit des CO₂-freien Wasserstoffs.

9. Bei einer Hochskalierung (in Deutschland) benötigt die zukünftige Wasserstoffwirtschaft zusätzliche gut ausgebildete Fachkräfte, die im Kontext guter Arbeit zur Weiterentwicklung und internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffwirtschaft maßgeblich beitragen. Damit ist Wasserstoff auch ein explizites Bildungsthema: Die zukünftige Wasserstoffwirtschaft braucht Fachkräfte – in Deutschland und in anderen Ländern. Die notwendigen Transformationsprozesse im Zuge der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft sind mit gezielten Dialog- und Gestaltungsprozessen unter Beteiligung der relevanten Stakeholder voranzutreiben.
10. Im einzurichtenden Nationalen Wasserstoffrat und auch in ähnlichen innovations- und industriepolitischen Foren auf europäischer bzw. internationaler Ebene sind Arbeitnehmerakteure hinreichend zu berücksichtigen, damit sie u. a. das Monitoring zu Wasserstoffstrategien und deren Weiterentwicklung im Zuge sogenannter Green Deals pro-aktiv mitgestalten können. Damit werden Arbeitnehmerakteure zunehmend Akteure auch in Globalen Innovationsnetzwerken (GINs).

Literatur

- Aero.de Luftfahrtnachrichten (Hrsg.) (2019): Der lange Weg zum klimaneutralen Kerosin. <https://www.aero.de/news-32316/Der-lange-Weg-zum-klimaneutralen-Kerosin.html> (Abruf am 2.9.2020).
- Airliners.de (Hrsg.) (2019): Pilotprojekt will Zementindustrie-CO2 zur Kerosinherstellung nutzen. <https://www.airliners.de/pilotprojekt-zementindustrie-co2-kerosinherstellung/51127> (Abruf am 2.9.2020).
- Allianz pro Schiene (2018a): Nahverkehrszug der nächsten Generation. Emissionsfrei, wirtschaftlich, kundenorientiert. <https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2018/04/NahverkehrszugDerN%C3%A4chstenGeneration-Positionspapier.pdf> (Abruf am 26.8.2020).
- Allianz pro Schiene (2018b): Schiene: Nahverkehr bereitet Abschied vom Diesel vor. Triebzüge der Zukunft: Branchenvision formuliert Leistungsmerkmale. <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/schiene-nahverkehr-bereitet-abschied-vom-diesel-vor/> (Abruf am 27.8.2020).
- Alstom (2017): Erfolgreiche erste Testfahrt von Alstoms Wasserstoffzug Coradia iLint bei 80 km/h. <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2017/3/erfolgreiche-erste-testfahrt-von-alstoms-wasserstoffzug-coradia-ilint-bei-80-kmh> (Abruf am 26.8.2020).
- Analytik News (2019): Kostengünstige Iridium-Elektrode durch hochporöse Mikropartikel. <https://analytik.news/presse/2019/683.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Aqua & Gas (2019): Wasserstoff aus Australien für Japan. <https://www.aquaetgas.ch/de/aktuell/branchen-news/20191230/wasserstoff-aus-australien-f%C3%BCr-japan/> (Abruf am 26.8.2020).
- Australian Government (2019): Australia's National Hydrogen Strategy. <https://www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy> (Abruf am 26.8.2020).
- Barnard, Helena, Chaminade, Christina (2011): Global Innovation Networks: towards a taxonomy. Centre for Innovation, Research and Competence in the Learning Economy (CIR-CLE), Lund University, Paper no. 2011/04. https://www.researchgate.net/publication/254420109_Global_Innovation_Networks_what_are_they_and_where_can_we_find_them_Conceptual_and_Empirical_issues (Abruf am 29.6.2020).
- Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (Hrsg.) (2019): Prioritäten der Industrie für die Nationale Wasserstoffstrategie. <https://bdi.eu/publikation/news/prioritaeten-der-industrie-fuer-die-nationale-wasserstoffstrategie/> (Abruf am 26.8.2020).

- Becker, Benedikt; Böll, Seven (2020a): Müller will Wasserstoff-Produktion mit Marokko aufbauen. <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/csue-entwicklungsminister-mueller-will-wasserstoff-produktion-mit-marokko-aufbauen/25544390.html> (Abruf am 27.8.2020).
- Becker, Benedikt; Crocoll, Sophie (2020b): Auf Sand gebaut. In: WirtschaftsWoche 8 vom 14.02.2020, S. 36–39.
- Berkel, Manuel (2020): Von Blasen und Perlen, in: Technology Review dt., Mai 2020, S. 28–33.
- Blum, Ludger (2018): Reversible Brennstoffzelle bricht Wirkungsgrad-Rekord. <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2018/2018-12-18-brennstoffzelle-wirkungsgrad-weltrekord.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2020a): Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre. <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> (Abruf am 25.8.2020).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2020b): Karliczek: Wasserstoff-Partnerschaft mit Afrika geplant, Pressemitteilung vom 11.02.2020. <https://www.bmbf.de/de/karliczek-wasserstoff-partnerschaft-mit-afrika-geplant-10882.html> (Abruf am 27.8.2020).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019): Klimaschutz in Zahlen: der Sektor Verkehr. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_zahlen_2019_fs_verkehr_de_bf.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2018): Studie IndWEde – Kurzfassung. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/181127_bro_a4_indwede-studie_kurzfassung_de_v03.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2019): Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Zwischenbericht 03/2019. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf> (Abruf am 27.8.2020).

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Globale Führungsrolle sichern: Vertreter aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft diskutieren Ideen für die Nationale Wasserstoffstrategie. Pressemitteilung vom 05.11.2019. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2019/20191105-globale-fuehrungsrolle-sichern.html> (Abruf am 27.8.2020).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020a): Dialogprozess der Bundesregierung „Roadmap Energieeffizienz 2050“ startet. Pressemitteilung vom 26.05.2020. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200526-dialogprozess-der-bundesregierung-roadmap-energieeffizienz-2050-startet.html> (Abruf am 27.8.2020).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2020b): Wasserstoff und Energiewende. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/kurzpapier-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Abruf am 27.8.2020).
- Bosch (o. D.): Warum die mobile Brennstoffzelle großes Potenzial hat. <https://www.bosch.com/de/stories/brennstoffzellen-stack/> (Abruf am 27.8.2020).
- Bayerischer Rundfunk (BR²⁴) (2020): Bosch setzt in Corona-Krise auf Innovationen. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/bosch-setzt-in-corona-krise-auf-innovationen,RxYHFzi> (Abruf am 27.8.2020).
- Buerstedde, Peter (2018): Frankreich fördert Wasserstoffwirtschaft mit 100 Millionen Euro. Maßnahmenplan für Industrie, Energiespeicherung und Transport. <https://www.gtai.de/gtai-de/trade/branchen/branchenbericht/frankreich/frankreich-foerdert-wasserstoffwirtschaft-mit-100-millionen-euro-12206> (Abruf am 26.8.2020).
- Bünnagel, Claus (2020): Proton Motor: Fertigung trotz Coronakrise termingerecht. Die Produktion sowie der Prüfstandbetrieb werden weiter aufrecht gehalten, so dass die aktuellen Aufträge realisiert werden können. <https://www.busplaner.de/de/news/brennstoffzellen-proton-motor-fertigung-trotz-coronakrise-termingerecht-24732.html> (Abruf am 27.8.2020).
- Burkert, Andreas (2018): Ein Antrieb ist nicht genug. <https://www.springerprofessional.de/motoren/brennstoffzelle/ein-antrieb-ist-nicht-genug/15427500> (Abruf 26.8.2020).
- Chemie Technik (2019): Linde will chinesischen Wasserstoffmarkt weiterentwickeln. <https://www.chemietechnik.de/linde-will-chinesischen-wasserstoffmarkt-weiterentwickeln/> (Abruf am 26.8.2020).

- Council of Australian Government (COAG) Energy Council (2019): Australia`s national Hydrogen Strategy. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf> (Abruf am 26.8.2020).
- Conrad, Bernd (2018): Hyundai plant 700.000 Einheiten pro Jahr. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/hyundai-wasserstoff-brennstoffzelle-plan-2030/> (Abruf am 26.8.2020).
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.) (o. D.): Heutige Einsatzgebiete für Power Fuels. Factsheets zur Anwendung von klimafreundlich erzeugten synthetischen Energieträgern. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/181123_dena_PtX-Factsheets.pdf (Abruf am 28.8.2020).
- Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. (DWV) (2018): Grüne Wasserstoff-Industrie – Lösung für den Strukturwandel? <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/20181128-Pos.-Papier-zu-Strukturwandel-final.pdf> (Abruf am 27.8.2020).
- Deutschlandfunk (2016): Brennstoffzellen-Flieger. HY4 überzeugt bei Testflug. https://www.deutschlandfunk.de/brennstoffzellen-flieger-hy4-ueberzeugt-bei-testflug.676.de.html?dram:article_id=367268 (Abruf 2.9.2020).
- Deutscher Industrie und Handelskammertag (DIHK) (2020): Wasserstoff, DIHK-Faktenpapier, <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf> (Abruf am 29.6.2020).
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (o. D.): Antares DLR-H2 – außer Betrieb. <https://www.dlr.de/content/de/artikel/luftfahrt/forschungsflotte-infrastruktur/dlr-flugzeugflotte/antares-dlr-h2-ausser-betrieb.html> (Abruf am 2.9.2020).
- Doll, Nikolaus (2019): Japaner und Koreaner hängen deutsche Autobauer beim Wasserstoff ab. In: WELT, 3.3.2019. <https://www.welt.de/wirtschaft/article189681713/Japaner-und-Koreaner-haengen-deutsche-Hersteller-bei-Wasserstoff-Autos-ab.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Eckardt, Nils (2019): Kein Wasserstoff aus Australien. <https://www.energate-messenger.de/news/195139/kein-wasserstoff-aus-australien> (Abruf am 26.8.2020).

- Enargus (o. D.): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) – Phase II: Chinese German Fuel Cell Collaboration. <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&v=10&q=EA2251&m=1&id=1197593> (Abruf am 20.8.2020).
- Energate-messenger (2019): Stahlkonzern Voestalpine startet Großelektrolyseur. <https://www.energate-messenger.de/news/196552/stahlkonzern-voestalpine-startet-grosselektrolyseur> (Abruf am 26.8.2020).
- Energie.de (2019): DVGW und Avacon testen Spitzenwert bei der Beimischung von Wasserstoff. <https://www.energie.de/ew/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/dvgw-und-avacon-testen-spitzenwert-bei-der-beimischung-von-wasserstoff-2019694/> (Abruf am 26.8.2020).
- EnergieAgentur.NRW (2020): Praxistest: Wasserstofftruck aus H2Share-Projekt auf niederländischen Straßen unterwegs. https://www.energieagentur.nrw/mobilitaet/praxitest_wasserstofftruck_aus_h2share-projekt (Abruf am 27.8.2020).
- Fischer, Konrad (2020): Die Zukunft von nebenan. In: WirtschaftsWoche 13 vom 20.03.2020, S. 66–69.
- Fritz, Martin (2019): Brennen für die Zukunft. In: WirtschaftsWoche 22, S. 58–59.
- Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (2019): Hydrogen Roadmap Europe. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- FutureCamp Climate GmbH (Hrsg.) (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (Abruf am 27.8.2020).
- Grävemeyer, Arne (2018): Weltrekord in der Wasserspaltung. Sonnenlicht direkt in Wasserstoff umgesetzt. <https://www.heise.de/select/ct/2018/16/1533342697731952> (Abruf am 26.8.2020).
- Förderverein H2 Mobilität Schweiz (o. D.): Vorstandsmitglieder. <https://h2mobilitaet.ch/verein/vorstand/> (Abruf am 27.8.2020).
- Hanke, Steven (2019a): Eon modelliert Wasserstoff-Plattform auf See. <https://www.energate-messenger.de/news/191527/eon-modelliert-wasserstoff-plattform-auf-see> (Abruf am 26.8.2020).

- Hanke, Steven (2019b): Künftig soll Strom von Offshore-Windparks Wasserstoff werden. In: Welt am Sonntag vom 9.6.2019, S. 6. <https://www.presstrend.de/news/news-detailanzeige/news/kuenftig-soll-strom-von-offshore-windparks-wasserstoff-werden.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Hans-Böckler-Stiftung, Magazin Mitbestimmung (Hrsg.) (2020): Wasser statt Rohöl. Ausgabe 02/2020. <https://www.boeckler.de/de/magazin-mitbestimmung-2744-22910.htm> (Abruf am 27.8.2020).
- Hebling, Christopher; Ragwitz, Mario; Fleiter, Tobias; Groos, Ulf; Härle, Dominik; Held, Anne; Jahn, Matthias; Pfeifer, Tilo; Plötz, Patrick; Ranzmeyer, Ombeni; Schaadt, Achim; Sensfuß, Frank; Smolinka, Tom; Wietschel, Martin (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- Heintzel, Alexander; Schneider, Thomas (2018): Der Preis für eine Brennstoffzelle lässt sich auf ein knappes Drittel bis Viertel reduzieren. <https://www.springerprofessional.de/brennstoffzelle/antriebsstrang/-der-preis-fuer-eine-brennstoffzelle-laesst-sich-auf-ein-knappes/15982170> (Abruf 26.8.2020).
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2019): Recyclingfähige, formflexible Wasserstofftanks für Brennstoffzellen-Autos, Pressemitteilung vom 20.9.2020. https://www.hzg.de/public_relations_media/news/077973/index.php.de (Abruf am 26.8.2020).
- Heuer, Steffan (2018): Wasserstofffahrzeuge. Und so läuft`s in Kalifornien. In: brand eins, 2018. <https://www.brandeins.de/magazine/brand-eins-wirtschaftsmagazin/2018/mobilitaet/wasserstofffahrzeuge-und-so-laeuft-s-in-kalifornien> (Abruf am 26.8.2020).
- Höfer, Klaus Martin (2019): Die Stahlindustrie versucht, klimafreundlicher zu werden. https://www.deutschlandfunkkultur.de/wasserstoff-statt-kohle-die-stahlindustrie-versucht.976.de.html?dram:article_id=456784 (Abruf am 26.8.2020).
- Höpner, Axel (2019): Der Gründer, der Wasserstoff als Energieträger zum Alltag machen will. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/flottenmanagement/hydrogenious-technologies-der-gruender-der-wasserstoff-als-energietraeger-zum-alltag-machen-will/24071016.html?ticket=ST-3534399-NdeTtk5W6hSkb7uORFfo-ap6> (Abruf am 26.8.2020).

- Hübner, Irina (2020): Zulassungsstatistik 2019. Mehr als 100.000 Neue Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen. In: Elektronik automotive, 14.1.2020. <https://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/mehr-als-100-000-neue-elektrofahrzeuge-auf-deutschlands-strassen-172565.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Hydrogeit (2018): CHFCE: Aufbruchstimmung in China. <https://www.hzwei.info/blog/2018/11/15/chfce-aufbruchstimmung-in-china/> (Abruf am 26.8.2020).
- Hydrogen Council (2017): A sustainable pathway for the global energy transition. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf> (Abruf am 27.8.2020).
- Hydrogen Council (Hrsg.) (2020): Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf (Abruf am 26.8.2020).
- Hydrogenious (2020): Hyundai Motor Company beteiligt sich an Hydrogenious LOHC Technologies. <https://www.hydrogenious.net/index.php/de/2020/06/04/hyundai-motor-company-beteiligt-sich-an-hydrogenious-lohc-technologies/> (Abruf am 27.8.2020).
- IG BCE Innovationsforum Energiewende e. V. (2018): Potentialatlas für Wasserstoff. Analyse des Marktpotentials für Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, im Raffineriesektor und im zukünftigen Mobilitätssektor. https://www.innovationsforum-energiewende.de/fileadmin/user_upload/Potentialstudie-fuer-gruenen-Wasserstoff-in-Raffinerien.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- Ingenieur.de (Hrsg.) (2013): Japanische Haushalte erzeugen Strom mit Brennstoffzellen. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/japanische-haushalte-erzeugen-strom-brennstoffzellen/> (Abruf am 26.8.2020).
- IVECO Presseinformationen (2020): CNH Industrial und Nikola Motor Company bauen Nikola TRE in Ulm. Pressemitteilung vom 2.6.2020. <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/cnhi-und-nikola-bauen-nikola-tre.aspx> (Abruf am 27.8.2020).
- Jendrischik, Martin (2018): Hydrogen Hero: Diesel-Züge bis 2040 auf Abstellgleis. <https://www.cleanthinking.de/hydrogen-hero-wasserstoffzug-uk/> (Abruf am 27.8.2020).
- Klima Allianz (2020): Kein Einsatz von E-Fuels im Pkw-Bereich. Pressemitteilung vom 19.5.2020. <https://www.klima-allianz.de/presse/meldung/studie-kein-einsatz-von-e-fuels-im-pkw-bereich/> (Abruf am 27.8.2020).

- Kölling, Martin (2019): Japan will die Wasserstoffmacht der Welt werden. <https://www.nzz.ch/wirtschaft/klimapionier-japan-will-die-wasserstoffmacht-der-welt-werden-ld.1510612> (Abruf am 26.8.2020).
- Kuhn, Lothar (2020a): Patente: Autoindustrie setzt noch immer auf Verbrenner. <https://edison.media/verkehr/patente-autoindustrie-setzt-noch-immer-auf-verbrenner/25205905/> (Abruf am 26.8.2020).
- Kuhn, Lothar (2020b): Wasserstoff-LKW: Daimler und Volvo verbünden sich. <https://edison.media/verkehr/wasserstoff-lkw-daimler-und-volvo-verbuenden-sich/25204467/> (Abruf am 26.8.2020).
- Leibniz Universität Hannover (2019): Brennstoffzellen als Schlüssel der Mobilität. Presseinformation vom 8.5.2019. <https://www.uni-hannover.de/de/universitaet/aktuelles/online-aktuell/details/news/brennstoffzellen-als-schluessel-der-mobilitaet/> (Abruf am 26.8.2020).
- Lohmann, Heiko (2020): Fernleitungsnetzbetreiber stellen ihre Wasserstoffvision vor. <https://www.energate-messenger.de/news/199842/fernleitungsnetzbetreiber-stellen-ihre-wasserstoffvision-vor> (Abruf am 26.8.2020).
- Malanowski, Norbert; Bachmann, Gerd; Hutapea, Luciana; Kaiser, Oliver S.; Knifka, Julia; Ratajczak, Andreas; Rijkers-Defrasne, Sylvie (2019): Monitoring Innovations- und Technologiepolitik (Zyklus 1), Ergebnisbericht, Working Paper Forschungsförderung 152, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf. https://www.boeckler.de/pdf/p_fofoe_WP_152_2019.pdf (Abruf am 8.6.2020).
- Marquardt, Christian (2020a): RVK Köln – WSW Wuppertal: Einigkeit macht hydrogen. <https://www.urban-transport-magazine.com/rvk-koeln-wsw-wuppertal-einigkei-t-macht-hydrogen/> (Abruf 2.9.2020).
- Marquardt, Christian (2020b): RVK Köln: Erste neue Wasserstoff-Busse im Einsatz. <https://www.urban-transport-magazine.com/rvk-koeln-erste-neue-wasserstoff-busse-im-einsatz/> (Abruf am 26.8.2020).
- Mayer, Karin (2020): Bosch Homburg soll Teile für Brennstoffzelle produzieren. https://www.sr.de/sr/home/nachrichten/politik/wirtschaft/bosch_soll_teile_fuer_brennstoffzelle_herstellen_100.html (Abruf am 27.8.2020).
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (o. D.): Roadmap PTX. Arbeitsgruppe 5. Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-5-Roadmap-PtX.pdf> (Abruf am 27.8.2020).

- Neldner Consult (2018): Gutachterliche Einschätzungen und Anregungen zur Gestaltung einer ganzheitlichen Energiewende. Kurzstudie im Auftrag vom Innovationsforum Energiewende e.V. https://www.innovationsforum-energiewende.de/fileadmin/user_upload/final_Kurzstudie_Energiewende_Neldnerconsult_Mai_2018.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- New Energy Coalition (o. D.): Hydrogen Valley. <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/> (Abruf am 27.8.2020).
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) (o. D.): Aufbau Wasserstoff-Tankstellennetz. Aufbau eines Wasserstoff-Tankstellennetzes für Brennstoffzellenfahrzeuge in Deutschland. <https://www.now-gmbh.de/de/bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/aufbau-wasserstoff-tankstellennetz> (Abruf am 26.8.2020).
- Pagenkopf, Johannes; Schirmer, Toni; Böhm, Mathias; Streuling, Christoph; Herwartz, Sebastian (2020): Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr. https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20200331-hohes-marktpotenzial-alternativer-antriebe-im-schieneverkehr/now_marktanalyse-schieneverkehr.pdf (Abruf am 26.08.2020).
- Physik-Journal (Hrsg.) (2019a): 100.000 Stunden heißer Strom. Hochtemperatur-Brennstoffzelle erreicht mehr als elf Jahre Lebensdauer. <https://www.pro-physik.de/nachrichten/100000-stunden-heisser-strom> (Abruf am 26.8.2020).
- Physik-Journal (Hrsg.) (2019b): Rekordverdächtige Effizienz. In: Physik-Journal 18, S. 19.
- Pillau, Florian (2020): Hamburger Hochbahn schreibt Auftrag über Wasserstoffbusse aus. <https://www.heise.de/news/Hamburger-Hochbahn-schreibt-Auftrag-ueber-Wasserstoffbusse-aus-4862600.html> (Abruf am 2.9.2020).
- Pro-physik.de (2019): Wasserstoff aus Erdgas ohne CO₂. <https://www.pro-physik.de/nachrichten/wasserstoff-aus-erdgas-ohne-co2> (Abruf am 26.8.2020).
- Proton Motor (2019): Meilenstein für Technologie-Marktführer Proton Motor Fuel Cell GmbH: Offizielle Inbetriebnahme der neuen Brennstoffzellen-Fertigungsanlage. <https://www.proton-motor.de/meilenstein-fuer-technologie-marktfuehrer-proton-motor-fuel-cell-gmbh-offizielle-inbetriebnahme-der-neuen-brennstoffzellen-fertigungsanlage-%E2%97%8F-bayerischer-staatsminister-hubert-aiwanger-start/> (Abruf am 27.8.2020).

- Rat der EU (2019): Emissionssenkung: Rat nimmt CO₂-Emissionsnormen für Lkw an, Pressemitteilung vom 13.6.2019. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2019/06/13/cutting-emissions-council-adopts-co2-standards-for-trucks/> (Abruf am 27.8.2020).
- Rathmann, Matthias (2020): Projekt von Hyundai in der Schweiz Wasserstoff-Lkw kurz vorm Start. <https://www.eurotransport.de/artikel/projekt-von-hyundai-in-der-schweiz-wasserstoff-lkw-kurz-vorm-start-11152159.html> (Abruf 27.8.2020).
- Rother, Franz W. (2020): E-Highway: Klimafreundlich – aber viel zu teuer. <https://edison.media/verkehr/e-highway/25205479/> (Abruf am 27.8.2020).
- Salzgitter Flachstahl AG (2019): SZFG und Sunfire nehmen mit GrInHy2.0 den nächsten Entwicklungsschritt der Dampf-Elektrolyse. Pressemitteilung vom 7.3.2019. <https://www.salzgitter-flachstahl.de/de/news/pressemeldung-der-salzgitter-ag/2019-03-07/szfg-und-sunfire-nehmen-mit-grinhy20-den-nchsten-entwicklungsschritt-der-dampfelektrolyse.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Schäfer, Patrick (2018): FH Münster forscht an Wasserstoffgewinnung aus Biomasse. <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/biomasse/fh-muenster-forscht-an-wasserstoffgewinnung-aus-biomasse/16346608> (Abruf am 26.8.2020).
- Schlandt, Jakob; Zaremba, Nora (2020): Beim Wasserstoff wünsche ich mir Farbenblindheit. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/uniper-vorstandschef-andreas-schierenbeck-beim-wasserstoff-wuensche-ich-mir-farbenblindheit/25739692.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Schmale, Oliver (2017): Ein E-Lastwagen mit 1900 Kilometer Reichweite. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/ fuer-lkw-bosch-setzt-auf-brennstoffzelle-15208157.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Seidel, Pia (2017): Wie wir es schaffen, ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse zu kaufen. <https://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/wie-wir-es-schaffen-ab-2020-nur-noch-emissionsfreie-busse-zu-kaufen/> (Abruf am 26.8.2020).
- Seidel, Pia (2019): Gibt es noch Wasserstoffbusse bei der Hochbahn? <https://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/gibt-es-noch-wasserstoffbusse-bei-der-hochbahn/> (Abruf am 26.8.2020).
- Spiegel Mobilität (2019a): Hamburg schafft Wasserstoffbusse wieder ab. <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/hamburg-hochbahn-schafft-wasserstoffbusse-wieder-ab-a-1253009.html> (Abruf 26.8.2020).

- Spiegel Mobilität (2019b): Start-up entwickelt erstes Wasserstoff-Flugtaxi. <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/flugtaxi-mit-wasserstoff-antrieb-a-1270720.html> (Abruf 2.9.2020).
- Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie (SSES) (2019): Australien will nachhaltigen Wasserstoff exportieren. <https://www.sses.ch/de/australien-will-nachhaltigen-wasserstoff-exportieren/> (Abruf am 26.8.2020).
- Stüber, Jürgen (2018): Audi und Hyundai treiben Wasserstoff-Fahrzeuge gemeinsam voran. <https://www.gruenderszene.de/allgemein/audi-hyundai-brennstoffzelle-wasserstoff#:~:text=Brennstoffzelle-.Audi%20und%20Hyundai%20treiben%20Wasserstoff%2DFahrzeuge%20gemeinsam%20voran,Technologie%20gemeinsam%20mit%20Hyundai%20weiterentwickeln.&text=Hyundai%20bringt%20den%20Nexo%20mit%20Brennstoffzellenantrieb%20auf%20den%20Markt.> (Abruf am 26.8.2020).
- Thomalla, Volker K. (2018): Liebherr und GM bauen gemeinsam eine Brennstoffzellen-APU. <https://aerobuzz.de/industrie/liebherr-und-gm-bauen-gemeinsam-eine-brennstoffzellen-apu/> (Abruf 2.9.2020).
- Toyota (2019): Meilenstein für den Toyota Mirai. Toyota produziert über 10.000. Brennstoffzellenlimousine. <https://www.toyota-media.de/blog/toyota-modelle/artikel/meilenstein-fur-den-toyota-mirai> (Abruf am 26.8.2020).
- Umbach, Eberhard; Henning, Hans-Martin (2019): Ist die Energiewende noch zu retten? In: Physik Journal 18 Nr. 3, S. 34–39.
- Urbansky, Frank (2020): Überschussstrom reicht nicht für Power-to-X. <https://www.springerprofessional.de/photovoltaik/windenergie/ueberschussstrom-reicht-nicht-fuer-power-to-x/17520446> (Abruf am 27.8.2020).
- VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (o. D.): Kommentierung des VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. zur Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung. https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/presse/dateien/2020_06_Kommentierung_des_VDI_zur_Nationalen_Wasserstoffstrategie.pdf (Abruf am 27.8.2020).
- Vetter, Philipp (2020): Für die Wasserstoff-Strategie braucht Altmaier noch mehr Gas aus Russland. <https://www.welt.de/wirtschaft/article205966173/Nord-Stream-2-Altmaier-setzt-auch-fuer-Wasserstoff-auf-russisches-Erdgas.html> (Abruf am 26.8.2020).
- Wenzel, Franz-Thomas (2019): Beginnt der Brennstoffzellen-Boom? In: neue Energie 06/2019, S. 66–70.

- Werwitzke, Cora (2020): SWEG wird ersten eCitaro mit BZ-Range Extender erhalten. <https://www.electrive.net/2020/03/31/sweg-wird-ersten-ecitaro-mit-bz-range-extender-erhalten/> (Abruf am 26.8.2020).
- Winter, Thorsten (2019): Wo der Wasserstoff für RMV-Züge herkommt. <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/wirtschaft/nahverkehr-woher-der-wasserstoff-fuer-die-rmv-zuege-kommt-16209186.html> (Abruf 2.9.2020).
- Wissenschaft.de (Hrsg.) (2019): Ein neues Auto für den Mond: Interview mit Andreas Lübeck von Toyota Deutschland. In: Bild der Wissenschaft, Juni 2019, S. 8.

Autoren

Oliver S. Kaiser, Diplom-Physiker, ist seit dem Jahr 2007 Technologieberater in der VDI Technologiezentrum GmbH. Nach fünf Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund war er anschließend als Applikations-Ingenieur bei der Intacton GmbH mit optischer Messtechnik befasst. Er ist Autor von Studien über Elektromobilität, der Zukunft des Autos und der Automobil-Datensicherheit sowie über technische Ressourceneffizienzpotenziale in verschiedenen Branchen. Im gegenwärtig laufenden Projekt „Monitoring Innovations- und Technologiepolitik“ für die Hans-Böckler-Stiftung arbeitet er seit 2017 an den Themenfeldern Smart Data und Künstliche Intelligenz, Quantencomputer und autonome Klein- und Omnibusse im öffentlichen Verkehr.

Dr. Norbert Malanowski ist als Senior-Technologieberater und Projektleiter in der VDI Technologiezentrum GmbH seit 1999 vor allem in den Bereichen Innovations- und Arbeitspolitik, Foresight, Technikfolgenabschätzung sowie Digitale Transformation von Wirtschaft und Arbeit tätig. Von 2005 bis 2007 hat er für die Europäische Kommission in Sevilla als Senior Scientific Fellow gearbeitet. Ergebnisse seiner Arbeit finden sich u. a. in den Publikationen „R&D and innovation activities in companies across Global Value Chains“ (2019, Report der Europäischen Kommission, Brüssel), „Digitalisierung in der chemischen Industrie“ in: „Grand Challenges meistern – der Beitrag der Technikfolgenabschätzung“ (2018, Edition Sigma, Berlin), „Nanotechnologie: Innovationsmotor für den Standort Deutschland“ (2011, Nomos-Verlagsgesellschaft). Zudem ist Norbert Malanowski seit 2009 als Gastdozent im Bereich Innovations- und Arbeitspolitik sowie Arbeitswelten der Zukunft an der Universität Witten/Herdecke aktiv. Vor seinem Studium der Politikwissenschaft/ Politischen Ökonomie an den Universitäten Duisburg und Toronto hat er als Werkzeugmacher gearbeitet.

Zur Erreichung von Klimaschutzzieleen wird der Wasserstofftechnologie ein hohes Potenzial zugeschrieben. Dazu bedarf es in naher Zukunft einen Markthochlauf der inländischen Wasserstoffproduktion und -verwendung. Das Working Paper berichtet über den technisch-ökonomischen Stand der Wasserstofftechnologie im Verkehrssektor und in der chemischen Industrie sowie über die deutsche Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich. Daraus werden zehn Thesen für eine prospektive Innovations- und Technikgestaltung abgeleitet, die auch Anforderungen an die Beschäftigungsentwicklung und Qualifizierung einbezieht.
