



## **Wasserstoff – Rohstoff der Zukunft?!**

Eike-Christian Spitzner, Eyk Bösche, Paradiso Coskina,  
Sophie Cordeiro, Janine Kleemann

Eike-Christian Spitzner, Eyk Bösche, Paradiso Coskina, Sophie Cordeiro,  
Janine Kleemann

## Wasserstoff – Rohstoff der Zukunft?!

### Abstract

Welchen Beitrag leistet Wasserstoff zur Energiewende in einer energiehungrigen Welt? Je mehr Energie zukünftig aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, umso besser. Denn mit dem Green Deal haben sich die Europäische Union und auch die deutsche Bundesregierung ambitionierte Energie- und Klimaschutzziele gesetzt und streben bis zum Jahr 2050 komplette Klimaneutralität an. Die aus Wind, Wärme, Wasser und Sonnenlicht in Deutschland gewonnenen Energiemengen können jedoch den nationalen Energiebedarf gegenwärtig nicht decken. Dank der Forschungen in den vergangenen zehn Jahren könnte Wasserstoff als potenziell nachhaltiger Energieträger einen entscheidenden Beitrag zur Dekarbonisierung leisten, vor allem in den Bereichen Verkehr, Industrie und Gebäudeenergieversorgung. Die technologischen Fortschritte sind vielversprechend. Ein weiterer Vorteil: Die Infrastruktur zur Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft ist bereits in Teilen vorhanden. Zudem wurden plausible Szenarien für einen gleitenden Übergang zur großflächigen Nutzung der neuen Technologien vorgelegt. Nun gilt es, die Interessen zu bündeln und europaweit eine effiziente Wirtschaftsförderung zu organisieren.

### Einleitung

#### Vision 2050: Ein Blick in die Zukunft

##### Klimaneutralität ist erreicht.

Es ist das Jahr 2050. Deutschland und alle anderen EU-Staaten sind klimaneutral. Die Dekarbonisierung war ein langer Weg, eine Generationenaufgabe. Einige wenige Fachleute streiten sich noch, wann genau dieses Ziel realisiert worden ist. Abgesehen davon besteht jedoch Konsens über diesen Erfolg. Dreißig Jahre zuvor, im Jahr 2020, hatte man nach der Covid-19-Pandemie die Maßnahmen zum wirtschaftlichen Wiederaufbau strikt an ihrer Klimawirkung orientiert. Ein mutiger Schritt. Einer von vielen. Über die Jahre hat sich gezeigt, dass es richtig war, dabei

auf Technologien rund um den sogenannten „grünen“ Wasserstoff zu setzen. Dieser wird per Elektrolyse erzeugt und es werden dafür ausschließlich erneuerbare Energiequellen genutzt. Moderne Elektrolyseverfahren haben sich als ein wichtiger Baustein des Erfolges erwiesen.

##### Die Verkehrswende ist geschafft!

Technologische Entwicklungen wie die Digitalisierung und der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien haben einen erheblichen Teil zu einer Mobilitäts- und Energiewende beigetragen. Infolge der Mobilitätswende ist der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors gesunken, ohne die Mobilität der Menschen und Warenströme einzuschränken. Das Verkehrsaufkommen ist gesunken, was nicht zuletzt auch einer schlüssigen politischen Rahmensetzung zu verdanken war. Dank neuer technischer Möglichkeiten konnte die Politik den Verkehrssektor konsequenter regulieren und dabei gleichzeitig Klimaschutzziele verfolgen. Im Zusammenspiel mit der Energiewende im Mobilitätssektor konnte der verbleibende Endenergiebedarf des Verkehrs mit klimaneutralen Antriebsenergien gedeckt werden. Im Rahmen der Verkehrswende spiegelte sich der Dreiklang der Energiewende aus höherer Energieeffizienz, direkt genutzten erneuerbaren Energien und der effizienten Nutzung von „grünem“ Strom in den Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie entsprechend wider.

##### Elektromobilität ist zur Normalität geworden.

Wie laut und umweltbelastend Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor waren, ist fast vergessen. Auf den Fernverkehrsstrecken verkehren Züge im Abstand weniger Minuten und ein nahtloser Umstieg auf den elektrifizierten Öffentlichen Personennahverkehr oder andere Verkehrsmittel ist erfolgt – sowohl in urbanen als auch in ländlichen Räumen. Im Individualverkehr und im Bereich leichter Nutzfahrzeuge (LNF) fahren nahezu alle Fahrzeuge elektrisch – die meisten, indem sie direkt aus erneuerbaren Energiequellen gewonnenen Strom mit Zwischenspeicherung (Batterie) oder indirekt in Form von Wasserstoff (Power-to-H<sub>2</sub>) oder flüssiger (Power-to-Liquid) sowie gasförmiger (Power-to-

Gas) Kraftstoffe nutzen. Auch im Straßengüterverkehr hat sich viel getan. Im Kurz- und Mittelstreckenverkehr haben sich batterieelektrische LKW etabliert, während der Bereich der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) mit hoher Fahrleistung (Langstrecke und Pendelverkehr) von LKW mit Wasserstoff-Brennstoffzellen dominiert wird. In einigen Fällen wird elektrische Energie auch ohne Zwischenspeicherung (z. B. über Oberleitungen) direkt genutzt.

#### Mit Strom nach Paris und synthetischen Kraftstoffen nach New York fliegen

Im Bereich der Luftfahrt gab es in den letzten Jahren viele Fortschritte mit elektrischen Antrieben – kurze Strecken mit E-Flugzeugen sind die Regel, und selbst Mittelstreckenflüge erscheinen in absehbarer Zeit technisch realistisch. Auf Mittel- und Langstrecken sind aber nach wie vor die aus grünem Wasserstoff hergestellten synthetischen Kraftstoffe die dominierende Energiequelle. Der Zusammenbruch der Luftfahrt ist ausgeblieben – trotz der enormen Umweltauflagen. So wurde z. B. im Jahr 2022 ein gleitender Anstieg der CO<sub>2</sub>-Bepreisung beschlossen. 2030 kostete die Tonne CO<sub>2</sub> 100€, danach wurde der Preis linear auf bis heute – wir befinden uns noch immer im Jahr 2050 – 350€ pro Tonne angehoben. Lenkend wirkten auch das Neuzulassungsverbot von Verbrennungsmotoren für PKW und Busse ab 2030 und der Umstand, dass die Anbieter von Mineralölen verpflichtet wurden, ihren Produkten synthetische Kraftstoffe beizumischen.

#### Schweröl für die Schifffahrt? Fast kein Thema mehr

Weltweit hat der Seeverkehr auch nach 2020 noch deutlich zugenommen. Über 90 Prozent des Welthandels erfolgen weiterhin auf dem Seeweg. Doch die vom globalen Seeverkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind aufgrund von Effizienzsteigerungen und neuen Antriebstechnologien ebenfalls zurückgegangen. Schwefelhaltiges Schweröl wurde signifikant ersetzt, beispielsweise durch strombasierte Flüssigkraftstoffe. Aber auch gasförmige Kraftstoffe, die effiziente Verbrennungsmotoren antreiben, haben einen Großteil dazu beigetragen, dass die Schifffahrt ihre Stickstoffdioxid- und Schwefeloxidemissionen ab 2020 deutlich reduzieren konnte. Daneben haben sich auch neue brennstoffzellenelektrische wie auch batterieelektrische Antriebe durchgesetzt.

#### Wasserstoffbasiertes Wirtschaften als industrieller Innovationsmotor

In der Industrie erwies sich der weitgehende Umstieg auf eine wasserstoffbasierte Wirtschaft als Innovationsmotor. Zunächst nur unter Druck gestartet, haben die notwendigen Transformationsprozesse auch der Digitalisierung in der Industrie zum Durchbruch verholfen. Vom Stahlwerk, welches heute mit Wasserstoff statt Koks arbeitet, bis zur Polymerchemie, in der Erdöl durch synthetische Rohstoffe ersetzt wurde, konnten digitale

Lösungen die Produktionsprozesse und Energieverbräuche optimieren. Viele Unternehmen erzeugen ihren Strom direkt selbst, beispielsweise aus Solarkollektoren oder kleinen Windrädern.

#### Klimaneutral wohnen – wenn smarte Häuser ihre eigene Energie erzeugen

In der dekarbonisierten Ära wird die für das Heizen benötigte Energie fast ausschließlich regenerativ erzeugt. Die modernen Plusenergiehäuser nutzen die Sonnenenergie, um Warmwasser in einer Art großen Thermoskanne für den Winter zu speichern. Diese saisonalen Wärmespeicher stellen die Wärmeversorgung im Winter sicher und versorgen sogar einen Teil der Gebäude im Altbestand mit. Fast alle Dächer sind nun mit Solarkollektoren besetzt. Viele Haushaltsgeräte lassen sich so steuern, dass sie die flexiblen Preise des Strommarkts nutzen können.

#### Leistungsfähige Infrastrukturen und internationale Kooperation – Basis einer modernen Gesellschaft

Trotz des massiven Ausbaus der erneuerbaren Energien ist Deutschland auch in der dekarbonisierten Ära nicht vollständig energieautark. Das Eurasien durchziehende Netz von Pipelines, das in der fossilen Ära für Öl und Gas gebaut und zum Symbol für die Abhängigkeit Europas von anderen Weltregionen wurde, ist über die letzten Jahrzehnte nach und nach auf wasserstoffbasierte Energieträger umgestellt worden. Es ist heute ein Energiespeicher mit enormer Kapazität, der eine stabile nachhaltige Energieversorgung ermöglicht. Es bildet gemeinsam mit dem leistungsfähigen transnationalen Stromnetz, einer effizienten und nachhaltigen Verkehrsinfrastruktur sowie flächendeckenden Datennetzen die infrastrukturelle Basis der modernen Gesellschaft.

Mit zahlreichen arabischen, asiatischen, afrikanischen und mittelamerikanischen Staaten – darunter auch frühere Öllieferanten – hat Europa seine wirtschaftlichen Beziehungen verstetigt. Die extrem niedrigen Kosten für die Erzeugung von Wasserstoff aus Solarstrom in diesen sonnenlichtreichen Regionen der Erde, zusammen mit den nach und nach auf den Transport von wasserstoffbasierten Energieträgern umgerüsteten Flotten von Tankschiffen, haben die bestehenden Wirtschaftsbeziehungen in die postfossile Ära überführt. Deutschland und Europa haben ihre Wasserstoffversorgung durch eine Vielzahl von Lieferanten umfänglich gesichert. Im Gegenzug haben sich neue wirtschaftliche Perspektiven für die betreffenden Länder aufgetan.

## Aktuelle Entwicklungen und Fragestellungen

### Von der Utopie zur Wirklichkeit

#### Welchen Beitrag kann die Wasserstofftechnologie für eine klimaneutrale Zukunft tatsächlich leisten?

2050 – dreißig Jahre, nur eine Generation in die Zukunft: Ist das bis hierher beschriebene Szenario eine reine Utopie? Was ist technisch möglich? Wo besteht noch Forschungsbedarf? Und welchen Beitrag kann die Wasserstofftechnologie für eine klimaneutrale Zukunft tatsächlich leisten? Zu diesen Fragestellungen soll im Folgenden eine Orientierung gegeben werden. Auf Grundlage der bereits heute verfügbaren Technologien werden absehbare Entwicklungsszenarien zusammentragen und mögliche Ansätze für das weitere Vorgehen skizziert.

#### Was ist Wasserstoff und was macht ihn heute so bedeutsam?

Wasserstoff (chem. H) ist das häufigste und am einfachsten aufgebaute chemische Element im Universum. Auf der Erde kommt Wasserstoff fast ausschließlich in gebundener Form als Bestandteil von Wasser und in einer Vielzahl organischer Verbindungen vor. Dem gegenüber ist reiner Wasserstoff unter irdischen Bedingungen ein farbloses Gas, das in molekularer

Form als  $H_2$  vorliegt. Bisher wird reiner Wasserstoff hauptsächlich für spezifische Anwendungen als Prozessgas eingesetzt oder gar als Nebenprodukt verbrannt. Die sichere Handhabung des Gases (insbesondere die Vermeidung von Knallgasexplosionen durch eine unkontrollierte Reaktion mit Sauerstoff), ist zwar anspruchsvoll, gilt jedoch als technisch gelöst. Molekularer Wasserstoff ist nahezu unbegrenzt verfügbar, lager- und transportfähig und bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten als (potenziell) klimaneutrale stationäre und mobile Energiequelle. Das sind die wichtigsten Gründe, weshalb dieses chemische Element eine besondere Bedeutung für den Klimaschutz und die Energiewende hat.

#### Wie wird Wasserstoff erzeugt?

Die industrielle Erzeugung von Wasserstoff erfolgt zukünftig vor allem durch eine Aufspaltung von Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe elektrischer Energie. Dieser Prozess wird als Elektrolyse bezeichnet. Umfassender Klimaschutz zielt darauf ab, den erforderlichen elektrischen Strom aus regenerativer Quellen (vor allem Solarenergie, Windkraft, Gezeitenkräfte, Geothermie) zu erzeugen. Der hierdurch gewonnene „grüne“ Wasserstoff kann langfristig gespeichert sowie für die  $CO_2$ -neutrale Versorgung von Anlagen und Fahr-

Technologie	Alkalische Elektrolyse (AEL)	PEM-Elektrolyse (PEMEL)	Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)
<b>Funktionsschema</b> <b>K</b> = Kathode <b>A</b> = Anode			
<b>Kathodenreaktion</b>	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
<b>Anodenreaktion</b>	$2OH^- \rightarrow 0,5 O_2 + H_2O + 2e^-$	$H_2O \rightarrow 2H^+ + 0,5 O_2 + 2e^-$	$O^{2-} \rightarrow 0,5 O_2 + 2e^-$
<b>Ladungsträger</b>	OH <sup>-</sup> -Ionen	H <sup>+</sup> -Ionen	O <sup>2-</sup> -Ionen
<b>Elektrokatalysatoren</b>	K: Nickel; A: Metalloxide	K: Platin; A: Iridiumoxid	K: Nickel; A: Metalloxide
<b>Separator</b>	Diaphragma (porös)	Membran	Membran
<b>Elektrolyt</b>	wässrig (Lauge)	fest (Polymer)	fest (Keramik)
<b>Betriebstemperatur</b>	30...90 °C	20...100 °C	750...900 °C

Abb. 1: Elektrolyse-Technologien (eigene Darstellung nach Röntzsch 2020)<sup>1</sup>. Die Abbildung zeigt verschiedene Elektrolysewege mit Kenndaten: Für die Aufspaltung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff wird neben einer Spannungsversorgung ein Separator benötigt, der positive von negativen Ladungsträgern trennt.

zeugen genutzt werden, die nicht direkt mit Strom bzw. Batterie betrieben werden können. Im Gegensatz zu Photovoltaik- und Windkraftanlagen zur direkten Stromerzeugung entwickelt sich der Markt für die Wasserelektrolyse gerade erst. Insbesondere die Entwicklung und Herstellung großvolumiger, effizienter Elektrolyseanlagen (sog. Elektrolyseure) stellen einen weltweiten Wachstumsmarkt dar, der für Deutschland und Europa von industriepolitischer Bedeutung ist.

Zur Wasserstoff-Elektrolyse sind grundsätzlich drei Technologien marktreif: die alkalische Elektrolyse, die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse, proton exchange membrane) und die Hochtemperaturelektrolyse (SOEC, solid oxide electrolysis cell).

Bei der alkalischen Elektrolyse (AEL) wird durch Anlegen von Strom in einer leitfähigen Lösung Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Prozess ist industriell etabliert, robust in der Anwendung und mit geringen Investitionskosten verbunden. Jedoch entsteht Chlorgas als unerwünschtes und umweltschädliches Reaktionsprodukt.

Bei der PEM-Elektrolyse (PEMEL) werden anstelle der wässrigen Lösung leitfähige Polymerfeststoffe verwendet. Diesem Prozess werden momentan die größten Chancen bei der Marktdurchdringung eingeräumt, da keine umweltschädlichen Reaktionsprodukte gebildet werden. Ein effizienter Einsatz ist vor allem in Form von gestapelten PEM-Elektrolysezellen, sogenannten PEM-Stacks, zu erwarten. Es bleibt allerdings eine Herausforderung, PEM-Stacks mit hoher Lebensdauer herzustellen.

In ersten industriellen Testanwendungen befindet sich die Hochtemperaturelektrolyse. Durch die hohe Reaktionstemperatur von bis zu 900°C wird ein Teil der zur Elektrolyse erforderlichen Energie durch Wärme geliefert, so dass sich der Strombedarf für die Elektrolyse verringert und ihr Wirkungsgrad erhöht. Von spezieller Bedeutung ist hier die in letzter Zeit besonders intensiv untersuchte Hochtemperatur-Co-Elektrolyse, bei der heißer Wasserdampf und CO<sub>2</sub> zu Synthesegas, d. h. einer Mischung aus Kohlenmonoxid (CO) und H<sub>2</sub>, elektrolysiert werden. Das Synthesegas kann anschließend zu synthetischen Kraftstoffen weiterverarbeitet werden (Fischer-Tropsch-Synthese). Dieses Verfahren ist speziell an Standorten mit Dampfquellen (z. B. Island) sehr effizient einsetzbar.

#### Die verschiedenen „Farben“ des Wasserstoffs

Das Ziel einer möglichst vollständigen Klimaneutralität ist es, dass weder die Herstellung noch der Einsatz künftiger Energiequellen klimaschädliche Treibhausgase erzeugen dürfen. Dies gilt auch für den Wasserstoff. Während seine Nutzung selbst

klimaneutral ist, gilt dies für seine Herstellung nicht in jedem Fall. Dementsprechend werden verschiedene „Farben“ des Wasserstoffs unterschieden. Sie zeigen einem Ampelsystem ähnlich an, wie klimafreundlich der in den jeweiligen Verfahren erzeugte Wasserstoff eingestuft wird.

Von „grünem“ Wasserstoff wird gesprochen, wenn seine Herstellung vollständig unter Nutzung erneuerbarer Energiequellen erfolgt. Das gelingt beispielsweise, wenn Solarstrom oder Strom aus Windkraftanlagen bei der Elektrolyse eingesetzt wird. Nur in diesem Fall liegt eine vollständige Klimaneutralität in Produktion und Nutzung vor, da hier kein CO<sub>2</sub> entsteht. „Grünen“ Wasserstoff zu erzeugen, ist somit der Kern aller Bestrebungen zur Eindämmung des Klimawandels durch den Ersatz fossiler Brennstoffe.

„Grauer“ Wasserstoff wird dagegen aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Beispielsweise kann Erdgas unter Wärmezufuhr in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt werden. Bei dieser Dampfreformierung wird das mit entstehende CO<sub>2</sub> anschließend in die Atmosphäre abgegeben. Dies verstärkt den globalen Treibhauseffekt noch. Bei der Produktion einer Tonne Wasserstoff entstehen so rund zehn Tonnen CO<sub>2</sub>. Dieser Prozess ist somit sogar klimaschädlich und daher möglichst zu vermeiden<sup>2</sup>.

„Blauer“ Wasserstoff wird zwar ebenfalls aus fossilen Brennstoffen gewonnen, jedoch wird das CO<sub>2</sub> hier bei der Entstehung abgeschieden und gespeichert (z. B. durch „dauerhafte“ Einlagerung in unterirdische Lagerstätten). Diese CCS-Technologien (carbon capture and storage), einschließlich ihrer Risiken und Kosten, werden derzeit intensiv diskutiert. Das Verfahren ist zumindest umstritten, da z. B. unklar ist, wie langlebig die CO<sub>2</sub>-Speicherung ist. „Blauer“ Wasserstoff kann jedoch für eine Übergangszeit einen Zwischenschritt hin zu einer klimaneutralen Wasserstoffherzeugung darstellen. Da das bei der Wasserstoffproduktion erzeugte Kohlendioxid kurzfristig nicht in die Atmosphäre gelangt, ist diese Form der Wasserstoffproduktion bilanziell CO<sub>2</sub>-neutral.

Eine neuere Methode der Wasserstoffgewinnung wird mit der Farbe „Türkis“ assoziiert: die sogenannte Methanpyrolyse. Dabei handelt es sich um die Umwandlung von Methan unter hohen Temperaturen und ohne Sauerstoff zu H<sub>2</sub> und Kohlenstoff. Zwar basiert die Methanpyrolyse auf fossilen Energieträgern, jedoch bleibt der entstehende Kohlenstoff als Feststoff zurück und erzeugt damit keine Treibhausgase. Der Prozess verspricht hohe Wirkungsgrade, erfordert jedoch Temperaturen um 1200°C. Die Technologie befindet sich noch in der Erforschungsphase und konnte bisher nur im Labormaßstab erprobt werden. Es scheint hierbei grundsätzlich möglich, Biogas als

2 Quelle: <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>

Methanquelle zu verwenden und somit bilanziell sogar Kohlenstoff aus der Atmosphäre zurückzugewinnen. Die Absorption an sich erfolgt jedoch durch die Pflanzen aus der Luft. Für die CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung aus der Atmosphäre stellt das Pflanzen neuer Bäume wohl die effizientere Alternative zum Anbau von Pflanzen, die in Biogasanlagen verwertet werden, dar<sup>3</sup>.

#### Wie wird Wasserstoff transportiert und gespeichert?

Wasserstoff zu transportieren und zu speichern ist technisch anspruchsvoll. Im gasförmigen Zustand lässt er sich grundsätzlich über das in Europa verbreitete Gasnetz transportieren. Allerdings ist eine mögliche Umwidmung von (Teil-)Netzen abhängig vom Material der Rohre, da Wasserstoff zu Versprödung und Korrosion führen kann. Alternativ zur Komplettumstellung auf Wasserstoff ist es technisch möglich, den Anteil von Wasserstoff im Gasnetz auf zunächst 10 oder 20 Prozent zu erhöhen. Damit würde eine schnelle CO<sub>2</sub>-Minderung für alle Erdgasnutzer erzielt. Jedoch sind einige Nutzer, insbesondere Erdgasfahrzeuge, bisher auf einen hohen Reinheitsgrad des Erdgases angewiesen. In kleineren Mengen wird Wasserstoff auch in Druckbehältern per LKW transportiert. Bisher weniger bedeutend sind der Transport in Form von tiefkaltem Flüssigwasserstoff und über flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC, liquid organic hydrogen carriers). Jedoch stellen Seeschiffe eine wichtige Option für den interkontinentalen Transport von Flüssigwasserstoff dar. Seeschiffe können leichter (als bspw. LKW) das für LOHC notwendige zusätzliche Gewicht des ölbasierten Trägermedium mitführen, an das Wasserstoff in diesem Fall gebunden ist.

Neben saisonalen Wärmespeichern auf Wasserbasis, die besonders für Heizzwecke an Bedeutung gewinnen werden, bietet die Speicherung von Wasserstoff die beste Möglichkeit, Energie aus erneuerbaren Quellen längerfristig verfügbar zu machen, um damit z. B. dunkle und windarme Winter zu überbrücken. Neben dem Gasnetz werden hierfür aktuell Kavernenspeicher in ehemaligen Salzlagerstätten erprobt, z. B. im sachsen-anhaltinischen Bad Lauchstädt.

Insgesamt ist Wasserstoff als Energieträger nicht nur sehr variabel einsetzbar. Er ist trotz der Herausforderungen, die Transport und Speicherung mit sich bringen, den bisherigen fossilen Energieträgern zumindest ebenbürtig.

#### Die Bedeutung von Wasserstoff für die Energiewende

Wasserstoff bietet eine Chance, die derzeit getrennten Sektoren Strom, Wärme und Mobilität zu verbinden (Sektorenkopplung). Durch Power-to-Gas ist es möglich, aus Wind- und Son-

nenenergie via Elektrolyse „grünen“ Wasserstoff zu gewinnen, der sich im Gegensatz zu Strom über lange Zeiträume speichern und über weite Strecken transportieren lässt. Hier fungiert das vorhandene Gasnetz neben seiner Transportfunktion auch als riesiger Speicher, der die Stromnetze entlasten und somit stabilisieren kann. Technisch erscheint es möglich, in wenigen Jahren die Hälfte der deutschen Haushalte mit grünem Gas zu versorgen – allein mit der heutigen Infrastruktur der Gasnetze. Dort kann der aus erneuerbaren Energien erzeugte Wasserstoff z. B. in Brennstoffzellen-Heimsystemen zum klimaneutralen Heizen oder zur Eigenstromversorgung eingesetzt werden.<sup>4</sup>

Anzunehmen ist auch, dass infolge der Speicherfähigkeit des Wasserstoffs der weitere Ausbau des Stromnetzes reduziert werden kann. Der Grund: Die oft fluktuierende Stromerzeugung durch erneuerbare Energien kann durch eine der Stromerzeugung variabel anpassbare Leistung der Elektrolyseure ausgeglichen werden. Dies wird den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen. Ergänzend ist zu erwähnen, dass zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung neben dem Wasserstoff auch eine Vielzahl von anderen steuerbaren Energiewandlern zur Verfügung stehen, die teilweise sogar effizienter sind (z. B. Power-to-Heat-Anwendungen, die elektrischen Strom in Wärme umwandeln). Es erscheint sinnvoll, weitere Möglichkeiten zu schaffen, damit derartige Energiewandler flexibel eingesetzt werden können – auch im Privathaushalt. Wasserstoff kann hierfür ein Baustein sein.

Zur schrittweisen Dekarbonisierung, insbesondere der verbrauchsintensivsten Sektoren Verkehr und Industrie<sup>5</sup>, ist Wasserstoff von zentraler Bedeutung für diejenigen Anwendungen, die nicht oder nur unter hohem Aufwand elektrisch zu betreiben sind. Typische Beispiele hierfür sind die metallverarbeitende Industrie, die chemische Industrie und der Schwerlastverkehr. In der Industrie wird hierfür eine vielfache Umstellung thermischer und chemischer Prozesse auf Wasserstoff erforderlich werden. Hierbei ist durchaus mit wirtschaftlichen Anpassungsschwierigkeiten zu rechnen, solange globale Wettbewerber die Umstellung auf die Wasserstoffwirtschaft erst zeitversetzt vollziehen. Im besonderen öffentlichen Fokus steht die Rolle von Wasserstoff im Verkehrssektor. Ähnlich wie im Gebäudesektor wird hier aus Effizienzgründen Strom vielfach direkt ohne Zwischenspeicherung genutzt werden. Beispielhaft sind der Transport auf der Schiene sowie der Einsatz von Strom-Oberleitungen<sup>6</sup> für schwere Nutzfahrzeuge zu nennen. Für den PKW-Verkehr und leichte Nutzfahrzeuge wird es wasserstoffbasierte Brennstoffzellenantriebe dort geben, wo lange Laufleistungen erforder-

3 Quelle: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/wasserstoff-aus-methanpyrolyse.php>

4 Quelle: <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende/>

5 AGEB e.V., 2020: Aktuelle Daten zu Primärenergieverbrauch, Energieflussbilder, Bilanzen 1990–2018. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de>, zuletzt geprüft am 18.06.2020

6 <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/straton>

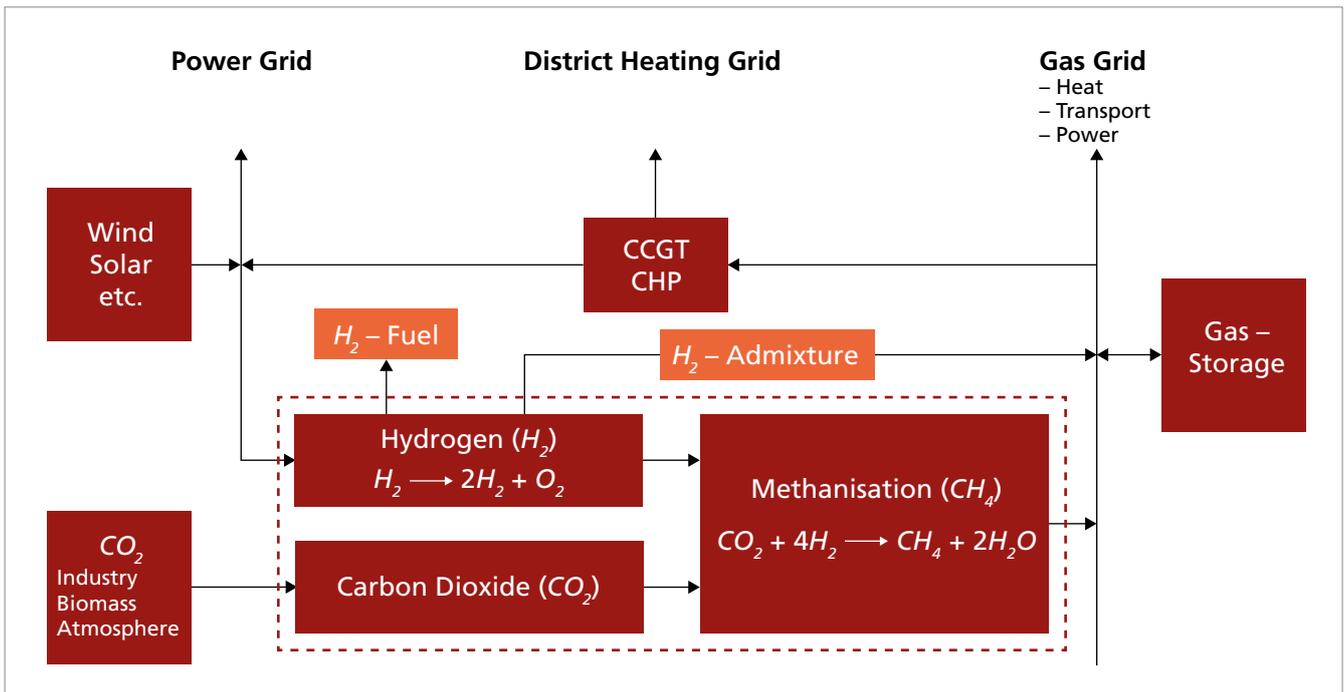


Abb.2: „Power-to-gas-Konzept“ (eigene Darstellung nach Bösch et al. 2012<sup>7</sup>). Das Prinzip „Power-to-Gas“ zeigt die Kopplung der Sektoren auf. CCGT steht für Closed-circle gas turbine und CHP für Combined heat and power. Die Erzeugung von CH<sub>4</sub> bzw. synthetischem Erdgas (SNG: Synthetic Natural Gas) erfolgt durch die katalytische Reaktion von H<sub>2</sub> mit einer Kohlenstoffquelle wie CO oder CO<sub>2</sub>.

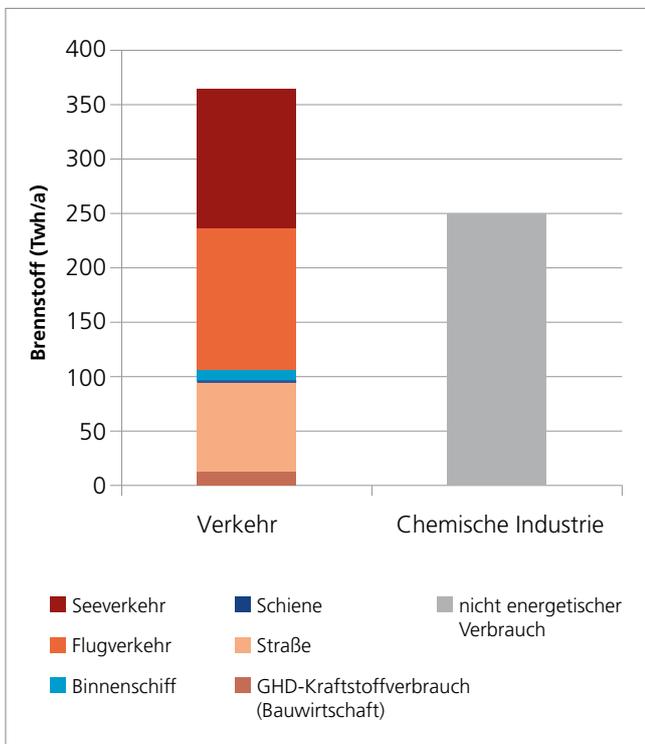


Abb. 3: Deutscher Brennstoffbedarf (eigene Darstellung nach Pfennig et. al 2017<sup>8</sup>)

derlich sind oder Flotten eine geringe Standzeit haben. Im Güterstraßenfernverkehr, in der Seeschifffahrt und im Flugverkehr werden zunächst synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe zum Einsatz kommen. Gleichwohl werden derzeit weltweit große Anstrengungen unternommen, insbesondere den Schwerlast- und Fernverkehr aber auch den Luft- und Seeverkehr unter Nutzung von innovativen und sicheren Wasserstoffverbrennungsmotoren und/oder Brennstoffzellen zu ermöglichen. In der Entwicklung und Bereitstellung derartiger Antriebssysteme ist, bei geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen, ein mittel- und längerfristig hochinteressanter Wirtschaftssektor im Entstehen begriffen.

Voraussetzung für die Nachhaltigkeit aller genannten Technologien ist die treibhausgasneutrale Erzeugung des Wasserstoffs. Beim aktuellen, stark ansteigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von rund 40 Prozent (Stand: 2019) ist dies derzeit noch nicht gegeben<sup>9</sup>. Dementsprechend ist es daher notwendig, die erneuerbaren Energien vor Ort weiter massiv auszubauen. Trotz der hohen und weiterhin stark steigenden Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ist die Versorgungssicherheit im Stromnetz weiterhin sehr hoch, sodass der Ausbau der erneuerbaren Energien im Einklang mit

7 E. Boesche, A. Nicolaas Ponder and H. Thomas: Power-to-Gas: The Legal Framework for a Long-Term Energy Storage technology in Germany. Renewable Energy Law and Policy Review 3/2012: pp. 159–172  
 8 Quelle: „MITTEL- UND LANGFRISTIGE POTENZIALE VON PTL- UND H2-IMPORTEIN AUS INTERNATIONALEN EE-VORZUGSREGIONEN“; Teilbericht, Maximilian Pfennig, Norman Gerhardt, Dr. Carsten Pape, Diana Böttger, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES), 2017  
 9 Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromerzeugung>

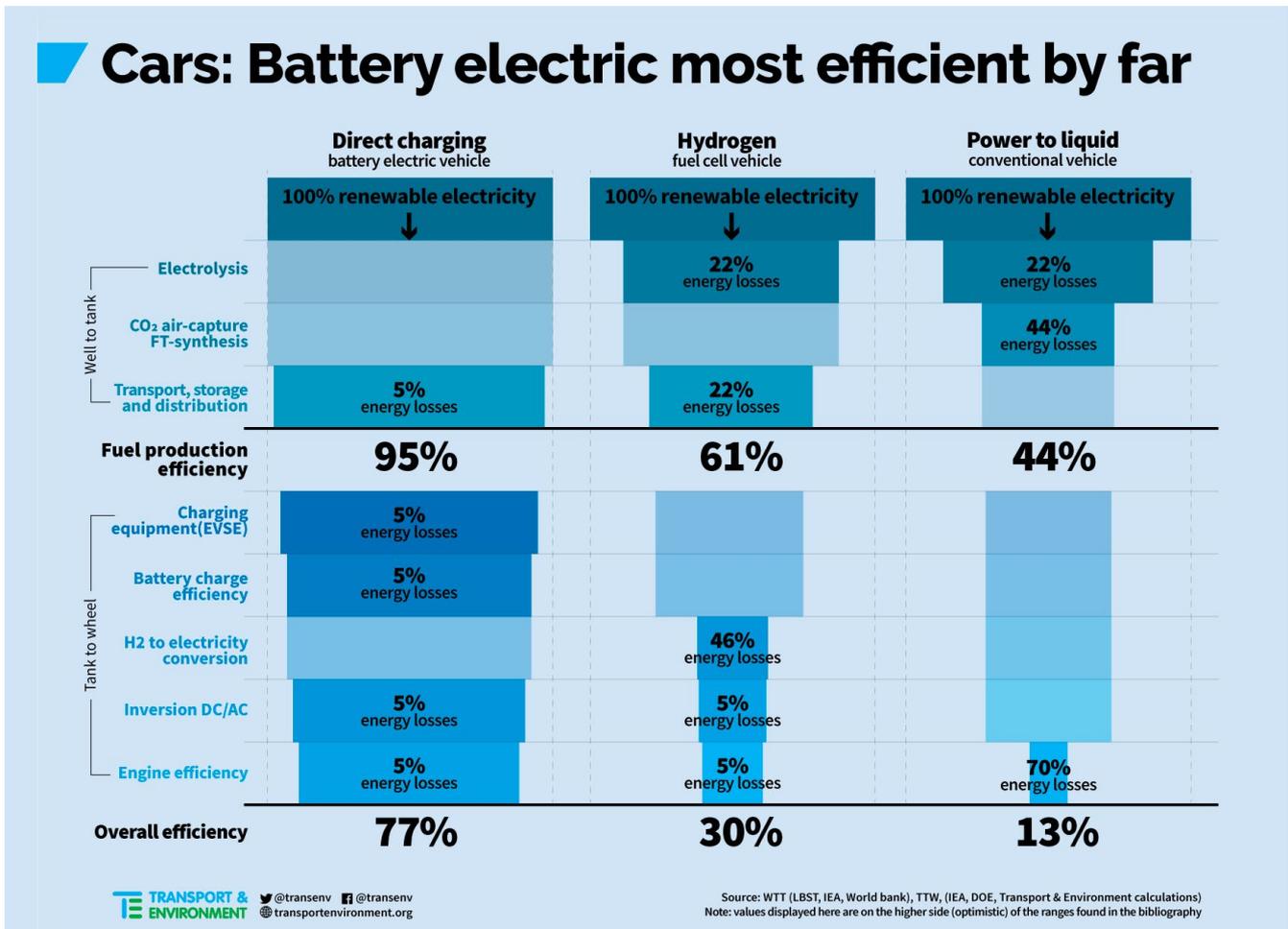


Abb. 4: Effizienzvergleich am Beispiel von PKW-Antrieben

(Quelle: Transport & Environment, transportenvironment.org, WTT [LBST, IEA, Worldbank], TIW [IEA, DOE, transport & environment calculations]). Effizienz ist eines der wichtigsten Gebote der Energiewende. Die Effizienzgrade verschiedener Antriebssysteme unterscheiden sich je nach Technologie und Energieträger deutlich. Der batterieelektrische Antrieb ist für PKW besonders vorteilhaft. Gleichwohl sind alle Optionen für das Gesamtbild relevant. Brennstoffzellenantriebe sind z. B. im Schwerlast- und Schiffsverkehr bzw. synthetische Flüssigkraftstoffe im Luftverkehr vorrangige Dekarbonisierungsoptionen.

dem Netzausbau und der Energiespeicherung unter Zuhilfenahme von Wasserstoff (z. B. Power-to-H<sub>2</sub>, Power-to-Gas, Power-to-Liquid) fortgeführt werden kann.

Aller Voraussicht nach wird Deutschland auf absehbare Zeit einen Teil der mit erneuerbarer Energie hergestellten Energieträger, Wasserstoff eingeschlossen, importieren müssen. So wird beispielsweise in der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung davon ausgegangen, dass lediglich ein kleiner Teil des in Deutschland benötigten Wasserstoffs auch im Land hergestellt werden kann<sup>10</sup>.

Eine kostengünstige Herstellung von Wasserstoff ist besonders in sonnenreichen (Solarenergie) und/oder geringbesiedelten (Wind onshore) Weltgegenden sowie in flachen Küstengewässern (Wind offshore) und Gegenden mit ausgeprägten geothermalen Quellen möglich<sup>11</sup>. Aktuell werden 13,4 Exajoule ( $13,4 \times 10^{18}$  J), d. h. mehr als zwei Drittel des deutschen Energieaufkommens importiert<sup>12</sup>. Für den künftigen Import von Wasserstoff werden jedoch, in höherem Maße als bisher, auch die Länder Südeuropas sowie die Nord- und Ostsee-Anrainerstaaten in Frage kommen. Darüber hinaus ergeben sich Möglichkeiten für dauerhafte Energiewirtschaftsbeziehungen zu den jetzigen Öllieferanten, äquatornahen Ländern Asiens, Afrikas und Mittelamerikas. Insgesamt können somit die

10 Quelle: <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>

11 <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/klimawirksamkeit-elektromobilitaet>

12 Quelle: [https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=34](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=34)

Energieimporte längerfristig auf eine erheblich breitere Basis gestellt werden als heutzutage, sodass sich die Abhängigkeit von einzelnen Regionen verringert. Diese Energieimporte in die EU können für einige Länder verbesserte Möglichkeiten für ihre wirtschaftliche Entwicklung bedeuten. Innenpolitische Probleme, soziale Spannungen oder Demokratiedefizite werden sie jedoch genauso wenig lösen wie der derzeitige Import von Öl und Erdgas.

## Handlungsbedarfe

### Das Paper des Strategic Forum: Warum Wasserstofftechnologie-Ausbau eine EU-Aufgabe ist

Die europäische Industrielandschaft muss sich zunehmend an neue Herausforderungen, bedingt durch Klima-, Umwelt- und gesellschaftlichen Veränderungen, anpassen. Um sie dabei zu unterstützen, haben sich die Europäische Union und auch die deutsche Bundesregierung ambitionierte Energie- und Klimaschutzziele bis 2030 bzw. bis hin zur kompletten Klimaneutralität im Jahr 2050 gesetzt. In diesem Zusammenhang setzt die Bundesregierung auf „grünen“ Wasserstoff, denn dieser wird auch in der Nationalen Wasserstoffstrategie als zentraler Bestandteil der Dekarbonisierung und Treibhausgasneutralität Deutschlands gesehen. Damit die dort formulierten Ziele erreicht werden können und Wasserstoff als neuer Energieträger vollständig etabliert werden kann, sind erhebliche Investitionen in die nationale bzw. europäische Wasserstoffproduktion und -nutzung erforderlich. Neben der Energieversorgung mittels Strom werden nachhaltige synthetische Brenn-, Kraft- und Grundstoffe aus Ökostrom (Power-to-X) überall dort benötigt, wo keine vollständige Elektrifizierung stattfinden kann, z. B. in der Luft- und Schifffahrt oder in der Chemie- und Stahlindustrie.

Für tatsächlich nachhaltige Energieträger ist es entscheidend, dass als Ausgangsprodukt zunächst „grüner“ Wasserstoff aus Wind- und Sonnenenergie hergestellt wird. Die Bundesregierung sieht bis 2030 eine Produktion von grünem Wasserstoff von bis zu 14 TWh und einer benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 20 TWh<sup>13</sup>. Auch für die Kooperationen mit Staaten, aus denen wir grünen Wasserstoff importieren können, sind Investitionen für den Aufbau von Produktionskapazitäten und Lieferketten notwendig.

### Mit einer europäischen Roadmap Wettbewerbsvorteile weiter ausbauen

Um auch die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im Bereich der Wasserstofftechnologien auf dem internationalen Markt gewährleisten zu können, müssen bereits bestehende Wettbewerbsvorteile durch vorhandene Anlagen aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten in Deutschland durch europäische Kooperationen weiter ausgebaut werden, denn die Hebelwirkung von einzelnen Unternehmen oder nationalen Märkten ist zu gering, um im globalen Vergleich effizient zu sein. Ziel sollte es sein, eine europäische Wasserstoffwirtschaft mit einer gemeinsamen Roadmap aufzubauen. Der gemeinsam vereinbarte Fahrplan muss Kompatibilitäten und Wechselwirkungen zwischen Regionen und Interessengruppen berücksichtigen. Ein tragfähiger globaler Markt für nachhaltige synthetische Brenn-, Kraft- und Grundstoffe aus Ökostrom bedarf der Einbindung aller relevanten Akteure national und weltweit in einen Dialog. Es gilt, die Chancen der Technologie zu nutzen und die Umweltauswirkungen so gering wie möglich zu halten. Dies wurde auch im Bericht der Expertengruppe „Strategic Forums for Important Projects of Common European Interest“ erklärt<sup>14</sup>.

### Investitionen gemeinsam schultern – in Europa für Europa

Die europäische Wasserstoffversorgungskette befindet sich noch in der Entwicklung. Sie ist fragmentiert und besteht hauptsächlich aus relativ kleinen Organisationen. Was die Technologien anbelangt, so sind europäische und deutsche Unternehmen und Forschungsorganisationen heute jedoch bei vielen der für Brennstoffzellen- und Wasserstoffversorgungsketten erforderlichen Technologien weltweit führend. Siemens ist auf dem Gebiet der PEM-Elektrolyse eine feste Größe und die sunfire GmbH aus Dresden weltweit Vorreiter bei der SOFC-Technologie. Europäische Champions auf dem Elektrolysemarkt sind McPhy aus Frankreich und NEL aus Norwegen.

Um einen gemeinsamen Wasserstofffahrplan umzusetzen, die damit verbundene Skalierung der vorgestellten Technologien zu erreichen sowie den Wissensvorsprung zu erhalten, sind Investitionen sowohl in Industrie als auch in FuE notwendig. Mit diesen Maßnahmen lassen sich neue Anwendungsfelder von Wasserstoff erschließen. Die Startinvestitionen werden beträchtlich sein und die Amortisationsdauer lang, verbunden mit einem hohen technischen, finanziellen und politischen Risiko. Daher wird eine öffentliche Unterstützung notwendig sein, um diese Finanzierungslücken für große Innovationsprojekte zu schließen und die Wasserstoffwirtschaft dabei zu unterstützen, stabile Versorgungsketten aufbauen zu können.

<sup>13</sup> Die Nationale Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020

<sup>14</sup> Diese Expertengruppe wurde durch Beschluss der Europäischen Kommission am 30.01.2018 eingesetzt, um eine gemeinsame Vision der Europäischen Union zu den wichtigsten Wertschöpfungsketten für Europa zu entwickeln und Vereinbarungen zur Förderung neuer gemeinsamer Investitionen in diesen Wertschöpfungsketten zu erleichtern. Das Strategieforum besteht aus 44 Mitgliedern, die die Mitgliedstaaten, die Industrie und die Forschungsgemeinschaft vertreten.

Die Bundesregierung hat bereits erhebliche Fördermittel bereitgestellt und wird dies auch in den kommenden Jahren fortsetzen, z. B. im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) oder den „Reallaboren der Energiewende“. Diese Programme sollen den Technologie- und Innovationstransfer von der Forschung in die Anwendung auch bei Wasserstoff beschleunigen. Weitere 300 Millionen sollen in den nächsten Jahren im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) folgen.

### Europäische Förderinstrumente für europäische Vorhaben von besonderem Interesse

Neben der NWS ist ein „Important Project of Common European Interest“, kurz IPCEI, ein besonderes beihilferechtliches Instrument, das genutzt werden kann, um die Wettbewerbsfähigkeit strategischer Wertschöpfungsketten zu stärken, wenn es um neue Technologien geht. Grundsätzlich dürfen EU-Staaten Innovationen außerhalb von Regionalfördergebieten nur durch Forschungs- und Entwicklungsprojekte fördern. Gibt es aber ein übergeordnetes europäisches Interesse und sind die zu tätigen Investitionen nicht von den Partnern allein zu stemmen, können solche Vorhaben als IPCEI von mehreren EU-Mitgliedstaaten gemeinsam bis zur ersten gewerblichen Nutzung (first industrial deployment) gefördert werden.

Das IPCEI-Instrument kann als Finanzierungsinstrument für Umwelt-, Verkehrs- und Energieprojekte von strategischer europäischer Bedeutung eingesetzt werden. Öffentliche Unterstützung kann nicht nur notwendig sein, um Marktversagen zu überwinden, sondern auch, um deutlich höhere Beträge an privaten Investitionen freizusetzen oder zu mobilisieren. Dennoch können alternative oder ergänzende Finanzierungen, die keine staatlichen Beihilfen darstellen, z. B. von der Europäischen Investitionsbank (einschließlich des Europäischen Fonds für strategische Investitionen) oder von zentral verwalteten EU-Programmen (z. B. Horizon Europe, Digital Europe Programme, Connecting Europe Facility, LIFE etc.) zur Verfügung gestellt werden.

Nur durch die staatliche Unterstützung von Forschungs- und Wirtschaftslandschaft haben Deutschland und Europa eine reale Chance mit Hilfe des „grünen“ Wasserstoffs die Vision der Klimaneutralität im Jahr 2050 Realität werden zu lassen.

### Fazit und Ausblick

Zu Beginn dieses Artikels wurde die Vision einer Welt im Jahr 2050 skizziert – ein 2050, in dem die Dekarbonisierung Europas erfolgreich war und die Wasserstofftechnologie einen entscheidenden Beitrag zu diesem Erfolg beigetragen hat. Zum Ende des Artikels soll nun diese Herausforderung aus der Perspektive des Jahres 2020 betrachtet werden. Ist ein solches

Szenario möglich? Ja, das ist es. Die meisten wissenschaftlich-technischen Herausforderungen sind grundlegend gelöst; die notwendigen Technologien, wie oben beschrieben, sind in der Regel im Demonstrationsmaßstab vorhanden.

Welche Herausforderungen gilt es nun zu betrachten? Eine grundlegende Aufgabe hinsichtlich der Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft, wie auch bei der Energiewende insgesamt, besteht darin, nicht nur neue technische Lösungen zu finden, sondern auch den Prozess der Lösungsfindung anders als bislang zu gestalten. Viele der Fragen, die typischerweise an neue Technologien gestellt werden, sind unter derart radikal veränderten Rahmenbedingungen vielleicht nicht mehr zielführend. Die Beantwortung der bislang gestellten Fragen wirft oftmals weitere, nicht eindeutig zu lösende Fragestellungen auf und bringen den Diskurs nicht voran. Ein dekarbonisierter Energiesektor ist ein weitaus komplizierteres und stärker vernetztes System als es der Energiesektor des letzten Jahrhunderts war. Eine typische Frage im bisherigen Weltbild würde nun lauten: Ist die Wasserstofftechnologie *die* Lösung für die Energiewende? Eine weitere Frage wäre: Ist Wasserstoff für eine spezielle Anwendung *die* Lösung?

### Neue Herausforderungen erfordern eine neue Herangehensweise. Welcher Bus soll angeschafft werden?

In der Vergangenheit waren das zielführende Fragen. Es gab in der Regel für bestimmte Anwendungen genau eine technische Lösung. Fahrzeuge fahren mit Verbrennungsmotoren, Stahl stellt man aus Erz und Koks her usw. – ein hocheffizienter Ansatz, bei dem man Fortschritt über genau die Fragestellung „Ist die neue (eine) Lösung besser als die (eine) bislang etablierte Lösung“ verifizieren konnte. Sicher ist auch dieses Bild stark vereinfacht dargestellt. Eine dekarbonisierte Energiewirtschaft und eine dekarbonisierte Wirtschaft insgesamt werden jedoch durch die erheblich stärkere Vernetzung der Akteure und Energieträger viel häufiger den Fall hervorbringen, dass die Koexistenz verschiedener Lösungen für ein und dieselbe Anwendung das Optimum für das Gesamtsystem darstellt. Dies wird am Beispiel des Busbetriebs einer Stadt deutlich. Dass für einen CO<sub>2</sub>-neutralen Busverkehr elektrische Busse eingesetzt werden sollen, gilt als gesetzt. Batterieelektrische Busse sind auf dem Markt und etablieren sich zunehmend. Auch Brennstoffzellenbusse sind in der Erprobung. Nun stellt sich klassischerweise die Frage nach der besseren Lösung. Ist der wasserstoffbetriebene Bus effizienter als der batterieelektrische Bus? Technische Antwort: Nein. Klassische Schlussfolgerung: Der batterieelektrische Bus ist die Lösung für das Problem der zu treffenden Busauswahl.

In der dekarbonisierten Welt werden sich jedoch absehbar beide Varianten durchsetzen müssen. Denn ob der Betrieb eines Busses für den Verkehrsbetrieb mit Batterie oder Brennstoffzelle die beste Lösung ist, hängt nicht nur vom Wirkungsgrad ab.

Faktoren wie die Größe der betreffenden Stadt und die damit verbundenen Streckenlängen im täglichen Fahrbetrieb sind ebenfalls zu berücksichtigen. Betreibt der Verkehrsbetrieb auch Straßenbahnen? Gibt es einen kommunalen Energieerzeuger? Welche Art Energie gewinnt dieser und auf welche Weise? Wie ist die Stadt an ein überregionales Gas- und Stromnetz angebunden? Gibt es in der Region häufig Überschüsse an bestimmten erneuerbaren Energien? Diese ebenfalls relevanten Fragestellungen verdeutlichen, dass bei der Suche nach Lösungen viel mehr ein systemisches Denken erforderlich wird und die Resultate wesentlich vielfältiger sein werden als früher.

Genau diese bislang gestellten Fragen stellen aktuell eine Hürde bei der Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft dar. Ist die Wasserstofftechnologie *die* Lösung für Anwendung X? Ist sie effizienter als Technology Y? Die Antworten der Fachexpertinnen und Fachexperten sind dann in der Regel völlig zu Recht „Nein“ oder „Ja, aber...“. Folglich wird das Potenzial der Wasserstofftechnologie im Diskurs oft zu kritisch dargestellt oder unterschätzt.

#### Querschnittstechnologie mit enormem Potenzial

Die Wasserstofftechnologie hat in jedem Fall enormes Potenzial. Der große Vorteil, der sie zu der einen zentralen Querschnittstechnologie der Dekarbonisierung des Energiesektors erheben kann, ist ihre enorme Vielseitigkeit. Technologisch ist Wasserstoff als Energieträger direkt anschlussfähig an elektrischen Strom, Gas, synthetische Kraftstoffe, Wärme und energieintensive Industriesektoren, wie Stahl oder Chemie und vieles mehr. Wasserstoff und Produkte daraus sind speicherbar; es können vorhandene Infrastrukturen wie Gasnetze, geologische Speicher und Transportkapazitäten potenziell genutzt werden. Wasserstoff eröffnet Transformationspfade in die dekarbonisierte Welt. Sogar geopolitisch bietet Wasserstoff Perspektiven, neue Partnerschaften aufzubauen und bestehende Partnerschaften zu transformieren – weltweit viel flexibler als dies mit Stromtrassen möglich ist.

Wasserstofftechnologien sind in wenigen Bereichen die zentrale Lösung für die Dekarbonisierung, z. B. in Form von synthetischen Kraftstoffen für den Flugverkehr. Insbesondere liegt das Potenzial jedoch darin, andere Technologien zu ergänzen, um deren Nachteile ausgleichen. Wasserstofftechnologien können als Mittler fungieren, um Sektoren zu koppeln und die Versorgungssicherheit des Gesamtsystems zu erhöhen.

#### Das Stärke-Schwäche-Paradox

Paradoxerweise stellt diese enorme Vielseitigkeit gleichzeitig auch die größte Schwäche der Wasserstofftechnologie dar. Selten bietet sie *die* eine plakative Lösung für eine öffentlichkeits-

wirksame Anwendung. Wasserstoff taucht im Gesamtsystem in verschiedensten Formen, an verschiedensten Stellen in verschiedensten Rollen auf – oft ohne dass er als Wasserstoff erkennbar ist. Teils gibt es die Rollen, die die Wasserstofftechnologien einnehmen, bisher gar nicht. Ein Gasnetz als Energiespeicher? Wasserstoff als Brücke von überschüssiger elektrischer Energie zu Rohstoffen für die Industrie? Spannende Möglichkeiten, die aber weder in der bestehenden Regulierung noch in den etablierten Geschäftsmodellen eine Rolle spielen. Auch die Tatsache, dass der Nutzen der Wasserstofftechnologie oft dem System zu Gute kommt, nicht aber zwingend dem einzelnen Akteur, ist bei Entscheidungsprozessen für Entwicklungs- und Investitionsprojekte hinderlich. Viele Lösungen liegen im Demonstrationsmaßstab, werden aber aus Kostengründen oder einer fehlenden systemischen Betrachtung nicht skaliert und Geschäftsmodelle mithin nicht weiterentwickelt. Ohne Hochskalierung bleibt die gewünschte Kostenreduzierung aus.

Das Potenzial von Wasserstoff wirklich zu nutzen, ist eine schwere Aufgabe. Systemische Ansätze zu verfolgen ist aufwendig und begünstigt destruktive Debatten. Zudem sind für eine tatsächliche Dekarbonisierung die möglichen Transformationspfade sehr wertvoll, müssen aber auch mit ehrgeizigen Zielen hin zur CO<sub>2</sub>-Neutralität beschriftet werden, damit Wasserstoff tatsächlich zu einer „grünen“ Technologie wird.

Insgesamt zeigt sich, dass, wie oben beschrieben, der Hochlauf von Wasserstofftechnologien eher ein wirtschaftliches Problem ist. Durch Forschung und Entwicklung sind auch in Zukunft große Fortschritte zu erwarten<sup>15</sup>; fundamentale technische Hürden gibt es aber auch aus heutiger Sicht nicht. Somit besteht ein wichtiger nächster Umsetzungsschritt darin, die in kleinerem Maßstab bereits erfolgreich erprobten Technologien auch im Rahmen von Großprojekten einzusetzen, um die bisher erkannten Vorteile auch für breitere Anwendungen und verschiedene Nutzgruppen (z. B. Industrie, Endanwender/innen) konkret aufzuzeigen.

#### Wasserstoff als politische Aufgabe für Deutschland und Europa

Im Jahr 2020 scheint die systemische Bedeutung von Wasserstoff endgültig auch auf der politischen Agenda angekommen zu sein. Der European Green Deal sowie das erwartete IPCC Hydrogen verbunden mit der Nationalen Wasserstoffstrategie in Deutschland und den zahlreichen Strategieprozessen auf Ebene der Bundesländer weisen in diese Richtung. Neben Demonstrationsprojekten, FuE-Förderung und dem Aufbau von industriellen Produktionskapazitäten wird in Deutschland mit dem Entfallen der EEG-Umlage für Elektrolyseure die zentrale Frage der Regulatorik erstmals angegangen. Hier sind weitere

15 Quelle: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=34](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=34)

Schritte erforderlich, wie eine stärkere Entlastung beim Strompreis und verpflichtende Beimischungsregeln für Wasserstoff im Gasnetz sowie für synthetische Kraftstoffe. Das Steuerelement der CO<sub>2</sub>-Bepreisung sollte so genutzt werden, dass es die benötigte Lenkungswirkung auch erzielt. Folglich ist mit den Finanzierungszusagen ein erster Schritt getan; weitere gesetzgeberische Maßnahmen sollten den beabsichtigten Markthochlauf in einem nächsten Schritt ermöglichen.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht kann Deutschland mit der Entwicklung eines funktionierenden Heimatmarktes verbunden mit der hiesigen Kompetenz im Maschinen- und Anlagenbau neue Märkte schaffen und erschließen. Elektrolyseure, Brennstoffzellen, wasserstofftolerante Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Material- und Produktentwicklung für Was-

serstofftransport und -logistik sowie die Systemintegration von Komponenten werden einen Nachfrageboom erleben. Die Voraussetzungen sind gut, um regulatorische Handlungsbeurteilung, klimapolitischen Handlungsdruck und unternehmerische Handlungskompetenz für den Erfolg der nächsten Phase der Energiewende zu bündeln.

Hat Wasserstoff das Potenzial, bei der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft eine zentrale Querschnittstechnologie im Zusammenspiel mit einer Vielfalt technischer Lösungen zu werden und sogar die Brücke zur Dekarbonisierung der Gesamtwirtschaft zu schlagen? Ja. Es zeigt sich einmal mehr: Wer in komplizierten Gesamtsystemen nach einfachen Antworten sucht, muss sehr komplexe Fragen stellen.

## **Impressum**

### **Herausgeber**

*Prof. Dr. Volker Wittpahl*

*Institut für Innovation und  
Technik (iit) in der VDI/VDE-IT*

*Steinplatz 1  
10623 Berlin  
www.iit-berlin.de*

### **Autorinnen und Autoren**

*Dr. Eike-Christian Spitzner*

*Dr. Eyk Bösche*

*Paradiso Coskina*

*Dr. Sophie Cordeiro*

*Dr. Janine Kleemann*

### **Kontakt**

*Dr. Eike-Christian Spitzner*

*Tel.: +49 (0)30 - 31 00 78-428*

*E-Mail: spitzner@iit-berlin.de*

### **iit perspektive Nr. 52**

*Berlin, Juli 2020*

*Layout: Poli Quintana  
Bildnachweis:  
muchmania/AdobeStock  
ISBN: 978-3-89750-221-5*

