

POSITIONSPAPIER DES WASSERSTOFFBÜNDNIS BAYERN ZUR BAYERISCHEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

MAI 2020

Erarbeitet von:



Impressum:

Herausgeber: Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), Fürther Str. 250, 90409 Nürnberg
Veröffentlicht: Mai 2020 (1. Auflage)
Koordination: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Philipp Runge, Fabian Pfaffenberger
Kontakt: Philipp Runge (strategie@h2.bayern)
Zitation: Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B): Positionspapier des Wasserstoffbündnis Bayern zur bayerischen Wasserstoffwirtschaft. Nürnberg, 2020.

Initiiert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

VORWORT

Das vorliegende Positionspapier des Wasserstoffbündnis Bayern zur bayerischen Wasserstoffwirtschaft ist ein erster Schritt auf dem Weg der Erarbeitung einer bayerischen Wasserstoffstrategie. Die Ausarbeitung des Positionspapiers geschah in einem umfangreichen, vom Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) koordinierten Konsultationsprozess mit den im Wasserstoffbündnis Bayern vertretenen Unternehmen, Verbänden und Institutionen.

Dafür verfasste das H2.B ein erstes Stichpunkt Papier, welches im Oktober 2019 mit der Bitte um Kommentierung an die Partner des Wasserstoffbündnisses verschickt wurde. Ergänzungen und weitere nicht kontroverse Kommentierungen wurden direkt in das vorliegende Positionspapier übernommen. Kommentare, die nach der Einschätzung des H2.B nicht unmittelbar konsensfähig waren, wurden mit den Bündnispartnern auf Netzwerktreffen diskutiert. Darüber hinaus hatten weitere assoziierte Unternehmen, Verbände und Privatpersonen auf einem Stakeholder-Dialog die Möglichkeit, Thesen aus den Netzwerktreffen zu diskutieren und sich konstruktiv einzubringen.

Das vorliegende Dokument spiegelt die Sichtweise mehrerer oder aller Unternehmen, Verbände und Institutionen des Wasserstoffbündnis Bayern wider. Die beteiligten Unternehmen sind auf S. 40 nochmals explizit aufgeführt. Insgesamt lässt sich konstatieren, dass der Dialogprozess mit den Partnern sehr häufig zu konsensfähigen Kernthesen führte. Im Speziellen trifft dies auf die Forderung sämtlicher Partner zu, schnell wichtige Weichen für den Hochlauf einer bayerischen Wasserstoffwirtschaft zu stellen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	Kohlendioxidabscheidung und -nutzung (Carbon Capture and Utilisation)
CGH ₂	Verdichteter Wasserstoff (Compressed Gas Hydrogen)
CO ₂	Kohlendioxid
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FCEV	Wasserstoffelektrisches Fahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
H ₂	Wasserstoff
LH ₂	Verflüssigter Wasserstoff (Liquified Hydrogen)
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carrier)
MENA	Mittlerer Osten und Nordafrika (Middle East and North Africa)
OEM	Erstausrüster (Original Equipment Manufacturer)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PV	Photovoltaik
SMR	Dampfreformierung (Steam Methane Reforming)
THG	Treibhausgasemissionen

INHALT

1. Zusammenfassung und Kernbotschaften aus dem Strategieprozess zur bayerischen Wasserstoffwirtschaft .	5
2. Wasserstoff als Schlüssel für eine nachhaltige Energieversorgung und die Defossilisierung der Wirtschaft ...	7
2.1 Deutschlands Rolle in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft.....	12
2.2 Wasserstoff als Energieträger der Zukunft für Bayern.....	15
3. Chancen und Hemmnisse einer bayerischen Wasserstoffwirtschaft	16
3.1 Stärken	17
3.2 Schwächen	17
3.3 Chancen.....	18
3.4 Risiken	19
4. Handlungsfelder einer bayerischen Wasserstoffstrategie	20
4.1 Technologische Handlungsfelder	20
4.1.1 H ₂ -Erzeugung	20
4.1.2 H ₂ -Logistik.....	22
4.1.3 H ₂ -Nutzung.....	24
4.1.4 H ₂ -Skalierung.....	26
4.2 Verständnis gesellschaftlicher Anliegen mit Blick auf Sicherheit und Umweltauswirkungen	27
4.3 Aufbau von strategischen Partnerschaften	28
4.3.1 Erzeuger, Logistiker und Verbraucher koordinieren.....	28
4.3.2 Nationale, internationale Partnerschaften aufbauen.....	28
4.4 Energiepolitische Rahmenbedingungen.....	29
4.5 Investitionen und Finanzierung	30
5. Ziele und Ambitionen für Bayern: Warum? Wohin? Wie?	31
6. Governance, politische Forderungen, konkrete Maßnahmen und Roadmap.....	33
6.1 Fahrplan für die Skalierung der Wasserstoffwirtschaft.....	33
6.2 Politische Forderungen an den Bund und die Europäische Union	34
6.3 Handlungspotenzial für den Freistaat Bayern und Förderung bayerischer Unternehmen	36
6.4 Roadmap für die Skalierung der Wasserstoffwirtschaft	37
7. Quellen	39
8. Partner im Wasserstoffbündnis Bayern	40

1. ZUSAMMENFASSUNG UND KERNBOTSCHAFTEN AUS DEM STRATEGIEPROZESS ZUR BAYERISCHEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Die nationalen und internationalen Klimaschutzziele können nicht ohne den Einsatz von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff erreicht werden. Durch seine vielfältige Anwendbarkeit ist direkt oder indirekt genutzter Wasserstoff ein notwendiger Baustein zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in fast allen Sektoren der deutschen und bayerischen Wirtschaft. Wasserstofftechnologien werden global immer weiter an Bedeutung gewinnen und so neue Absatzmärkte für bayerische Hightech-Produkte schaffen. Dadurch entstehen Wertschöpfungspotenziale und es werden zukunftsfähige Arbeitsplätze gesichert und neue geschaffen. Die zukünftige Wasserstoffwirtschaft bietet der starken bayerischen Fahrzeug- und Fahrzeugzulieferindustrie die Möglichkeit, neue und zukunftsweisende Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle aufzubauen und proaktiv die Transformation der entsprechenden Industrien mitzugestalten. Bayern kann mit seiner hervorragenden Forschungslandschaft und seiner innovativen Industrie zur Modellregion für wasserstoffbezogene Technologien, Prozesse, Produkte und Dienstleistungen werden.

Der Hochlauf der bayerischen Wasserstoffwirtschaft muss durch eine Roadmap koordiniert werden. Die technologischen Handlungsfelder Erzeugung, Logistik, Nutzung von Wasserstoff sowie die industrielle Produktion von Schlüsselkomponenten (Skalierung) einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft müssen simultan und schnellstmöglich entwickelt werden. Ein Rollout der gesamten Wertschöpfungskette vor Ort in Bayern, flankiert durch die Schaffung von Investitionssicherheit durch politische Rahmenbedingungen, ist Voraussetzung für eine exzellente Wettbewerbsposition bayerischer Unternehmen in der Zukunft. Eine enge Kooperation mit anderen Bundesländern, dem Bund sowie weiteren europäischen und globalen Partnern ist von zentraler Bedeutung.

Zentrale Elemente eines schnellen Hochlaufs der bayerischen Wasserstoffwirtschaft sind:

Demonstrationsprojekte und Markteinführungsprogramme für Wasserstofftechnologien für mobile und stationäre Anwendungen, je nach Technologie-Reifegrad. Dabei sollten gezielt alle Glieder der Wertschöpfungskette aufgebaut werden, um den Rollout schnellstmöglich voranzubringen. Besonders attraktiv sind einerseits die schrittweise Integration grünen Wasserstoffs in bestehende Produktionsprozesse industrieller Wasserstoffverbraucher, andererseits auch kurzfristige Projekte im Bereich des emissionsfreien Verkehrs, wie etwa Wasserstofffahrzeuge im ÖPNV oder für Logistikdienstleistungen.

Dazu sind die folgenden Punkte von großer Bedeutung:

- **Schaffung von verlässlichen und langfristigen Rahmenbedingungen für Hersteller und Käufer zur schnellstmöglichen Skalierung von Nullemissionsfahrzeugen in allen relevanten Bereichen** (große PKW, LKW, Busse, Züge, zukünftig auch Agrarmaschinen, Baumaschinen, Schiffsverkehr etc.) sowie auch bei stationären Anwendungen.
- **Öffentliche Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen** / ambitioniertere Quoten als von der *Clean Vehicle Directive* vorgeschrieben für öffentliche Ausschreibungen.
- **Beschleunigter Aufbau der Tankstelleninfrastruktur an strategisch wichtigen Punkten mit 350 und 700 bar-Technologie.** Betrieb hochfrequentierter Wasserstofftankstellen an Orten mit Mehrfachnutzung (zum Beispiel PKW, LKW, Bus und Bahn).
- **Anrechenbarkeit von grünem Wasserstoff auf die THG-Minderungsquoten von Industrieunternehmen**

Enges Zusammenspiel von Industrie und Forschung als „Enabler“ für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft:

- **Aufbau eines koordinierten Netzwerkes** zwischen Industrie und Hochschulen, um einen bestmöglichen Austausch zwischen den Partnern zu erreichen.

- **Gemeinsame Nutzung von Forschungs- und Entwicklungsinfrastrukturen**, Identifikation attraktiver Technologiepfade und Anwendungen.
- **Identifikation internationaler Vorzugsregionen und Erschließung von Partnerschaften** (auch international). Dabei Einbindung der bayerischen Repräsentanzen als natürliche erste Ansprechpartner.
- **Förderung von Wasserstofflogistiktechnologien, die mit der heutigen Infrastruktur**, wie bestehenden Leitungen für Erdgas oder Transport- und Speichertechnologien für Erdöl und dessen flüssigen Folgeprodukten, **kompatibel sind**.
- Perspektivisch **Planung und Aufbau eines Leitungssystems für Wasserstoff in Deutschland und Europa (Backbones)** zunächst durch Umstellung bestehender Fernleitungsnetzen für Erdgas.
- **Vorausschauende Lebenszyklusbetrachtung** von Wasserstofftechnologien sowie **vorausschauende Betrachtung von Wertschöpfungspotenzialen in sektorgekoppelten Energiesystemen**, zum Beispiel für Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder für stationäre Brennstoffzellen.
- Frühzeitiges Analysieren und **Adressieren von Nachhaltigkeitsaspekten**, Entwicklung von Kommunikationsstrategien.

Errichtung eines **Entwicklungszentrums zur Beschleunigung der industriellen Implementierung innovativer Wasserstofftechnologien** in Bayern („Beschleunigungstechnikum Wasserstoff“): Hier soll das bestmögliche Zusammenspiel von Ausbildung, Entwicklung, Skalierung, industrieller Fertigung und Testung realisiert werden, um Entwicklungszeiten drastisch zu reduzieren. Zudem Einrichtung eines **Test-, Zertifizierungs- und Standardisierungszentrums**, um das bestmögliche Zusammenspiel von Entwicklung, Skalierung, industrieller Fertigung und Testung zu erreichen.

Zusätzliche Forschungskapazitäten sowie Ausbildungs- und Studienplätze im Bereich der Wasserstofftechnologien und -wirtschaft müssen geschaffen werden, um schnellstmöglich exzellente Fachkräfte auszubilden.

Eine Anpassung der Rahmenbedingungen ist dringend notwendig. Hier ist insbesondere, aber nicht nur, die Politik auf nationaler und EU-Ebene gefordert:

Zügige Umsetzung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED II). Verlässliche, weltweit handelbare Zertifikate für Wasserstoff sind die Voraussetzung für eine Anrechnung von emissionsfreiem oder -mindernden Wasserstoff auf THG-Minderungsquoten. Höhere Anteile an Erneuerbaren Energien im Rahmen der anstehenden Umsetzung der *Renewable Energy Directive II (RED II)*, die in ihrer Ambition mit den Flottenzielen für die Fahrzeughersteller vergleichbar sind, müssen angestrebt werden.

Anpassung des Steuer- und Abgabensystems im Strombereich, die den Anforderungen der Sektorkopplung gerecht wird. Insbesondere eine Absenkung der Stromsteuer auf das europarechtlich zulässige Mindestniveau ist anzustreben. Perspektivisch ist eine sektorenübergreifende CO₂-Bepreisung auf europäischer Ebene sinnvoll. Zusätzliche Wettbewerbsnachteile für die davon bereits erfassten Industrien sind, möglichst unter Beibehaltung der Anreizwirkung, auszuschließen. Eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen kann durch die Einführung von Experimentierklauseln im Rahmen von (auch großskaligen) Demonstrationsprojekten vorbereitet werden.

Behandlung von wasserstoffbasierter Mobilität und Batteriemobilität als gleichrangige Technologiepfade für teils unterschiedliche Anwendungsprofile (siehe Abbildung 1).

Beschleunigung von Zulassungsverfahren für Wasserstoffanlagen (zum Beispiel im Kontext der Installation von Tankstellen und Elektrolyseuren).

2. WASSERSTOFF ALS SCHLÜSSEL FÜR EINE NACHHALTIGE ENERGIEVERSORGUNG UND DIE DEFOSSILISIERUNG DER WIRTSCHAFT

Zur Erreichung der im Pariser Klimaabkommen formulierten Klimaschutzziele müssen die globalen Volkswirtschaften ihren Treibhausgasausstoß erheblich senken. Dabei ist Wasserstoff aufgrund seiner vielfältigen Anwendbarkeit ein unverzichtbarer Baustein und bietet attraktive Möglichkeiten für den Einsatz in verschiedenen Sektoren [2–6]. Wasserstoff wird heute weltweit vor allem in industriellen Anwendungen wie der Methanol- und Ammoniakproduktion oder für die Raffinierung von konventionellen Kraftstoffen eingesetzt. Aufgrund der diversen Anwendungsfelder und der Möglichkeit der klimaneutralen Herstellung des Gases wird die Zahl der Anwendungen in Zukunft erheblich ansteigen. Verschiedene Prognosen gehen von einem Verbrauch von über 20.000 TWh_{H2} (600.000.000 t_{H2}) Wasserstoff im Jahr 2050 aus, was einem Sechstel des weltweiten Primärenergiebedarfs gleichkommt [7]. Die Einsatzbereiche reichen dabei von der Wärmebereitstellung, über die klimaneutrale Stahlproduktion bis hin zu verschiedenen Mobilitätsanwendungen sowie zur Energie- und Stromspeicherung.

Infobox 1

„Farbenlehre“ der Wasserstoffproduktion

Die Produktion von Wasserstoff wird häufig in Farbkategorien unterteilt. Die geläufigsten sind „grauer“, „blauer“ und „grüner“ Wasserstoff. Diese Klassifizierung wird auch in dem vorliegenden Positionspapier genutzt.

Als „**grau**“ wird in diesem Dokument Wasserstoff bezeichnet, der durch Dampfreformierung beziehungsweise partielle Oxidation von fossilen Kohlenwasserstoffen (in Deutschland fast ausschließlich Erdgas) gewonnen wird. Dabei werden je nach eingesetztem Brennstoff zwischen zehn und 19 Tonnen klimaschädliches CO₂ pro Tonne H₂ emittiert. Die Produktion von grauem Wasserstoff ist aktuell weltweit für etwa 830 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen (2,4% der globalen anthropogenen Emissionen) verantwortlich [1].

Die Quelle von „**blauem**“ Wasserstoff sind ebenfalls fossile Brennstoffe. Jedoch wird bei der Produktion von blauem Wasserstoff kein oder nur sehr wenig CO₂ in die Atmosphäre abgegeben. Das entstandene CO₂ wird entweder gelagert (carbon capture and storage, CCS), weiterverwendet (carbon capture and utilisation, CCU) oder durch die Anwendung von Pyrolyseverfahren gar nicht erst produziert. Bei der Pyrolyse entsteht fester Kohlenstoff, der eingelagert oder ggf. weiterverarbeitet werden kann. Man spricht in diesem Zusammenhang teilweise auch von „**türkisen**“ Wasserstoff.

„**Grüner**“ Wasserstoff wird entweder mittels Elektrolyse aus Wasser und Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt oder aber durch thermochemische oder biologische Konversionsverfahren aus Biomasse gewonnen. Zwar wird auch bei der H₂-Gewinnung aus Biomasse CO₂ in die Atmosphäre abgegeben, allerdings sind die Stoffkreisläufe wesentlich kürzer als bei Kohle, Öl oder Gas.

Diese „Farbenlehre“ ist eine verbreitete Methode zur Klassifizierung der verschiedenen Wasserstoffproduktionspfade. Die Farbpalette kann dabei fast beliebig erweitert werden. So wird beispielsweise „**roter**“ Wasserstoff analog zu grünem Wasserstoff aus Wasser mittels Elektrolyse gewonnen. Im Gegensatz zu grünem Wasserstoff wird der Elektrolyseur dabei jedoch nicht mit erneuerbarer Energie, sondern mit Kernenergie betrieben.

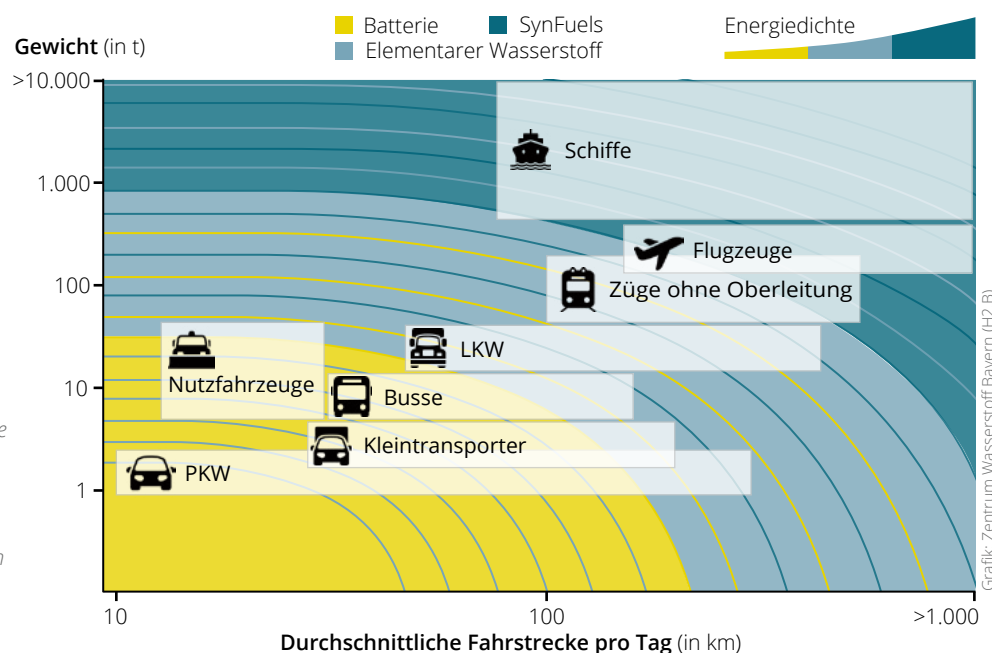
Die Farbenlehre sagt wenig über die tatsächlichen CO₂-Emissionen je produzierter Einheit Wasserstoff aus. Beispielsweise ist auch die Produktion von Wasserstoff mittels Elektrolyse mit erneuerbaren Energien mit CO₂-Emissionen durch den Bau und die Wartung der Anlagen (Windräder, PV-Anlagen, Elektrolyseure, Speichertanks usw.) belastet. Ferner unterscheiden sich die Emissionen von grauem Wasserstoff erheblich, zum Beispiel bedingt durch die eingesetzte Primärenergiequelle (Kohle, Öl, Gas usw.) und die Effizienz der Produktionsanlage. Für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft ist daher ein möglichst akkurates CO₂-basiertes Zertifizierungssystem für treibhausgasreduzierten Wasserstoff zu entwickeln (siehe Abschnitt 4.1.1).

Etwa 99% des weltweit produzierten Wasserstoffs werden aktuell aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle gewonnen [1]. Dabei werden Treibhausgasemissionen frei, die den Klimawandel beschleunigen. In Zukunft müssen andere Optionen wie zum Beispiel die Wasserelektrolyse oder die Konversion von Biomasse genutzt werden, um eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen. Das Potenzial für nachhaltigen Wasserstoff ist dabei global sehr ungleich verteilt. Besonders prädestiniert für die Erzeugung von grünem – also nachhaltigem – Wasserstoff (siehe Infobox 1) sind Gegenden, in denen die Bedingungen für Erneuerbare Energien sehr günstig sind. Diese sind häufig nicht deckungsgleich mit den globalen Energieverbrauchscentren, weshalb zu erwarten ist, dass in Zukunft große Teile des produzierten Wasserstoffs über lange Strecken transportiert werden.

Die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff (ausgedrückt in kg H₂ pro Liter) macht dessen Transport und Speicherung zu einer Herausforderung. Zur Erhöhung der volumetrischen Energiedichte kann Wasserstoff entweder komprimiert (CGH₂, von engl.: compressed gas), stark abgekühlt und dadurch verflüssigt (LH₂, von engl. liquified) oder chemisch an Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gase gebunden werden. Bei der chemischen Bindung an Stickstoff wird Ammoniak gebildet. Bei der chemischen Bindung an das Gas CO₂ wird je nach Verfahren Methan, Dimethylether, Methanol, Benzin oder Diesel produziert. Bei der chemischen Bindung an flüssige Wasserstoffträger, sogenannte Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)-Systeme werden die entsprechenden wasserstoffreichen Trägerflüssigkeiten gebildet, aus denen Wasserstoff bedarfsgerecht wieder freigesetzt werden kann.

Sowohl die Erzeugung als auch der Transport, die Speicherung und die Rückverstromung des Wasserstoffs sind mit technischen Effizienzverlusten verbunden (siehe Infobox 2, S. 10). Eine Debatte um technische Effizienz ist nicht immer zielführend und sollte zumindest um die Dimensionen einer betriebswirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Effizienz erweitert werden. So kann beispielsweise der betriebswirtschaftliche Nutzen eines wasserstoffbetriebenen LKW erheblich höher sein, als der seines batterieelektrischen Pendant, selbst wenn der technische Wirkungsgrad kleiner ist. Beispielsweise ergeben sich Vorteile durch die höhere volumetrische und gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff und wasserstoffbasierten Treibstoffen. Der Energiespeicher beziehungsweise Tank kann bei diesen Fahrzeugen, je nach Energiedichte des Speichermediums (CGH₂: 350 bar, 700 bar, LH₂, chemisch gebunden als Synfuel oder LOHC etc.) zum Teil deutlich kleiner und leichter ausgelegt werden als bei batteriebetriebenen Fahrzeugen der entsprechenden Fahrzeugklasse. Dies bietet vor allem für lange Fahrstrecken und hohe Antriebsleistungen erhebliche Vorteile und reduziert zudem die Anzahl der notwendigen B tankungsvorgänge. Diese dauern darüber hinaus bei Wasserstoff und wasserstoffbasierten Kraftstoffen erheblich kürzer als das Aufladen von batterieelektrischen Fahrzeugen.

Abbildung 1:
Die verschiedenen Antriebstechnologien schließen sich nicht gegenseitig aus. Je nach Gewicht und Fahrstrecke kommen die Vorteile unterschiedlicher Technologien zum Tragen. Grafik in Anlehnung an Hydrogen Council 2017 [8].

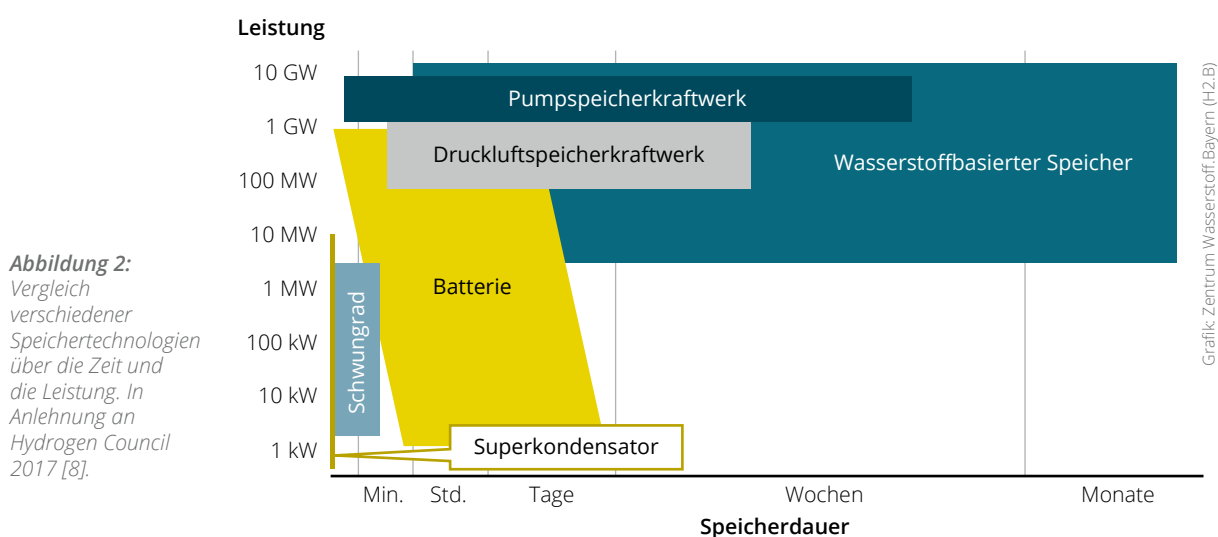


Des Weiteren kann unter Umständen auch der Treibstoff kostengünstiger zur Verfügung gestellt werden, wenn er zu Zeiten oder an Orten produziert wird, an denen die Strompreise beziehungsweise die Stromgestehungskosten besonders niedrig sind. Ein volkswirtschaftlicher Nutzen kann sich zudem beispielsweise durch die Speicherbarkeit des Wasserstoffs ergeben, die ein regionales oder zeitliches Auseinander von Erzeugung und Verbrauch erneuerbarer Energie ausgleichen kann.

Die direkte Elektrifizierung und wasserstoffbasierte Anwendungen sind keine sich einander ausschließenden Pfade („entweder – oder“), sondern in höchstem Maße komplementär („sowohl – als auch“). Für das Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 müssen sich beide Formen der Sektorkopplung in einem integrierten Energiesystem optimal ergänzen. Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger sollten dabei vorwiegend dort zum Einsatz kommen, wo eine direkte Elektrifizierung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.

Am Beispiel der Mobilität bedeutet dies, dass vor allem Fahrzeuge, die im Stadt- und Regionalverkehr eingesetzt werden und/oder ein geringes Gewicht aufweisen, batterieelektrisch angetrieben werden sollten. Bei steigender Antriebsleistung und Fahrstrecke ist es dagegen sinnvoll elementaren Wasserstoff einzusetzen. Dessen volumetrische Energiedichte nimmt mit steigendem Druck zu und erreicht deutliche höhere Werte als die heute üblichen Lithium-Ionen-Batterien. Durch starkes Abkühlen kann der Wasserstoff überdies verflüssigt werden, wodurch eine noch höhere Energiedichte erzielt werden kann, die im mobilen Einsatz größere Reichweiten ermöglicht. Anwendungen, die eine noch höhere Energiedichte benötigen, können durch wasserstoffbasierte synthetische Kraftstoffe (Synfuels, perspektivisch auch LOHC) betrieben werden (siehe Abbildung 1). Dessen ungeachtet werden auf dem Weg zur Klimaneutralität konventionelle Antriebe auf absehbare Zeit noch eine bedeutende Rolle spielen. Nicht zuletzt für den Fahrzeugbestand können synthetische Kraftstoffe eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität spielen.

Die geringere Effizienz von Wasserstofftechnologien wird auch bei Energiespeicheranwendungen immer wieder kritisiert. Zwar ist die technische Effizienz verglichen mit Batterien, Pumpspeicherkraftwerken, Schwungrädern etc. kleiner, dafür bietet sich Wasserstoff für die Speicherung von großen Mengen Energie über langen Zeiträumen besonders an. Zum einen ist das Potenzial z.B. verglichen mit Pumpspeicherkraftwerken nicht begrenzt. Zum anderen findet keine Selbstentladung statt. Darüber hinaus ist Wasserstoff in Tanks oder Kavernen besonders günstig speicherbar. Ähnlich wie bei Anwendungen der Mobilität werden sich zukünftige Speichertechnologien demnach zu Gesamtsystemen ergänzen und nicht ausschließlich miteinander konkurrieren, wie Abbildung 2 verdeutlicht.



Wirkungsgrade verschiedener Antriebsformen

Die Mobilitätswende wird durch eine Debatte um **technische Wirkungsgrade** verschiedener Antriebsformen begleitet. Neben den technischen Wirkungsgraden spielen jedoch auch andere Faktoren eine wichtige Rolle, wenn es um eine Bewertung der Technologien geht. Beispiele dafür sind die **Betankungszeit, die Energiedichte des Kraftstoffs, die Leistungsdichte der Antriebseinheit, die Kosten des Treibstoffs oder die Systemauswirkungen des Mobilitätskonzepts**. Es gibt daher keine optimale Antriebsform, die sich für alle Mobilitätskonzepte gleichermaßen eignet. Batterieelektrische Antriebe bieten sich vor allem für den Betrieb von Fahrzeugen mit eher geringer Reichweite und/oder geringerem Gewicht an. Mit ansteigender Fahrstrecke und höherem Fahrzeuggewicht sind Wasserstofffahrzeuge die günstigste Option, sie erfordern aber eine neue Infrastruktur in Form eines H₂-Tankstellennetzes. Für besonders lange Strecken bei gleichzeitig langanhaltender und hoher Dauerleistung ist die Umwandlung des Wasserstoffs in synthetische Kraftstoffe ökonomisch sinnvoll. Hier kann die bestehende Kraftstofflogistik mit lediglich geringen Modifikationen genutzt werden. **Die Grenzen zwischen den verschiedenen Mobilitätskonzepten sind fließend** und global betrachtet auch stark standortabhängig. Es sollte daher für jede Anwendung und Region eine individuelle Abwägung getroffen werden.

Häufig werden fälschlicherweise nur die technischen Wirkungsgrade diskutiert, die hier nochmal für drei sehr breit diskutierte Mobilitätskonzepte dargestellt werden. Dabei sind die angegebenen Korridore zum Teil sehr breit, was durch den Einsatz verschiedener Technologien begründet ist:

Batterieelektrische Mobilität

Der Wirkungsgrad batterieelektrischer Mobilität ist **sehr hoch**. Die größten Verluste treten beim Energietransport durch Übertragungs- und Verteilnetze und beim Laden der Fahrzeuge auf. Die Effizienz der kompletten Kette liegt bei **60 – 90 %**.

Wasserstoffbasierte Mobilität mit Brennstoffzelle

Die größten Verluste treten bei der **elektrolytischen Gewinnung** und der **Verstromung des Wasserstoffs** in der Brennstoffzelle auf. Je nach Speicher- und Transportverfahren (kryogen verflüssigt, komprimiert, chemisch gebunden und transportiert in LKW, Zug oder leitungsgelassen etc.) kommt es zu weiteren kleineren oder größeren Effizienzeinbußen. Auch der Energieverbrauch an der Tankstelle variiert je nach eingesetzter Technologie erheblich. Die Gesamteffizienz bei einem wasserstoffbasierten Mobilitätskonzept mit Brennstoffzelle liegt bei **25 – 40 %**.

Synfuelbasierte Mobilität mit Verbrennungsmotor

Die Herstellung von Synfuels ist mit **großem Energieaufwand** verbunden. Neben Wasserstoff muss ein weiteres Edukt, meistens kohlenstoffhaltige Stoffe wie CO₂, gewonnen werden. Weitere Verluste treten bei der Synthese des späteren Kraftstoffs auf. Schließlich wird der Kraftstoff in einem Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor verwertet, dessen Wirkungsgrad erheblich unter dem einer Brennstoffzelle mit Elektromotor liegt. **Transport, Lagerung und Betankungsvorgang sind bei Synfuels dagegen äußerst effizient**. Die Effizienz der gesamten Kette liegt in etwa im Bereich von **5 – 20 %**.

Die aufgeführten Wirkungsgrade beziehen sich ausschließlich auf die resultierende Bewegungsenergie des Fahrzeugs im Verhältnis zur eingesetzten elektrischen Energie. **Weitere Verbräuche des Fahrzeugs werden dabei vernachlässigt**. Einen großen Einfluss kann beispielsweise die **Klimatisierung** (Heizen und Kühlen) der Fahrgastzelle haben. Im Falle von Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor kann dazu in einem erheblichen Ausmaß die Abwärme der Aggregate genutzt werden. Bei der batterieelektrischen Mobilität ist dagegen eine rein elektrische Klimatisierung notwendig, was einen direkten Einfluss auf den Verbrauch und damit die Reichweite des Fahrzeugs hat.

Infobox 3

Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsformen

Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verschiedener Antriebsformen sind vor dem Hintergrund des Klimawandels ein elementarer Bestandteil der Bewertung der unterschiedlichen Technologien. Sowohl bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) als auch bei wasserstoffelektrischen Fahrzeugen (FCEV) sind die THG-Emissionen bei der Herstellung der Fahrzeuge höher als bei vergleichbaren Verbrennern. Bei BEVs ist vor allem die energieintensive Batterieherstellung für einen erheblichen Teil der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung der Fahrzeuge verantwortlich. Insbesondere steigen die THG-Emissionen mit größerer Reichweite deutlich an. Die Werte bei der Herstellung eines FCEV sind demgegenüber geringer. Dennoch sind die THG-Emissionen der Herstellung, aufgrund des verbauten Platins in der Brennstoffzelle und der zur Fertigung der Drucktanks nötigen Kohlestofffasern, höher als bei konventionellen Fahrzeugen. Zukünftige Entwicklungen, wie der vermehrte Einsatz regenerativ erzeugten Stroms bei der Batteriezellfertigung oder die schrittweise Minimierung des Platinanteils der Brennstoffzellen wird diese Lücke jedoch verringern.

Abbildung 3 zeigt die THG-Emissionen verschiedener Antriebformen über die gefahrenen Kilometer. Erkennbar ist, dass sowohl batterie- als auch wasserstoffelektrische PKW aufgrund ihrer Herstellung zunächst einen höheren THG-Fußabdruck aufweisen als der konventionelle Verbrenner. Mit steigender Gesamtfahrleistung steigen die THG-Emissionen aller Fahrzeuge an. Dabei unterscheidet sich die Steigung der Kurven stark in Abhängigkeit vom eingesetzten „Kraftstoff“. Wird von einem mit dem aktuellen deutschen Strommix geladen BEV ausgegangen, so ist die kilometerspezifische Zunahme der THG-Emissionen größer, als wenn der PKW ausschließlich mit Solarstrom geladen wird. Ähnlich verhält es sich bei wasserstoffbetrieblen Konzepten. Wird das FCEV ausschließlich mit grauem Wasserstoff aus Erdgas betankt, liegen die THG-Emissionen nach 200.000 km deutlich über denen eines Fahrzeugs, welches ausschließlich mit grünem Wasserstoff betankt wurde. Dennoch sind die Emissionen sämtlicher alternativen Antriebformen spätestens bei etwa 160.000 km kleiner als die des mit konventionellem Diesel betankten PKW. Daraus ergibt sich, dass bereits heute der Einsatz von alternativen Antriebformen einen positiven Einfluss auf die THG-Emissionen des Mobilitätssektors haben. Dieser positive Einfluss steigt direkt mit dem Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix und dem Einsatz von CO₂-reduzierten Wasserstoff in der Mobilität. Der bereits schon heute positive Effekt von alternativen Antrieben auf die Klimabilanz wird demnach mit der Zeit stetig zunehmen. Daher ist es wichtig bereits jetzt mit dem Aufbau der entsprechender Flotten zu beginnen.

THG-Emissionen (in kg CO₂-eq)

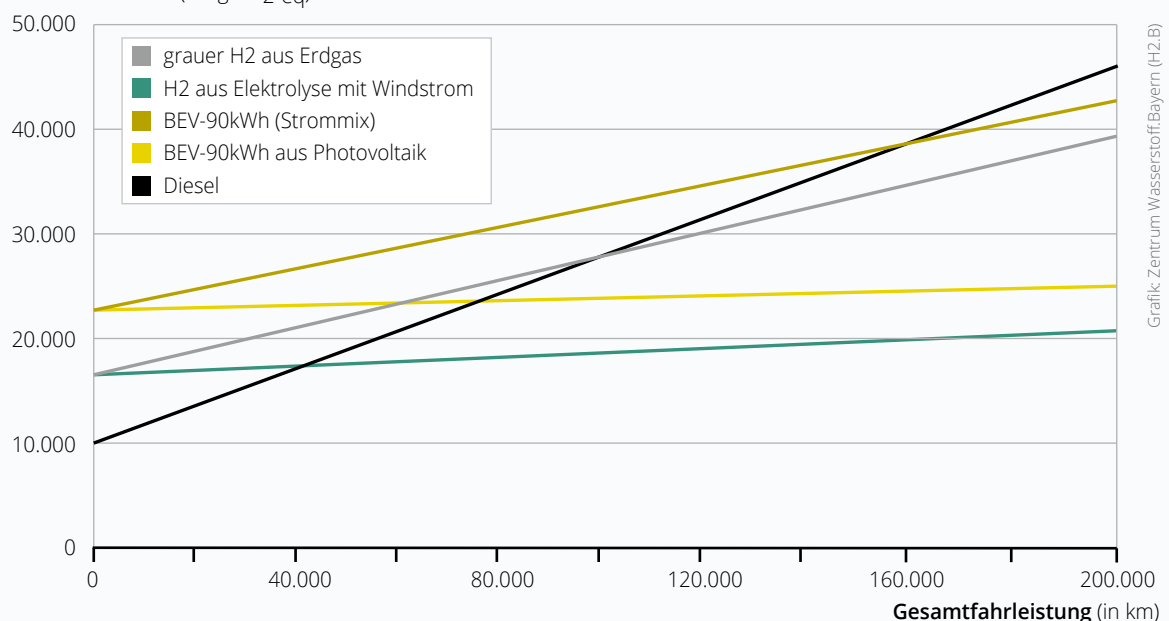


Abbildung 3:

THG-Emissionen verschiedener Mobilitätskonzepte über die Gesamtfahrleistung. In Anlehnung an Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2019 [9].

2.1 DEUTSCHLANDS ROLLE IN EINER ZUKÜNFTIGEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Deutschlandweit werden jährlich etwa 55 TWh_{H₂} (1.650.000 t_{H₂}) Wasserstoff verbraucht [10]. Zu den größten Konsumenten zählen Raffinerien und Chemieparks, die das Gas beispielsweise zur Methanol- oder Ammoniakproduktion einsetzen. Der Wasserstoff wird dazu nahezu ausnahmslos aus Erdgas gewonnen und direkt vor Ort hergestellt. Dieser „graue“ Wasserstoff muss zukünftig CO₂-reduziert, also „blau“ oder „grün“ hergestellt werden (siehe Infobox 1, S. 7).

In Deutschland kommen für eine wirtschaftliche Produktion von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse vor allem die windreichen Küstenregionen im Norden in Frage. Die Gesteungskosten von Strom aus PV-Freiflächenanlagen sind in den letzten Jahren zwar stark zurückgegangen, dennoch gibt es weder die nötigen Kapazitäten, noch lassen die geringen Volllaststunden eine wirtschaftliche Produktion großer Mengen Wasserstoff zu (siehe Infobox 4, S. 14). Dies bedeutet jedoch nicht, dass in Regionen mit geringem EE-Potenzial auf die Wasserstoffproduktion gänzlich verzichtet werden sollte. Zur Erlangung von Technologiekompetenz oder zum Erlebarmachen von Wasserstofftechnologie kann eine lokale Produktion einen entscheidenden Beitrag leisten. Dies wird in späteren Abschnitten noch ausgeführt (siehe Abschnitt 4.1.1).

Trotz der hervorragenden Bedingungen für Windenergie im Norden wird Deutschland – auch vor dem Hintergrund des Ausstiegs aus der Kernkraft und der Kohleverstromung – seinen Energiebedarf nicht vollständig aus heimischer Erzeugung regenerativ decken können. Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch lag 2018 bei 16,6 %. Im Stromsektor konnten knapp 37,8 % durch Erneuerbare Energien gedeckt werden [11]. Zukünftig wird ein großer Teil der Minderung der Treibhausgasemissionen direkt oder indirekt über den Stromsektor stattfinden (siehe Abbildung 4). Dazu müssen erhebliche Kapazitäten erneuerbarer Energien ausgebaut werden.

Ein Ausbau sämtlicher notwendiger Kapazitäten in Deutschland dürfte politisch, gesellschaftlich und auch hinsichtlich der verfügbaren Flächen äußerst schwer umsetzbar sein. Auch die energiepolitischen Rahmenbedingungen und die daraus resultierenden hohen Strompreise durch staatlich induzierte Preisbestandteile (Abgaben, Umlagen und Steuern) stellen ein Hemmnis für eine großskalige Wasserstoffproduktion in Deutschland dar. Zukunftsszenarien gehen daher davon aus, dass Wasserstoff zu einem großen Teil aus anderen Teilen der Welt, in denen die Stromgestehungskosten deutlich geringer sind, importiert werden wird. Dadurch sinken sowohl die Wasser-

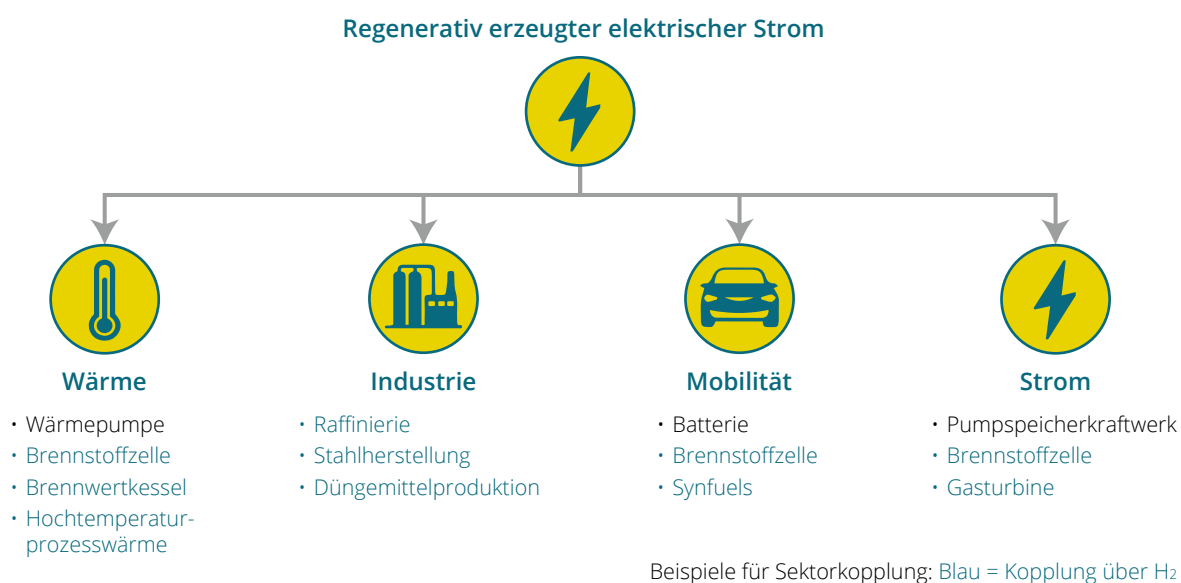


Abbildung 4:

Die Dekarbonisierung vieler Sektoren wird zukünftig über den Stromsektor passieren. Wasserstoff wird dabei ein entscheidendes Bindeglied werden. Die Aufzählung der Anwendungsfälle ist dabei nicht erschöpfend.

stoffproduktionskosten als auch die Kosten weiterer energieintensive Prozesse, wie etwa der Wasserstoffverflüssigung oder der Gewinnung von CO₂ aus der Umgebungsluft zur Produktion synthetischer Kraftstoffe. Beispiele für mögliche Herkunftsländer sind europäische Nachbarn wie Island, Norwegen oder Schottland aber auch Länder des Mittleren Ostens, die bereits heute einen großen Anteil des deutschen Primärenergieverbrauchs bereitstellen. Darüber hinaus ermöglicht der vergleichsweise günstige Transport von chemisch gebundenem Wasserstoff oder tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff auch den Handel mit entfernteren Partnern wie Australien, Argentinien oder den Staaten der Subsahara. Deutschland dürfte somit auch in einer klimaneutralen Zukunft Energieimporteur bleiben und einen großen Teil seiner Primärenergie aus dem sonnen- und windreichen Ausland einführen. Die Zahl der potenziellen Exporteure klimaneutraler Energieträger dürfte dabei jedoch erheblich größer sein als die Zahl der Länder, die heute fossile Energieträger exportieren. Für die Wasserstoffproduktion werden nämlich keine nennenswerten Ressourcen benötigt, weshalb theoretisch jedes Land der Erde Wasserstoff produzieren könnte. Die Kosten der Wasserstoffproduktion dürften sich dagegen regional erheblich unterscheiden. Sie werden im Wesentlichen von den unterschiedlichen Bedingungen für die „Ernte“ erneuerbarer Energien bestimmt.

Der Wasserstoffbedarf wird in Zukunft deutschland- und weltweit erheblich ansteigen. Die genaue benötigte Menge ist aufgrund vieler unbekannter Parameter nur schwer zu kalkulieren und stark davon abhängig, in welchen Sektoren Wasserstoff wie umfangreich eingesetzt werden wird. Prognosen sehen den Wasserstoffbedarf in Deutschland 2050 zwischen 225 und 800 TWh_{H₂} (6.750.000 - 24.000.000 t_{H₂}) pro Jahr [13–15], was bei einer elektrolytischen Erzeugung in etwa einem Strombedarf von 375 – 1.333 TWh_{el} gleichkommt. Zum Vergleich: Die Nettostromerzeugung Deutschlands lag 2019 bei 518 TWh_{el} [16].

Aller Voraussicht nach wird Deutschland zwar diese Mengen nicht selbst produzieren, dennoch können auch bei einer Produktion im Ausland Wasserstofftechnologien und entsprechende Anlagen aus Deutschland eine wichtige Rolle spielen - sowohl bei der Erzeugung von Wasserstoff in Vorzugsregionen also auch für den Transport nach Deutschland und in die weltweiten Verbrauchszentren. So entsteht perspektivisch ein wichtiges Standbein der deutschen Binnen- und Exportindustrie. Viele relevante Wirtschaftsbereiche wie der Maschinen- und Anlagenbau, die Automobil- und Automobilzulieferindustrie sowie die Chemische Industrie sind weltweit führend und haben das Potenzial, Produkte und Dienstleistungen für eine globale Wasserstoffwirtschaft zu liefern und somit Wertschöpfung für Deutschland zu heben. Dadurch kann die Wasserstoffindustrie einen großen Beitrag zur deutschen Wirtschaftskraft liefern. Bis 2050 dürfte sich der Umsatz der europäischen Wasserstoffindustrie auf rund 820 Mrd. EUR pro Jahr belaufen (2030: 130 Mrd. EUR). Die EU-Wasserstoffindustrie könnte bis 2050 etwa 5,4 Millionen hochqualifizierte Arbeitskräfte beschäftigen (2030 >1 Mio.) [17]. Zum Vergleich: 2017 betrug der Umsatz der deutschen Automobilzulieferindustrie, die signifikant von der Transformation hin zu Wasserstofftechnologien profitieren dürfte, 79,8 Mrd. EUR, die deutsche Automobilindustrie kam auf insgesamt 548,6 Mrd. EUR [18].

Infobox 4

Wasserstoffherstellung aus „Überschussstrom“

Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff sind bei der elektrolytischen Erzeugung neben den Stromkosten in erheblichem Maße von den Investitionskosten für die Produktionsanlage getrieben. Daher sollte der Elektrolyse-Wasserstoff vorwiegend dort produziert werden, wo zum einen die Stromgestehungskosten sehr gering sind, zum anderen aber die möglichen nutzbaren Volllaststunden relativ hoch sind. Wasserstoffproduktion aus „Überschussstrom“, beispielsweise aus norddeutschen Windparks oder süddeutsche PV-Anlagen, der nur in wenigen Stunden des Jahres anfällt, führt aufgrund der geringen Anzahl nutzbarer Stunden zu sehr hohen Wasserstoffgestehungskosten. Ein sehr stark vereinfachtes Beispiel, welches keine Betriebskosten, Zinsen, Logistikkosten etc. berücksichtigt, soll dies verdeutlichen:

Beispiel 1: Produktion aus Überschussstrom

Investitionskosten Elektrolyseur: 55.550 €/kg_{H2}/h) $\approx 1.000 \text{ €/kW}$ ($\eta_{\text{LHV}} \triangleq 0.6$)

Abschreibungsdauer: 10 a

Betriebsstunden: 400 h/a

Strompreis: 0 ct/kWh_{el}

In diesem Beispiel kostet der produzierte Wasserstoff 13,89 €/kg_{H2} (Verkaufspreis an der Tankstelle liegt aktuell bei 9,50 €/kg_{H2}) obwohl davon ausgegangen wird, dass der Strom gratis bezogen werden kann.

Im folgenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Elektrolyseur eine deutlich höhere Auslastung hat, dafür allerdings der Betreiber für den Strombezug zahlen muss.

Beispiel 2: Produktion bei vergleichsweise hoher Auslastung

Investitionskosten Elektrolyseur: 55.550 €/kg_{H2}/h) $\approx 1.000 \text{ €/kW}$ ($\eta_{\text{LHV}} \triangleq 0.6$)

Abschreibungsdauer: 10 a

Betriebsstunden: 4.000 h/a

Strompreis: 10 ct/kWh_{el}

Die spezifischen Anlagenkosten liegen in diesem Beispiel lediglich bei 1,39 €/kg_{H2}. Werden die Kosten für den Strombezug von 5,56 €/kg_{H2} hinzuaddiert, belaufen sich die Gesamtkosten auf 6,95 €/kg_{H2}.

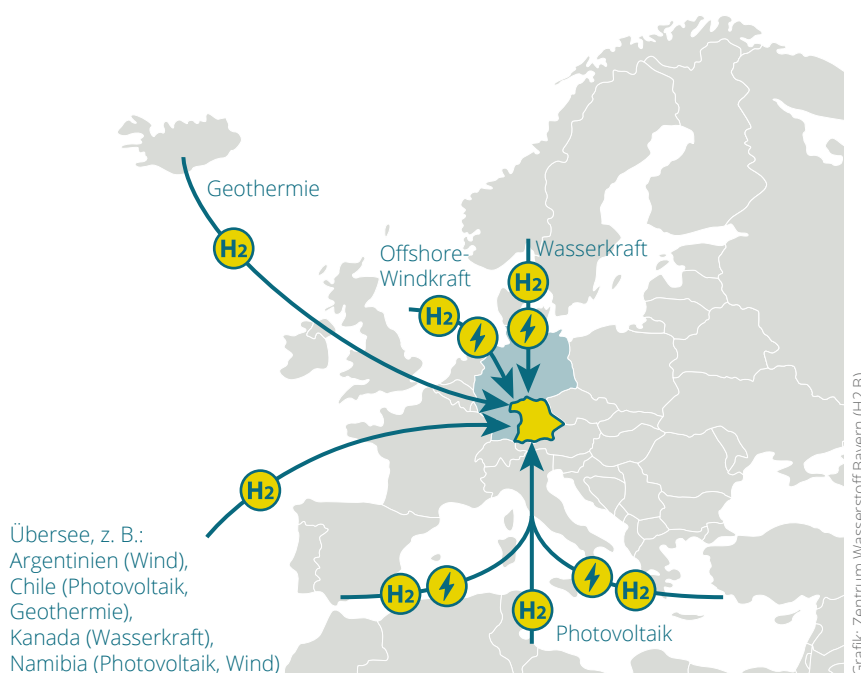
Dieses stark vereinfachte Beispiel zeigt, wie groß der Einfluss der Betriebsstunden der Elektrolyse auf die Wasserstoffgestehungskosten ist. Die Wasserstoffproduktion in Deutschland ausschließlich mit Überschussstrom vorzunehmen ist daher sehr häufig nicht konkurrenzfähig. Der Zubau weiterer erneuerbarer Erzeugungskapazitäten wird die Anzahl der nutzbaren Volllaststunden, die zur Wasserstoffproduktion zur Verfügung stehen, in Zukunft erhöhen. Dies sowie sinkende Investitions- und Betriebskosten für Elektrolyseure können die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff aus Überschussstrom verbessern.

2.2 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT FÜR BAYERN

Für Bayern bietet die Wasserstoffwirtschaft ein großes Potenzial und eine große Chance, die starke bayerische Wirtschaft noch zukunftsfähiger zu machen. Die größten bayerischen Wasserstoffverbraucher befinden sich aktuell im bayerischen Chemiedreieck und im Raum Ingolstadt. Der Wasserstoff wird dabei vor allem für die Herstellung von Düngemitteln und Raffinerieprodukten benötigt und fast ausschließlich vor Ort aus Erdgas gewonnen. In Zukunft wird der Wasserstoff nachhaltig und CO₂-reduziert hergestellt werden müssen. Für die Produktion von grünem Wasserstoff aus Wasserelektrolyse oder Biomassekonversion sind die Ressourcen jedoch limitiert. Der komplette zu erwartende Wasserstoffbedarf dürfte daher nicht aus heimischer Produktion gedeckt werden. Insbesondere ist das Potenzial für Erneuerbare Energien in Bayern im Vergleich zu anderen Regionen gering. Bayern steht zwar im bundesdeutschen Vergleich mit 11.287 GWh_{el}/a (Stand 2017) an der Spitze bei der Produktion von Solarstrom, jedoch machen vor allem die geringen realisierbaren Volllaststunden von PV-Anlagen (in Bayern knapp 1.000 kWh_{el}/KWp, Stand 2017) die Herstellung von Wasserstoff aus Sonnenstrom relativ teuer (siehe Infobox 4). Der Ausbau der Windenergie, die 2017 immerhin knapp 1.850 Volllaststunden erreichte, stagniert aktuell, da die oft fehlende Akzeptanz den Bau neuer Anlagen erheblich erschwert. Auch wenn Bayern mit 12.160 GWh_{el}/a deutschlandweit mit Abstand am meisten Strom aus Wasserkraft erzeugt, so ist Bayern auch mit 78 TWh_{el}/a der zweitgrößte Stromverbraucher unter den Bundesländern [19]. Spätestens mit der Abschaltung der verbliebenen bayerischen Kernkraftwerke, die aktuell knapp 40% zur Stromversorgung beitragen, wird Bayern dauerhaft zum Stromimportland werden [20].

Obwohl Bayern mittel- und langfristig Importeur von grünem Wasserstoff sein dürfte, ist auch die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff vor Ort unerlässlich, um Technologiekompetenz aufzubauen und zu demonstrieren. Auf diese Weise wird Wertschöpfung im Zusammenhang mit der Fertigung von Schlüsselkomponenten im Bereich der Wasserstoffherzeugung in Bayern ausgebaut und langfristig gesichert. Die Einbindung von Elektrolyseuren in ein Gesamtkonzept, mit Abwärme- und Sauerstoffnutzung oder einer Erbringung von Systemdienstleistungen, kann zu positiven Systemeffekten und Deckungsbeiträgen führen. Auch die aktuell noch sehr hohen Wasserstofftransportkosten lassen die Produktion in Bayern sinnvoll erscheinen. Für alternative Wasserstoffherstellungsverfahren mit deutlich geringerem Strombedarf, wie etwa aus Biomasse beziehungsweise Rest- und Abfallstoffen (grüner Wasserstoff) oder aus Methan (blauer Wasserstoff, zum Beispiel unter Produktion von festem Kohlenstoff) bietet sich der Standort Bayern auch für größere Skalen dagegen durchaus an.

Abbildung 5:
Wasserstoff macht Erneuerbare Energien weltweit handelbar. In Regionen mit besonders guten Bedingungen kann Wasserstoff kostengünstig aus erneuerbaren Quellen wie Sonne, Wind, Wasser oder Geothermie gewonnen und als Energieträger in die Industriezentren transportiert werden.



3. CHANCEN UND HEMMNISSE EINER BAYERISCHEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Die derzeit erkennbaren Stärken, Schwächen, Chancen und Herausforderungen einer bayerischen Wasserstoffwirtschaft werden in der folgenden SWOT-Analyse zusammengefasst. Bayerns Wirtschaft hat in einigen relevanten Bereichen der Wasserstoffwirtschaft über die letzten Jahre großes Know-how angesammelt. Viele Unternehmen sind bereits heute Technologieführer für wasserstoffbezogene Produkte. Andere sind in artverwandten Feldern in einer globalen Spitzenposition und können ihre Fertigkeiten auf Wasserstofftechnologien anwenden. Die bayerische Wirtschaft ist auch strukturell stark aufgestellt. Neben den großen OEMs verfügt Bayern über eine Vielzahl hochinnovativer kleiner und mittelständischer Unternehmen, unter denen viele weltweit führende Hidden Champions zu finden sind.

Bereits heute wird Wasserstoff in vielen Prozessen wie der Düngemittel-, Kraftstoff- oder Glasproduktion eingesetzt. Auch in Bayern gibt es aktuell einen großen Wasserstoffbedarf. Durch einen gesicherten Absatz kann eine nachhaltige Wasserstoffproduktion in Bayern schrittweise hochgefahren werden

Neben der innovationsstarken Wirtschaft ist Bayern auch in der Forschung in vielen Bereichen weltweit führend. Beispiele sind innovative Wasserstofferzeugungs-, Wasserstoffspeicher- und Wasserstoffnutzungstechnologien. Zahlreiche Universitäten und Forschungsinstitute im Freistaat erforschen zentrale Aspekte unterschiedlicher Wasserstoff-Wertschöpfungsketten. Die Forschungseinrichtungen sind in der Regel eng mit der regionalen und überregionalen Wirtschaft vernetzt. Es gelingt in zahlreichen Verbundvorhaben, Fragestellungen zu adressieren, die über das einzelwirtschaftliche Interesse hinausgehen und den energiewirtschaftlichen Gesamtkontext adressieren..

SWOT-Analyse

STÄRKEN

- Innovationskraft und Technologieführerschaft in Wirtschaft & Forschung
- Starke OEMs und Zulieferindustrie
- Wasserstoffverbraucher bereits vor Ort
- Starkes institutionelles Umfeld innerhalb Deutschlands
- Strukturstarke und finanzkräftiges Bundesland, Kommunen, Unternehmen und Bürger
- Starke Strukturen im ländlichen Raum
- Ständige Vertretungen im Ausland

SCHWÄCHEN

- Geringes Potenzial für Erneuerbare Energien
- Gering ausgeprägte Vernetzung über relevante Handlungsfelder hinweg
- Hohe Unsicherheit über politisches Commitment
- Politisches Interesse entwickelt sich mit Verspätung

CHANCEN

- Wichtiges zukünftiges Standbein der Fahrzeug- und Zulieferindustrie
- Teilweise Übernahme bestehender Wertschöpfungsketten
- Größtenteils unerschlossener Markt
- Dauerhafte Technologieführerschaft bei Schlüsselkomponenten und -technologien möglich
- Erschließen neuer internationaler Partnerschaften
- Bestehende Infrastruktur für Erdgas sowie Erdöl und dessen Folgeprodukte

RISIKEN

- Oft hohe Investitionskosten in Infrastruktur
- Keine endgültige Abgrenzung zu Konkurrenztechnologien möglich
- Langer Planungshorizont
- Technologieführerschaft anderer Regionen und Nationen
- Hohe Komplexität und Anwendbarkeit H₂-Technologien
- Dynamische rechtliche Rahmenbedingungen
- Hohe Stückkosten von Schlüsselkomponenten

3.1 STÄRKEN

Das stabile institutionelle Umfeld in Deutschland und insbesondere im Freistaat Bayern kann als zentrale Voraussetzung für Anstoß und Koordination der anstehenden disruptiven Entwicklung gesehen werden. Bayern steht wirtschaftlich gut da. Sowohl der Freistaat selbst als auch die Kommunen, Unternehmen und Bürger sind im Allgemeinen finanziell gut aufgestellt. Das Potenzial, ein fruchtbares Umfeld für Investitionen zu schaffen ist in Bayern daher besonders groß.

Bayern ist in vielen Regionen stark landwirtschaftlich geprägt. Viele der Betriebe bezeichnen sich bereits heute als Energiebauern, weil sie beispielsweise auf ihren Äckern Solarstrom produzieren oder Energiepflanzen für die Verwertung in hofeigenen Biogasanlagen anbauen. Diese gewachsenen Strukturen können auch für die dezentrale Wasserstoffproduktion aus Biomasse oder die dezentrale Wasserelektrolyse genutzt werden. Auch darüber hinaus ist das Interesse der bayerischen Gesellschaft an zero-emission Technologien hoch. Bayern ist ein Automobil-land. Auch deshalb beschäftigt sich die bayerische Gesellschaft besonders stark mit alternativen Antriebsformen und ist Neuerungen gegenüber aufgeschlossen.

Bayern ist durch seine zahlreichen Auslandsrepräsentanzen international bestens vernetzt. Von diesem Netzwerk profitieren bayerische Unternehmen, die dadurch einen deutschsprachigen Ansprechpartner vor Ort haben, der Kontakte vermittelt oder beim Aufbau von Vertriebsstrukturen unterstützt.

3.2 SCHWÄCHEN

Bayern hat aufgrund seiner geographischen Lage und Topografie ein relativ niedriges Potenzial für Erneuerbare Energien. Der Strom, der aus Erneuerbaren Energien wie Sonne, Wind oder Wasserkraft gewonnen wird, wird daher vor allem für die Deckung des elektrischen Energiebedarfs im Freistaat benötigt. EE-Anlagen wie Windkraft und Photovoltaik erreichen in Bayern nur relativ wenige Volllaststunden pro Jahr. Dies führt zu verhältnismäßig hohen Wasserstoffgestehungskosten, wenn an solchen EE-Anlagen mit Hilfe der Wasserelektrolyse Wasserstoff produziert werden soll (siehe Infobox 1, S. 7).

Die Wasserstoffinfrastruktur hat in Bayern wie in ganz Deutschland noch ein Verbesserungspotenzial hinsichtlich Produktion und Transport. Es fehlen sowohl Produktionsanlagen für grünen Wasserstoff als auch die Logistik für den Transport des Wasserstoffs sowie Tankstellen. Darüber hinaus ist die Beschaffung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen aufgrund der bisher geringen Stückzahlen mit sehr hohen Hürden verbunden, was einen schnellen Roll-Out verhindert. Deutsche wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind bisher am Markt noch kaum erhältlich.

Die Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft kann nur gelingen, wenn ein koordinierter Hochlauf entlang der gesamten Wertschöpfungskette realisiert wird. Die Vernetzung der verschiedenen Handlungsfelder ist aufgrund der relativ neuen Geschäftsfelder jedoch ausbaufähig. Zudem kann auch eine Vernetzung über die Handlungsfelder hinweg die Transformation nur bedingt anstoßen, solange ein verlässliches Commitment der politischen Handlungsträger auf Bundes- und EU-Ebene ausbleibt. Fehlende Sicherheit hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen verhindert Investitionen in Wasserstofftechnologien, die zum Teil über viele Jahre abgeschlossen werden müssen. Das politische Interesse an Wasserstofftechnologien ist im vergangenen Jahr in Bayern stark angestiegen. Auch andere Bundesländer – vor allem die norddeutschen Länder – wurden aktiv und haben 2019 eine Wasserstoffstrategie vorgelegt [21]. Bayern hat großes Potenzial, sich durch die Entfaltung entschlossener und koordinierter Aktivitäten eine Führungsrolle zu erarbeiten.

Als ein aktuell großes Hemmnis für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft kann der energiepolitische Rahmen angesehen werden. Seit Anfang 2018 sind die Zertifikatspreise im europäischen Emissionshandel deutlich angestiegen, im Zuge der Coronakrise sind die ETS-Preise jedoch wieder abgesunken. Dies sollte allerdings nur eine vorübergehende Entwicklung sein. Mittel- und langfristig sollten angemessen steigende Zertifikatspreise positive Impulse für die Wasserstoffwirtschaft geben. In den Sektoren Mobilität und Wärme wird erst allmählich eine Besteuerung von CO₂ eingeführt. Die EEG-Umlage und weitere Steuern, Abgaben und Umlagen erhöhen die Strompreise derart, dass eine Elektrolyse nur im Falle von Ausnahmeregelungen annähernd wirtschaftlich betrieben

werden kann. Darüber hinaus fehlt es an Mechanismen, die eine Anrechnung von grünem Wasserstoff auf Emissionsminderungsziele ermöglichen, wie zum Beispiel ein Zertifizierungsregime.

3.3 CHANCEN

Die Automobil- und Zulieferindustrie befindet sich deutschland- und auch weltweit in einem Umbruch. Der Absatz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird absehbar zurückgehen. Wasserstofftechnologien können für die bayerische Fahrzeug- und Zulieferindustrie ein wichtiges neues Geschäftsfeld erschließen und eine lukrative Option bieten, den zu erwartenden Rückgang bei konventionellen Fahrzeugen auszugleichen.

Wasserstofftechnologien weisen einige Parallelen zu etablierten Technologien auf. Im Fahrzeugbau sind etwa Turbolader, Sensoren, Ventile oder das Luft- und Thermomanagement von wasserstoffbasierten Fahrzeugen sehr ähnlich zu traditionellen, auf Verbrennungstechnik aufgebauten Fahrzeugen. Gleichzeitig gibt es viele Synergien zwischen batterieelektrischen und wasserstoffelektrischen Fahrzeugen. Wasserstoffmobilität bietet daher für viele Zulieferer die Möglichkeit, Teile ihres etablierten Tätigkeitsfeldes beizubehalten und zudem die Möglichkeit, Synergieeffekte zwischen Batterie- und Brennstoffzellentechnologien zu nutzen.

Selbst im Vergleich mit dem noch sehr jungen Markt für batterieelektrische Fahrzeuge, ist der Markt für Wasserstofftechnologien größtenteils noch nicht erschlossen. Dies ermöglicht es bayerischen Unternehmen, frühzeitig Marktanteile zu sichern und somit langfristige Wachstumspotenziale zu erlangen. Der Rückstand der bayerischen und deutschen Industrie, vor allem auf asiatische Länder wie Japan, Korea oder China, ist in vielen Technologiefeldern noch relativ gering. In anderen Technologiefeldern sind hiesige Unternehmen sogar weltweit führend. In dem großen und vergleichsweise neuen Geschäftsfeld „Wasserstoff“ sind viele Standards und Normen noch nicht gesetzt. Bayerische Unternehmen können in der aktuellen Phase proaktiv bei der Mitgestaltung des Wasserstoffmarktes Einfluss nehmen, wie beispielsweise durch die Mitarbeit in Normierungsgremien, in denen deutsche Vertreter aktuell unterrepräsentiert sind. Ein engagiertes Handeln bayerischer Unternehmen kann es hier ermöglichen, eine Technologieführerschaft bei Schlüsselkomponenten und -technologien dauerhaft zu etablieren. Die Politik kann die Entwicklung proaktiv unterstützen. So kann beispielsweise durch die Gründung von Entwicklungs- und Beschleunigungszentren sowie Test-, Zertifizierungs- und Standardisierungszentren der notwendige Übergang zu einer industriellen Fertigung von Schlüsselkomponenten der Wasserstoffwirtschaft deutlich beschleunigt werden. Diese Zentren können zusätzlich zur Ausbildung neuer Fachkräfte beitragen.

Der zukünftige Wasserstoffbedarf wird nicht ausschließlich durch heimische Quellen gedeckt werden. Daher ist es von großer Bedeutung bereits heute Partnerschaften mit möglichen Exportländern zu schließen. Es bestehen bereits enge partnerschaftliche Handelsbeziehungen zu vielen der möglichen Partner. Andere mögliche Partner sind neue Akteure im Bereich des Energieexports. Neben dem Import von wasserstoffbasierten Energieäquivalenten ist der Export von Anlagen und Know-how eine entscheidende Chance für die bayerische Wirtschaft. In diesem Zusammenhang kann Bayern auf ein starkes Netz von ständigen Vertretungen im Ausland aufbauen. In vielen Bereichen können beträchtliche Co-Benefits gehoben werden. Beispielsweise kann der Import von grünem Wasserstoff aus Entwicklungs- und Schwellenländern einen Beitrag zum Wirtschaftswachstum der betroffenen Regionen leisten. Aber nicht nur entfernte Regionen, sondern auch unmittelbare Nachbarn verfügen über exzellente Bedingungen zur Produktion von grünem Wasserstoff. Nachbarländer wie die Schweiz oder Österreich erzeugen bereits heute weit mehr als 50% des benötigten Stroms aus erneuerbaren Energien mit Laufwasserkraftwerken. Die günstigen Bedingungen für die Wasserstoffproduktion in diesen Ländern ermöglichen auch Partnerschaften in direkter geographischer Nähe. Dafür wäre zu prüfen, wie viel Strom aus erneuerbaren Energien für die Produktion und den Export von Wasserstoff zur Verfügung stünde. In jedem Fall ist die Entwicklung und Implementierung von effizienten Technologien zur infrastrukturkompatiblen Wasserstofflogistik voranzutreiben. Dafür kann zum einen die bestehende Gasnetzinfrastruktur, wie Leitungssysteme und Speicher, genutzt werden. Zum anderen können auch bestehende Logistikkonzepte für flüssige Energieträger, die aktuell dem Transport und der Speicherung von Erdöl und seinen flüssigen Folgeprodukten dienen, verwendet werden.

3.4 RISIKEN

Der Wandel einer auf fossilen Ressourcen basierten Volkswirtschaft hin zu einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Dies betrifft die komplette Wertschöpfungskette von der Erzeugung über die Logistik bis hin zur Nutzung des Wasserstoffs. Es besteht dabei die Möglichkeit, dass es auch zu Fehlinvestitionen kommt, beispielsweise, wenn der Wasserstoffbedarf unter- oder überschätzt wird und die Infrastruktur daher falsch ausgelegt wird oder Technologien vorangetrieben werden, die sich später als nicht wettbewerbsfähig herausstellen. In einigen Anwendungen, wie der direkten stofflichen Nutzung, ist Wasserstoff alternativlos. In anderen Bereichen gibt es durchaus Alternativen. Heute ist beispielsweise noch nicht abschließend abzuschätzen, für welche Anwendungen in Zukunft Wasserstoff, Synfuels oder LOHC-Systeme in der Mobilität eingesetzt werden und für welche Anwendungen Batteriespeicher die bessere Alternative darstellen. Dennoch müssen jetzt Weichen gestellt werden, die sich in Zukunft als falsche Entscheidungen herausstellen könnten.

Die Transformation in eine auf Erneuerbare Energien und Wasserstoff basierte Volkswirtschaft ist ein stetiger und andauernder Prozess. Viele Entscheidungen müssen auf einer sehr langen Zeitachse getroffen werden. Dies kann dazu führen, dass der relevante Zeithorizont den Planungshorizont einzelner Entscheidungsträger übersteigt.

Das konsequente und ambitionierte Vorgehen einiger asiatischer Staaten setzt die deutsche Wirtschaft dabei unter Druck. Um sich eine führende Position an den Weltmärkten zu sichern, müssen deutsche Unternehmen zeitnah umfangreiche Investitionen zur Entwicklung von wasserstoffbezogenen Produkten tätigen. Demgegenüber stehen häufig abgeschriebene Produktionsanlagen konventioneller Technologien. Sollten diese bestehenden Anlagen weiter betrieben werden, würde damit der rechtzeitige Einstieg in neue Technologien verpasst werden.

Das hochkompetitive internationale Umfeld mit bereits fortgeschrittener Industrialisierung der Produktion im Bereich „Wasserstofftechnologien“ in einigen Regionen der Welt (Ostasien, Kalifornien), erhöht die Notwendigkeit, zeitnah und intensiv in neue Anlagen zu investieren. Bayerische Firmen haben aktuell einen Aufholbedarf bezüglich einiger wasserstoffrelevanter Produkte wie der Brennstoffzellentechnologie für mobile Anwendungen. Die Herausforderungen eines weltweiten und intensiven Wettbewerbs stehen jedoch derart umfangreichen Investitionen im Weg.

Langfristige Investitionen in Wasserstofftechnologien werden nur bei ausreichender Planungssicherheit getätigt. Stabile rechtliche Rahmenbedingungen sind daher von entscheidender Bedeutung.

Es besteht eine hohe Komplexität, da Wasserstofftechnologien in vielen Sektoren eingesetzt werden können und häufig erst die Vernetzung von Sektoren und das Ausnutzen von Nebeneffekten zu attraktiven Geschäftsmodellen führen. Die breite Anwendung von Wasserstofftechnologien macht zudem Investitionen in Infrastrukturen nötig, die heute teilweise noch nicht existieren. Hierbei ergeben sich klassische „Henne-Ei“-Probleme, die den Hochlauf von Wasserstofftechnologien verzögern können.

Hinzu kommt, dass verschiedene Wasserstofftechnologien einen heterogenen Reifegrad aufweisen. Während einige bereits kommerziell eingesetzt werden, bedarf es für andere Technologien noch grundsätzlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Die Kosten für Forschung und Entwicklung können für einzelne Unternehmen sehr hoch sein. Im Speziellen, wenn zeitgleich andere wichtige Investitionen, wie in die batterieelektrische Mobilität, getätigt werden müssen. In der Öffentlichkeit werden im Bereich der Mobilität batterie- und wasserstoffbetriebene Anwendungen oft fälschlicherweise als einander ausschließende Alternativen gesehen. Dies vermittelt das irreführende Bild, dass eine Entscheidung zwischen den beiden Technologien nötig wäre, obwohl erst das Zusammenspiel der beiden Alternativen kostengünstige Mobilitätskonzepte für alle Fahrzeugklassen ermöglicht.

Die Produktionskosten von Elektrolysewasserstoff schwanken erheblich mit den Bedingungen für Erneuerbare Energien. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, in Konkurrenz mit anderen Industrieländern frühzeitig Partnerschaften mit Vorzugsregionen voranzutreiben.

4. HANDLUNGSFELDER EINER BAYERISCHEN WASSERSTOFFSTRATEGIE

Für die Umsetzung neuer Technologien der Wasserstofferzeugung, -speicherung, -logistik und -nutzung und den Hochlauf der bayerischen Wasserstoffwirtschaft ist ein strategisches Vorgehen entlang vielfältiger Dimensionen technologischer, ökonomischer, politischer und gesellschaftlicher Natur unerlässlich.

4.1 TECHNOLOGISCHE HANDLUNGSFELDER

Für die bayerische Wasserstoffwirtschaft wurden mit den Partnern des Wasserstoffbündnis Bayern die folgenden technologischen Handlungsfelder identifiziert: H₂-Erzeugung, H₂-Logistik, H₂-Nutzung sowie die H₂-Skalierung (die industrielle Produktion von Schlüsselkomponenten). Diese Handlungsfelder, und insbesondere das Zusammenspiel zwischen ihnen, sind für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft von höchster Bedeutung. Aufgrund der Interdependenzen zwischen den Handlungsfeldern müssen sie im bayerischen Strategieprozess verknüpft und gemeinsam entwickelt werden. Wo es möglich ist, sollte Technologieoffenheit herrschen. An einigen Stellen können aber Entscheidungen für bestimmte Technologieoptionen notwendig werden, um möglichst hohe Investitionssicherheit herzustellen. Auf diese Weise entstehen leistungsfähige Wertschöpfungsketten für die bayerische und deutsche Industrie.

4.1.1 H₂-ERZEUGUNG

Die Herstellung von Wasserstoff kann auf unterschiedlichsten Produktionswegen erfolgen, die sich unter anderem durch die eingesetzten Rohstoffe und Ressourcen, sowie durch die verursachten Treibhausgasemissionen unterscheiden.

Besonders vielversprechende Verfahren für eine kostengünstige und CO₂-reduzierte Wasserstoffproduktion sind die elektrolytische Wasserspaltung aber auch die Konversion von Biomasse beziehungsweise Rest- und Abfallstoffen. Beide Technologien sind aktuell noch nicht wettbewerbsfähig zur konventionellen Wasserstoffherstellung. Darüber hinaus ist der Flächenverbrauch bei der Wasserstoffherstellung aus kultivierter Biomasse hoch, weshalb eine Konkurrenz beispielsweise mit der Produktion von Lebensmitteln besteht und daher eine Skalierung der Technologie nicht unbegrenzt möglich erscheint. Eine weitere Option ist die Wasserstoffherstellung aus fossilen Ressourcen durch Dampfreformierung mit anschließender Weiterverwendung des CO₂ oder durch die Abspaltung von stofflichem Kohlenstoff durch Pyrolyse. Das CO₂ wird entweder in unterirdischen Kavernen gespeichert (carbon capture and storage, CCS) oder es wird einer stofflichen Nutzung zugeführt (carbon capture and utilisation, CCU). Bei der stofflichen Nutzung des CO₂ zur Herstellung neuer Produkte sollte auf einen langen Produktlebenszyklus geachtet werden, um das Treibhausgas möglichst lange zu binden. Erreichen die Produkte das Ende ihrer Lebenszeit und können diese nicht direkt recycelt werden, sollte auf eine CO₂-arme Entsorgung (zum Beispiel mittels Pyrolyse) oder das erneute Binden oder Speichern des CO₂ geachtet werden. Die Investitions- und Betriebskosten sowohl für Pyrolyse- als auch für CCS- und CCU-Verfahren sind aktuell noch vergleichsweise hoch. Darüber hinaus ist vor allem in der deutschen Gesellschaft die Akzeptanz für diese Technologien möglicherweise gering.

Neben der expliziten Erzeugung fällt Wasserstoff heute im großen Maßstab als Nebenprodukt der Industrie an. Etwa ein Drittel des weltweit verfügbaren Wasserstoffs wird auf diese Weise produziert. Ein Großteil dieses Wasserstoffs wird in anderen Prozessschritten wieder direkt eingesetzt. Wenn dies jedoch nicht möglich ist, wird das Gas häufig nur thermisch verwertet. Beispiele für die industrielle Erzeugung von Nebenproduktwasserstoff in großem industriellem Maßstab sind die Chloralkali-Elektrolyse oder die Produktion wasserstoffhaltiger Mischgase in Raffinerieprozessen. Durch Nutzung dieser Quellen können bei einem Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft kurzfristig größere Mengen Wasserstoff relativ günstig zur Verfügung gestellt werden.

Die häufig genutzte Einteilung der Wasserstoffherzeugung in verschiedene Farben (siehe Infobox 1, S. 7) ist zwar ein erster Anhaltspunkt für deren Nachhaltigkeit, sagt jedoch wenig über die tatsächlichen Treibhausgasemissionen je produzierter Mengeneinheit Wasserstoff aus. Es ist daher von zentraler Bedeutung Herkunftsnachweise einzuführen, die sowohl Aufschluss über die eingesetzten Ressourcen als auch über das tatsächliche Treibhausgas-Minderungspotenzial von erzeugtem Wasserstoff geben. Die Zertifikate müssen möglichst weltweit, zumindest aber europaweit anerkannt werden, um einen umfassenden Handel emissionsreduzierten Wasserstoffs zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen sie auf die Treibhausgas-minderungsziele der wasserstoffverbrauchenden Unternehmen anrechenbar sein.

Langfristig werden sich die Produktionsstandorte für Wasserstoff im globalen Wettbewerb herausbilden. Es ist aufgrund niedrigerer Gestehungskosten wahrscheinlich, dass mittel- und langfristig Wasserstoff aus den nord-deutschen Bundesländern, aus anderen europäischen Staaten oder auch aus Übersee importiert werden wird. Die lokale Wasserstoffproduktion in Bayern kann dennoch aus verschiedenen Gründen attraktiv sein:

- Die Transportkosten für Wasserstoff sind aktuell noch sehr hoch. Daher kann sich eine lokale Erzeugung trotz höherer Strompreise dennoch rechnen. Dies gilt im Besonderen, wenn die Elektrolyse direkt an die erneuerbare Energiequelle gekoppelt wird und somit Steuern, Abgaben und Umlagen auf den Strompreis vermieden werden können.
- Die Einbindung der Elektrolyse in ein Gesamtsystem, in dem beispielsweise auch der Sauerstoff und die Abwärme genutzt werden oder Systemdienstleistungen erbracht werden, kann die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion verbessern.
- Regionale Projekte unter Bürgerbeteiligung erhöhen die Akzeptanz der Technologien in der Bevölkerung und machen Wasserstofftechnologie erlebbar. Dies ist besonders relevant, da viele Bürger bisher keine oder nur wenig Berührungspunkte mit dem Thema hatten.
- Durch den Aufbau von Anlagen vor Ort kann umfangreiches Know-how gesammelt werden, was von großer Bedeutung ist, um Technologieexpertise weiter zu entwickeln und langfristig die Technologieführerschaft am Standort Bayern zu etablieren und auszubauen. Eine starke Exportindustrie braucht einen starken Heimatmarkt.

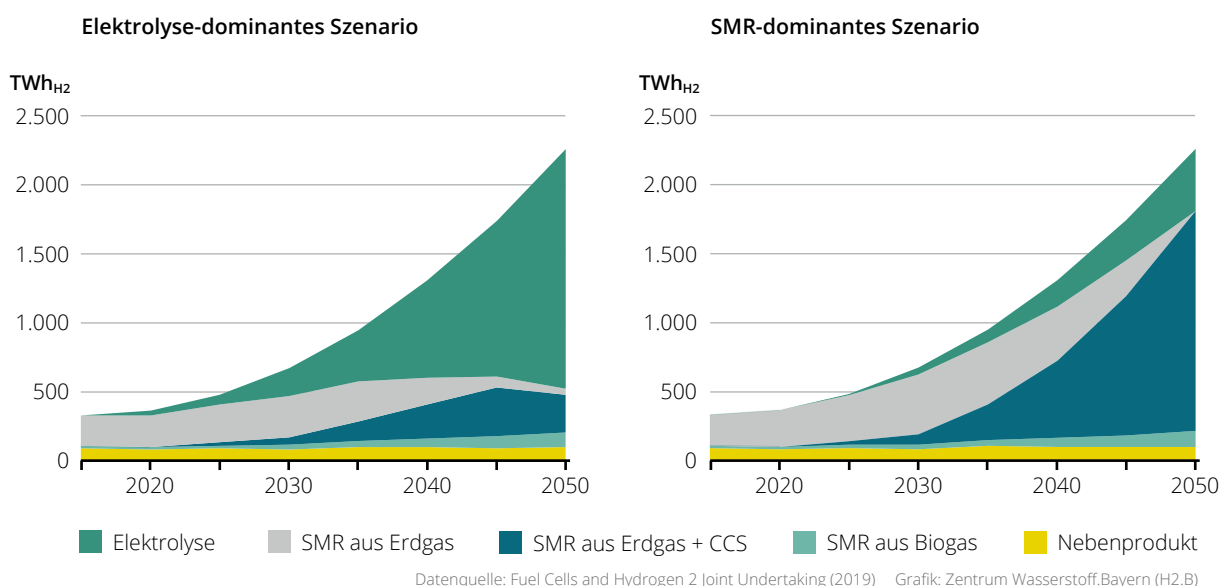


Abbildung 6:

Die Produktionsverfahren für Wasserstoff werden sich in den nächsten Jahren grundlegend ändern. Je nach Produktionskosten und politischen Rahmenbedingungen werden sich verschiedene Technologien durchsetzen. Die obere Grafik zeigt ein Szenario für Europa, in dem die Wasserelektrolyse die dominante Erzeugungstechnologie ist. Der rechten Grafik liegt die Annahme zu Grunde, dass Wasserstoff aus Erdgas mit anschließender Abscheidung des Klimagases für die europäische Wasserstoffversorgung genutzt wird. Die Grafiken basieren auf Daten aus der Hydrogen Roadmap Europe, die durch die Initiative Fuel Cell and Hydrogen 2 Joint Undertaking erarbeitet wurde. Importe werden in der zitierten Studie nicht explizit angegeben, es ist aber davon auszugehen, dass ein Teil der dargestellten Mengen importiert werden wird [13].

4.1.2 H₂-LOGISTIK

Aktuell werden nur etwa 15% des weltweiten Wasserstoffs transportiert [1]. Große Verbraucher stellen den Wasserstoff häufig direkt vor Ort aus Erdgas her und setzen ihn direkt ein. In einer Wasserstoffwirtschaft, die vor allem auf den Einsatz von grünem Wasserstoff setzt, werden sich Erzeuger und Verbraucher zeitlich und räumlich separieren. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, Speicher- und Transportoptionen für Wasserstoff zu entwickeln.

Aufgrund seiner geringen Dichte bei Normbedingungen muss Wasserstoff für eine effiziente Logistik entweder komprimiert, durch Abkühlung verflüssigt oder chemisch gebunden werden. Alle genannten Verfahren sind mit Verlusten verbunden. Sowohl die Kompression als auch die Verflüssigung sind sehr energieintensiv. Bei der chemischen Bindung entstehen häufig Nebenprodukte wie Wasser, die einen Teil des Wasserstoffs binden und diesen somit für die weitere Verwendung unbrauchbar machen. Vergleichbare Nebenprodukte entstehen beim LOHC-Verfahren nicht. Um den Wasserstoff vom LOHC wieder freizusetzen ist jedoch eine erhebliche Menge thermischer Energie nötig.

Als Transportmittel eignen sich generell alle gängigen straßen-, schienen- oder wasserbasierten Transportmittel. Für Druckwasserstoff und tiefkalt verflüssigten Wasserstoff ist bisher jedoch nur der Straßentransport üblich. Für komprimierten Wasserstoff oder chemisch in einer Flüssigkeit gebundenen Wasserstoff ist darüber hinaus auch der Transport über ein Leitungsnetz attraktiv. Ähnlich wie beim Vergleich zwischen batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen schließen sich auch die verschiedenen Logistikkonzepte nicht gegenseitig aus, sondern ergänzen sich zu optimierten Systemen.

Abbildung 7 (S. 23) zeigt mögliche Logistikkonzepte eines internationalen Wasserstoffhandels. Als Verbraucher werden in diesem Beispiel Tankstellen aufgeführt, an denen entweder gasförmiger Wasserstoff (CGH₂), tiefkalt und dadurch verflüssigter Wasserstoff (LH₂) oder Synfuels bzw. LOHC getankt werden können. Die dargestellten Abnehmer, könnten jedoch auch sämtliche andere Verbraucher von Wasserstoff oder Synfuels bzw. LOHC sein. Entlang der Transport- und Speicherkette kann der Zustand des Wasserstoffs (CGH₂, LH₂, Synfuel/LOHC) immer wieder geändert werden, um die jeweilige Infrastruktur optimal zu nutzen. Jede Änderung des Zustands ist jedoch mit dem Einsatz kleinerer oder größerer Mengen Energie verbunden. Die Abbildung zeigt im Hinblick auf technische und ökonomische Effizienz besonders vorteilhafte Konzepte und spart aus Gründen der Übersichtlichkeit weniger geeignete Routen aus.

Der Interkontinentaltransport großer Mengen Wasserstoff aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energien ist potenziell als kryogene Flüssigkeit im Spezialschiff oder chemisch gebunden in üblichen Tankschiffen am günstigsten. Dafür muss der Wasserstoff entweder abgekühlt und damit verflüssigt werden oder chemisch gebunden werden. Dabei ist die Verflüssigung vergleichsweise energieintensiv; findet jedoch an einem Ort statt, an dem die Stromgestehungskosten aufgrund der guten Bedingungen für erneuerbare Energien sehr günstig sind. Bei der Hydrierung von CO₂, Stickstoff oder LOHC handelt es sich dagegen um exotherme Reaktionen bei denen Energie freigesetzt wird. Diese kann gegebenenfalls vor Ort genutzt werden, zum Beispiel um mittels Meerwasserentsalzung Wasser für die Elektrolyse zu gewinnen.

An den Seehäfen Europas angekommen, kann der verflüssigte Wasserstoff (LH₂) entweder verdampft und damit zurück in seinen gasförmigen Aggregatzustand überführt werden oder die Weiterverteilung passiert als flüssiges Medium in hochisolierten Tanks auf dem Binnenschiff, Zug oder LKW. In diesem Fall wird der flüssige Wasserstoff anschließend an der Tankstelle gelagert und je nach Anwendung entweder direkt als kryogene Flüssigkeit getankt oder vor dem Tankvorgang verdampft. Wird der Wasserstoff noch vor dem Transport in großskaligen Anlagen verdampft, besteht neben dem Transport in Drucktanks auf Fluss, Schiene oder Straße auch die Möglichkeit der leitungsgebundenen Verteilung.

Das Konzept eines leitungsgebundenen Gastransportes ist bei einer Vielzahl von Einspeise- und Entnahmepunkten sowie langen Entfernungen in Verbindung mit großen Volumenströmen besonders attraktiv. Durch die schrittweise Umstellung von bestehende Parallelleitungen des Erdgasnetzes und Leitungszubau kann mittelfristig ein Fernleitungsnetz für Wasserstoff entstehen, das neben dem Erdgasnetz existiert. Hierdurch können große Wasserstoffquellen mit großen Wasserstoffsinken verbunden werden. In den bayerischen Verbrauchszentren kann die Weiterverteilung anschließend mittels schienen- oder straßengebundenen Verkehrs erfolgen. Perspektivisch ist darüber hinaus der Weitertransport über Gasleitungen auf Verteilnetzebene vorstellbar. In einem ersten

Schritt würde dem Gasverteilnetz immer größere Anteile Wasserstoff beigemischt werden, bevor anschließend komplette Teilnetze auf den Betrieb mit 100% Wasserstoff umgestellt werden könnten.

Werden an europäischen Häfen Synfuels oder LOHC angeliefert, können diese im Gegensatz zu kryogenem Wasserstoff direkt und ohne vorherige Umwandlung leitungsgebunden weitertransportiert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit die existierende Infrastruktur herkömmlicher Kraftstoffe (Tankschiff, Kesselwagen, Tankwagen) zur Verteilung zu nutzen, um den gebundenen Wasserstoff an die Tankstellen zu bringen. Die LOHC-Technologie ermöglicht es zudem, den chemisch gebundenen Wasserstoff auf einfachem technischem Weg wieder freizusetzen und dem Kunden Wasserstoff in hochreiner Form wieder zur Verfügung stellen. Dieser vergleichsweise energieintensive Schritt kann entweder erst beim Verbraucher (z.B. der Tankstelle) oder aber zentral erfolgen, um den freigesetzten Wasserstoff anschließend in eine Gasnetzinfrastruktur einzuspeisen.

Um eine zeitliche Unabhängigkeit von Erzeugung und Verbrauch zu ermöglichen, werden Speicher mit verschiedenen Volumina in unterschiedlichen Abschnitten der Logistikkette benötigt. Die Transportinfrastruktur, wie Leitungssysteme, Schiffe, Züge oder LKW, haben eine inhärente Speicherfunktion. Darüber hinaus werden jedoch auch stationäre Speicher benötigt, deren Speicherkosten sich je nach Technologie und Anwendungsfall (Dauer und Menge der zu speichernden Energiemenge) stark unterscheiden können. Technologien, die Wasserstoff chemisch binden, weisen besonders interessante Speichereigenschaften auf, da die wasserstoffreiche Flüssigkeit typischerweise bei Normaldruck in herkömmlichen Tankfarmen in großen Mengen und verlustfrei gelagert werden können. Darüber hinaus besteht sowohl für gasförmigen als auch für chemisch gebundenen Wasserstoff die Möglichkeit der Speicherung in Kavernenspeichern unter der Erde. Das deutsche Untergrundspeichervolumen ist mit fast 25 Mrd. Kubikmeter das viertgrößte der Welt und kann noch weiter ausgebaut werden.

Der Aufbau der nötigen Wasserstoffinfrastruktur kann nicht gänzlich privaten Unternehmen überlassen werden, sondern sollte zum Beispiel über bewährte Verfahren durch die Bundesnetzagentur koordiniert werden, um einen aus Gesamtsystemsicht sinnvollen Aufbau zu erreichen. Dabei müssen Erdgas-, Wasserstoff- und Stromnetze aber auch Speicherkapazitäten zusammen gedacht und aufeinander abgestimmt entwickelt werden.

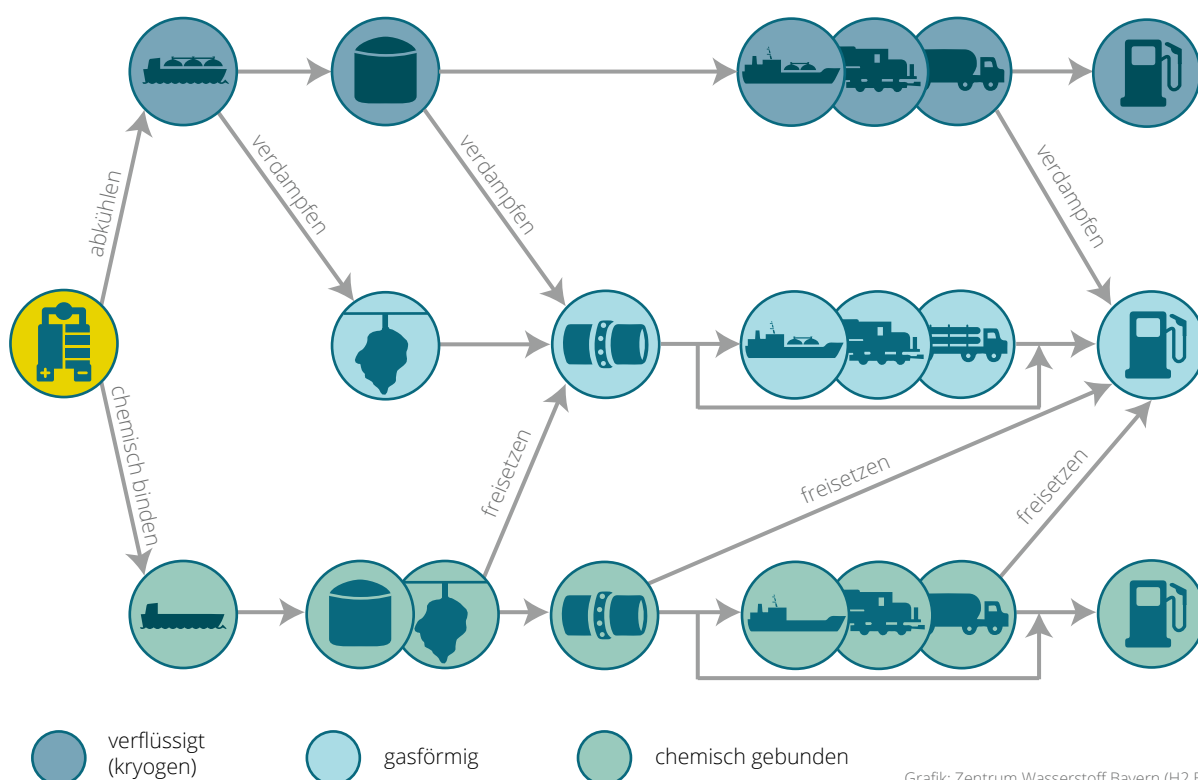


Abbildung 7:

Mögliches Konzept einer transkontinentalen Logistik für Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger.

4.1.3 H₂-NUTZUNG

Die klimaneutralen Volkswirtschaften der Zukunft werden auf den Einsatz von nachhaltigem Wasserstoff zurückgreifen müssen. Dabei kann die zukünftige Wasserstoffnutzung in zwei Bereiche unterteilt werden:

- Substitution von grauem durch grünen Wasserstoff
- Erschließung neuer Anwendungsfelder, in denen bisher nur wenig oder gar kein Wasserstoff eingesetzt wird.

Substitution

Der weltweit und bayernweit größte Wasserstoffverbraucher ist bisher die chemische Industrie, die Wasserstoff stofflich für verschiedene Anwendungen einsetzt. Der größte Verbraucher ist dabei die Petrochemie (33%), wo das Gas in großen Mengen zur Hydrierung, zum Hydrocracken und zur Entschwefelung konventioneller Kraftstoffe in Raffinerien eingesetzt wird. Darüber hinaus ist die Synthese von Grundstoffen wie Ammoniak (27%) oder Methanol (11%) ein weiterer Großverbraucher [1]. In einem zukünftigen, nachhaltigen Szenario sind diese Wirtschaftsbereiche durch die Nutzung klimaneutralen Wasserstoffs zu dekarbonisieren oder die Produkte durch nachhaltigere Alternativen (zum Beispiel Synfuels statt petrochemischer Produkte) zu ersetzen.

Neue Anwendungsfelder

Wasserstoff lässt sich in vielen Anwendungen einsetzen, die bisher durch den Gebrauch von fossilen Kohlenwasserstoffen geprägt waren. Eine in der öffentlichen Debatte besonders vielbesprochene Nutzung ist der Einsatz im Verkehrssektor. Dieser steht deutschlandweit für etwa 19% der THG-Emissionen [11]. Wasserstoff kann als Kraftstoff (Wasserstoffmotor) oder als Brennstoff (Brennstoffzellen-Antriebe mit H₂ oder wasserstoffbasierten Brennstoffen) eine prominente Rolle bei der Senkung der Nettotreibhausgasemissionen in diesem Sektor einnehmen. Auch wenn wasserstoffbasierte Mobilität einen schlechteren technischen Wirkungsgrad als batterieelektrische Mobilität aufweist (Infobox 2, S. 10), so ermöglicht sie dennoch im Allgemeinen größere Reichweiten, eine schnellere Betankung und damit eine deutlich erhöhte Betriebsdauer. Damit entspricht wasserstoffbasierte Mobilität überwiegend dem heutigen Nutzerverhalten und ist im Besonderen für Anwendungsfälle geeignet in denen heute Dieselmotoren zum Einsatz kommen: Antriebe für Schiffe, Züge, LKW, Busse, Bau- und Forstmaschinen, landwirtschaftliche Maschinen, Langstrecken-PKW etc. Dabei ist der Übergang zwischen batterie- und wasserstoffbasierten Technologien fließend und muss je nach Business Case angepasst werden (siehe Abbildung 1, S. 8). Auch in Bereichen, in denen lokale Schadstoff- oder Geräuschemissionen vermieden werden sollen und trotzdem eine Dauerverfügbarkeit der Fahrzeuge wünschenswert ist, kommen schon heute verstärkt wasserstoffbasierte Systeme zum Einsatz. Ein Beispiel sind Brennstoffzellen-Flurförderfahrzeuge eines bayerischen Unternehmens, die bereits heute global eingesetzt werden.

Wasserstoff wird sich vermutlich nicht in allen Segmenten des Transportsektors durchsetzen. Allerdings dürfte durch den Einsatz in den oben genannten, besonders prädestinierten Bereichen, eine Kostendegression einsetzen, die der wasserstoffbasierten Mobilität weitere Gebiete erschließen könnte. Dem ÖPNV kann dabei eine besonders hohe Bedeutung zukommen, da zum einen viele der Anwendungen für den Einsatz von Wasserstoff prädestiniert sind und zum anderen die politischen Einflussmöglichkeiten vergleichsweise groß sind. Neben dem Aufbau einer Infrastruktur für Busse und Züge und auch LKW, ist darüber hinaus auch der Ausbau eines Tankstellennetzes für den privaten PKW-Bereich von erheblicher Relevanz. PKW sind immerhin für fast 61% der THG-Emissionen des deutschen Verkehrssektors verantwortlich und zudem besonders geeignet, Wasserstoff für Bürgerinnen und Bürger unmittelbar erlebbar zu machen [11]. Darüber hinaus ist die private PKW-Nutzung nicht so stark von Kostenaspekten getrieben wie beispielsweise Anwendungen in der Logistikbranche.

Wasserstoff macht zudem aufgrund der vergleichsweise einfachen Speicher- und Transportierbarkeit eine zeitliche und räumliche Unabhängigkeit von Erzeugung und Verbrauch möglich. Während der Verbrauch des Wasserstoffs im Mobilitätssektor über das Jahr relativ konstant ist, kann die Wasserstoffproduktion in Deutschland oder in anderen Teilen der Welt an die volatile Stromerzeugung der erneuerbaren Energien angepasst werden. Auf diese Weise gelingt die Integration fluktuierender Quellen Erneuerbarer Energien in das Energiesystem. Dies ist ein großer Vorteil im Vergleich zu batterieelektrischen Mobilitätskonzepten, bei denen der Ladestrom exakt zu der Zeit produziert werden muss, zu der das Fahrzeug aufgeladen wird. Des Weiteren wird die Situation der Ressourcenverfügbarkeit als erheblich unkritischer eingeschätzt als bei Batterien. Zwar wird beispielsweise in Brennstoff-

zellen Platin eingesetzt, die verbaute Menge reduziert sich jedoch von Generation zu Generation erheblich und dürfte mittelfristig sogar unter der von Abgaskatalysatoren vergleichbarer konventioneller PKW liegen. Auch das Recycling von Brennstoffzellenfahrzeugen gelingt aktuell deutlich leichter als bei batterieelektrischen Fahrzeugen, da die Recyclingverfahren beispielsweise für die Verwertung von Katalysatormaterial aus anderen Wirtschaftsbereichen bekannt sind und seit vielen Jahren großskalig eingesetzt werden.

Neben dem Einsatz von elementarem Wasserstoff in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren, der je nach Anwendung in Drucktanks oder tiefkalt mitgeführt wird, können auch Synfuels als Treibstoff eingesetzt werden. Diese sind kompatibel mit konventionellen Treibstoffen wie Diesel, Benzin oder Kerosin und können diese entweder substituieren oder ihnen beigemischt werden und somit die Nettotreibhausgasemissionen der bestehenden Flotten direkt senken. Die Produktionsketten von Synfuels sind allerdings verhältnismäßig aufwendig und führen daher zu hohen Effizienzverlusten und damit erheblich höheren Kraftstoffkosten. Daher sollten synthetische Kraftstoffe vor allem in den Bereichen verwendet werden, in denen Batterien und elementarer Wasserstoff aufgrund der niedrigeren Energiedichten technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll eingesetzt werden können. Dies gilt im Besonderen für den Langstreckenflugverkehr oder den Überseeschiffsverkehr.

Eine interessante Perspektive bietet mittelfristig der Antrieb von Schiffen und größeren Landfahrzeugen mit on-board freigesetztem Wasserstoff aus LOHC-Systemen. Diese Technologie nutzt ebenfalls die Infrastruktur heutiger Kraftstoffe, die Energiewandlung profitiert aber vom höheren Wirkungsgrad der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor. Dies ermöglicht, im Unterschied zu klassischen Synfuels, zudem eine lokale und globale Emissionsfreiheit, da lediglich der chemisch gebundene Wasserstoff nach Abspaltung vom Träger energetisch genutzt wird und es nicht zu einer Verbrennung des gesamten Stoffsystems wie im Fall der Synfuels kommt.

Neben dem Mobilitätssektor ist auch der zukünftige Energiesektor auf Wasserstoff angewiesen. Die Umstellung unseres Stromsystems auf fluktuierende Erneuerbare Energien erfordert den Einsatz von Stromspeichern. Für

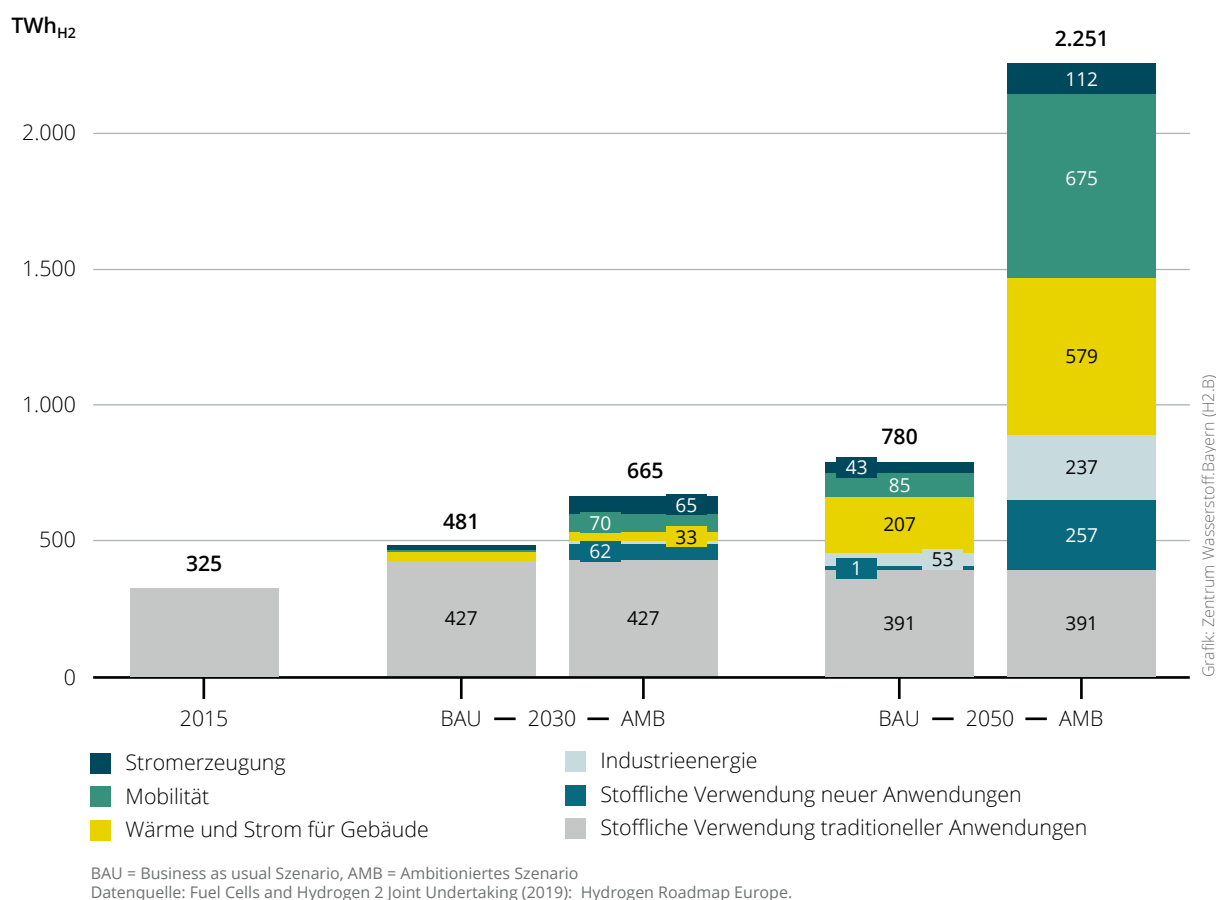


Abbildung 8:

Der Wasserstoffverbrauch in Europa wird bis 2050 in sämtlichen Sektoren erheblich zunehmen [13].

große Mengen und lange Zeiten sind Wasserstoff und wasserstoffbasierte Speicher optimale Systeme. Leistung und Energie lassen sich dabei unabhängig voneinander skalieren. Die Speicherung großer Mengen Energie ist mit chemischen Speichersystemen besonders günstig, was wasserstoffbasierte Anwendungen zur saisonalen Speicherung prädestiniert. Die gute Transportierbarkeit von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten schafft darüber hinaus Versorgungssicherheit für ein zunehmend auf volatilen Erzeugern basierendes System.

Die Industrie benötigt in verschiedenen Prozessen sehr hohe Temperaturen ($>400\text{ °C}$), die aktuell vorwiegend durch Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe wie Kohle, Öl oder Erdgas bereitgestellt werden. Einige Anwendungen lassen sich zwar elektrifizieren, jedoch vor allem großtechnische Prozesse wie Steamcracker und Zementöfen stellen weiterhin eine Herausforderung für eine reinelektrische Beheizung dar. Solche Anlagen müssen dauerhaft zur Verfügung stehen und können nicht je nach Stromangebot dynamisch betrieben werden. Wasserstoff oder wasserstoffbasierte Brennstoffe erscheinen hier als interessante Brennstoffe, gegebenenfalls in hybridisierter Form zusammen mit einer elektrischen Beheizung.

Die Stahlproduktion ist heute für etwa 6-7% [22] der globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Vor allem bei der Eisenerzreduktion durch Koks fallen große Mengen an CO_2 an. Die Direktreduktion mit Wasserstoff bietet eine vielversprechende Möglichkeit, um die Emissionen der Stahlerzeugung deutlich zu reduzieren. Gleiches gilt für die Herstellung verschiedenster organischer Grundstoffe, die heute aus fossilen Ressourcen wie Erdöl und Erdgas hergestellt werden und in Zukunft durch die stoffliche Nutzung von CO_2 und erneuerbarem Wasserstoff über das Zwischenprodukt Methanol produziert werden können. Teilweise sind für die Integration von erneuerbarem Wasserstoff in bestehende Produktionsprozesse erhebliche Investitionen in neue Anlagen- oder Anlagenkomponenten erforderlich, die über viele Jahre abgeschrieben werden müssen. Unternehmen müssen sich daher auch auf stabile regulatorische Rahmenbedingungen verlassen können.

Neben der Bereitstellung von Wärme für industrielle Zwecke, kann Wasserstoff auch zur Defossilisierung von Wärmeenergie im Haushaltsbereich eingesetzt werden. Ein sehr direkter Ansatz ist die anteilige Beimischung von Wasserstoff in das bestehende Gasnetz. Dadurch reduzieren sich die Treibhausgasemissionen direkt ohne Investitionen in die Haustechnik. Die Beimischungsquote wird allerdings durch die Gasnetzinfrastruktur und die eingesetzten Brenner begrenzt. Maximal dürfen aktuell bis zu 10% Wasserstoff dem Gasnetz zugemischt werden [1]. Die Beimischung des Wasserstoffs ins Erdgasnetz ist für Betreiber von Elektrolyseuren eine vergleichsweise einfache Möglichkeit Abnehmer für den produzierten Wasserstoff zu finden und trägt direkt zur Dekarbonisierung des Wärmesektors bei.

Eine weitere Methode zum Einsatz von Wasserstoff im Haushaltsbereich, die noch höhere Gesamtwirkungsgrade verspricht, sind Brennstoffzellenheizungen mit etwa 1-2 kW Leistung, die neben Wärme zusätzlich Strom bereitstellen. Diese Heizungen werden bereits in großen Stückzahlen in Japan (Stand 2019: Über 300.000 BZ-Heizungen [23]) aber auch in Deutschland verbaut. Heutige Systeme nutzen als Brennstoff vorwiegend Erdgas, Propan oder Butan, die je nach eingesetzter Brennstoffzellentechnologie entweder direkt in der Zelle verstromt oder zuerst in einem Reformer in Kohlendioxid und Wasserstoff zerlegt werden. Zukünftig könnten diese Systeme ohne großen Aufwand auf reinen Wasserstoff umgerüstet werden. Neben den Brennstoffzellenheizungen im 1-2 kW Bereich, gibt es stationären Systeme im 10 kW Bereich. Durch die Vernetzung einzelner Einheiten lassen sich je nach Bedarf dezentrale, virtuelle und hocheffiziente Strom- und Wärmelieferanten bis in den 2-stelligen MW Bereich hinein betreiben. Somit können diese virtuellen Kraftwerke die Sektorkopplung und Stabilisierung der Stromverfügbarkeit sicherstellen und dezentral, modular mit dem Energiebedarf wachsen.

4.1.4 H₂-SKALIERUNG

Ein wesentlicher Grund, weshalb sich bislang Wasserstofftechnologien bis auf wenige Ausnahmen nicht großskalig durchsetzen können, sind die vergleichsweise hohen Stückkosten von Schlüsselkomponenten wie Elektrolyseuren, Kompressoren, Brennstoffzellen, Tanks und Konversionseinheiten. Die hohen Kosten liegen in erster Linie in den aktuellen Fertigungsverfahren begründet, die aufgrund der geringen Stückzahlen häufig noch an Manufakturarbeit erinnern. Es ist daher von großer Bedeutung die Stückzahlen zu erhöhen, Fertigungsverfahren anzupassen und dadurch eine Kostendegression zu erreichen, wie sie beispielsweise in der Batterie- oder Photovoltaikbranche bereits eingesetzt hat. Die bayerische Automobil- und Automobilzulieferindustrie hat durch ihre langjährigen Erfahrungen einzigartiges Know-how in der automatisierten Serienfertigung aufgebaut. Dieses

Wissen kann und muss genutzt werden, um auch die Fertigung von Schlüsselkomponenten für die Wasserstoffwirtschaft zu skalieren und dadurch eine exzellente Wettbewerbsposition am Weltmarkt zu sichern.

Neben der industriellen Fertigung ist auch die Erhöhung der Leistung der einzelnen Komponenten ein entscheidender Hebel zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Ein sehr prominentes Beispiel stellt hier die Elektrolyse dar, deren spezifische Investitionskosten bei leistungsstärkeren Anlagen erheblich sinken. Gleiches gilt beispielsweise auch für Transporttechnologien. So reduzieren sich die Kosten erheblich, wenn aufgrund erhöhter Nachfrage auf effizientere Transporttechnologien zurückgegriffen werden kann und der Wasserstoff statt mit Drucktrailern leitungsgebunden, verflüssigt oder chemisch gebunden, transportiert wird.

Bei der Skalierung der verschiedenen Anwendungen ist zwingend auf einen gleichzeitigen Hochlauf der gesamten Wertschöpfungskette zu achten. So ist beispielsweise die Voraussetzung für eine Investitionsentscheidung in eine industrielle Brennstoffzellenfertigung stark von der erwarteten Nachfrage nach den Produkten abhängig. Diese ist in den meisten Fällen nur gegeben, wenn günstiger Wasserstoff zur Verfügung steht. Dafür sind wiederum Investitionen in Erzeugung und Transporttechnologie entscheidend, die ausbleiben würden, wenn es keinen Wasserstoffabnehmer gäbe.

Um sicherzustellen, dass sich die gesamte Wertschöpfungskette abgestimmt entwickeln kann, wird das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) in Zusammenarbeit mit dem Wasserstoffbündnis Bayern eine Roadmap entwickeln, die Meilensteine, Ziele und Einschätzungen der beteiligten Unternehmen, Verbände und Institutionen zusammenfasst.

4.2 VERSTÄNDNIS GESELLSCHAFTLICHER ANLIEGEN MIT BLICK AUF SICHERHEIT UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Um etwaige Akzeptanzprobleme frühzeitig zu erkennen, bedarf es einer grundlegenden Ermittlung und Analyse von Verteilungswirkungen entlang der Wertschöpfungskette. Sofern möglich, sollten Profiteure und Benachteiligte identifiziert werden. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Effekte sollte die Analyse positive und negative Auswirkungen auf der Mikro-, Meso- und Makroebene umfassen. So sind beispielsweise negative Einkommenseffekte durch Preiserhöhungen direkt und individuell wahrnehmbare Folgen, welche die Akzeptanzbereitschaft reduzieren können, wogegen Mehrbeschäftigung und Einkommenssteigerung durch erhöhte Güternachfrage wiederum positive gesellschaftliche Effekte haben können.

Wesentliche Faktoren, die die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstoff bedingen, sind das Wissen zum Thema Wasserstoff sowie das Vertrauen in Wasserstofftechnologien (und deren Akteure). Das Wissen zu Wasserstoff ist momentan in der Gesellschaft heterogen verteilt und überwiegend gering. Zudem gibt es noch kein vorherrschendes Meinungsbild zu Wasserstoff. Daraus resultiert ein hohes Potenzial, den Begriff Wasserstoff positiv zu besetzen und etwaige Vorbehalte und Sicherheitsbedenken in der Öffentlichkeit durch Informationskampagnen und positive Erlebnisse (wie beispielsweise Roadshows) abzubauen. Dabei sollten jedoch keine überhöhten Erwartungen geweckt, sondern realistische Entwicklungspfade und Visionen aufgezeigt werden. Eine strategische Kommunikation, die die positiven Effekte hervorhebt, aber auch mögliche negative Auswirkungen thematisiert, kann der Schlüssel für eine langfristige, nachhaltige gesellschaftliche Akzeptanz sein. Diese transparente Kommunikation sollte, wenn möglich, durch anerkannte Organisationen und Experten gestützt werden.

Akzeptanzfördernde Maßnahmen sind beispielsweise:

- Berührungsformate, die der gesellschaftlichen Erfahrung mit Wasserstoff und der Information dienen (zum Beispiel Roadshows, Sternfahrten mit Brennstoffzellenfahrzeugen, Mitmachaktionen)
- Demonstrationsprojekte, welche die Funktion und den direkten Nutzen von Wasserstofftechnologien erfahrbar machen (zum Beispiel stationäre Brennstoffzellen)
- Öffentliche Informationsveranstaltungen mit Expertenvorträgen
- Medienpräsenz

Bei der Ausgestaltung des Rollouts ist eine frühzeitige Einbindung und Information aller direkter und indirekter Stakeholder unabdingbar. So ist ein Austausch mit Arbeitgeberverbänden und Gewerkschaften ebenso wichtig wie der Einbezug der Bevölkerung. Durch eine bidirektionale Kommunikation „auf Augenhöhe“ können Vorurteile (beispielsweise hinsichtlich Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Verteilungswirkungen) abgebaut und Kritikpunkte frühzeitig adressiert werden. Bei der Realisierung von wasserstoffbezogenen Projekten sollten Umweltauswirkungen auf sensible Ökosysteme vermieden werden.

Eine breite gesellschaftliche Akzeptanz reduziert Investitionsunsicherheit. Die aktuell dynamischen gesellschaftlichen Bestrebungen und Forderungen im Bereich nachhaltiger Technologien sollten dabei aufgegriffen werden. Ein geringeres Risiko von Protesten gegen Energievorhaben, betriebliche Umstrukturierungen und Preisanpassungen sowie eine hohe Nachfrage nach Wasserstofftechnologien erhöht die mittel- und langfristige Planungssicherheit. Ebenso fördern langfristige, stabile (inter-)nationale Partnerschaften auf Augenhöhe zwischen Produzenten und Konsumenten die Planungs- und somit auch Investitionssicherheit. Hier gilt es Win-Win-Szenarien zwischen den Partnern zu suchen. Aufbau von strategischen Partnerschaften

4.3 AUFBAU VON STRATEGISCHEN PARTNERSCHAFTEN

Für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft ist die Koordination und Interaktion verschiedener Akteure unabdingbar. Dies gilt sowohl für Akteure entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette als auch für den Aufbau nationaler und internationaler Partnerschaften.

4.3.1 ERZEUGER, LOGISTIKER UND VERBRAUCHER KOORDINIEREN

Eine große Herausforderung bei der Umsetzung von Wasserstoffprojekten ist das Zusammenspiel entlang der Wertschöpfungskette. Viele der bestehenden Lieferketten werden sich aufgrund geänderter Erzeugungs- und Verbrauchsmuster in Zukunft erheblich umstrukturieren. So wurde zum Beispiel grauer Wasserstoff bisher verbrauchsnahe aus fossilen Energieträgern erzeugt. Die Vorzugsregionen für die Produktion von grünem Wasserstoff liegen jedoch oft weit entfernt von den großen Industriezentren. Die Wasserstoffproduzenten von morgen sind nicht mehr ausschließlich die bekannten großen Gaslieferanten. Es werden vielmehr neue Akteure in den Markt eintreten und damit auch ganz neue Geschäftsmodelle entstehen. Als Produzenten von grünem Wasserstoff können Betreiber von Windkraftparks oder Biogasanlagen in den Markt eintreten. Diese neuen potenziellen Anbieter von Wasserstoff kennen den Markt und ihre potenziellen Kunden nicht. Logistikunternehmen oder Gasanbieter können Mittler zwischen Produzenten und Konsumenten werden. Klassische „Henne-Ei“-Probleme können perspektivisch durch strategische Partnerschaften und Kooperationsvereinbarungen adressiert und gelöst werden.

4.3.2 NATIONALE, INTERNATIONALE PARTNERSCHAFTEN AUFBAUEN

Wasserstoff macht Erneuerbare Energien weltweit handelbar. Sowohl Deutschland als auch Bayern werden aufgrund des hohen Industrialisierungsgrades und des vergleichsweise geringen EE-Potenzials zu den Nettoimporteuren wasserstoffbasierter Produkte gehören. Daher müssen frühzeitig strategische Partnerschaften mit möglichen Exportländern geschlossen werden. Dabei muss darauf hingearbeitet werden, dass mögliche Partnerländer den Prozess antizipieren und proaktiv mitgestalten. Neben den bisher Erdöl oder Gas exportierenden Ländern gibt es viele weitere Länder, die über hervorragende Standorte für die Produktion von grünem Wasserstoff verfügen. Frühzeitige Anbahnung von Partnerschaften kann daher die deutsche Position im internationalen Energiehandel verbessern und gleichzeitig das Potenzial für den Export von Industrieanlagen eröffnen. Bei Kooperationen mit Entwicklungs- und Schwellenländern sollte auf eine Partnerschaft auf Augenhöhe hingearbeitet werden. Der Energieexport dieser Länder darf insbesondere nicht zu Lasten ihrer heimischen Energieversorgung geschehen.

Neben dem Importprodukt Wasserstoff selbst muss auch der Zugang zu weiteren strategischen Ressourcen wie Platin oder seltenen Erdmetallen gesichert werden, die für die Produktion von Schlüsselkomponenten der Wasserstoffwirtschaft benötigt werden (zum Beispiel Brennstoffzellen). Im Gegenzug könnten bayerische und

deutsche Unternehmen Kooperationen eingehen, um Maschinen und Anlagen zur Wasserstoffherzeugung und -verarbeitung zu exportieren. Auch die Umsetzung der Logistik kann durch bayerische und deutsche Unternehmen erfolgen. Auf diese Weise entsteht ein großer Teil der Wertschöpfung im Land, selbst wenn in Bayern und Deutschland nicht im großen Maßstab Wasserstoff produziert wird. Ein engagiertes Handeln ermöglicht es bayerischen und deutschen Unternehmen zudem, künftige Standards und Normen der Wasserstoffwirtschaft mitzugestalten. Hier sind die Unternehmen in der Pflicht, sich stärker in Normierungsgremien zu engagieren, in denen deutsche Firmen bisher unterrepräsentiert sind.

4.4 ENERGIEPOLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Herausforderung bei Wasserstoffprojekten ist oftmals nicht eine mangelnde Reife der Technologien, sondern vielmehr der energiepolitischen Rahmen, unter denen die Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen nicht gegeben ist. Insbesondere spiegeln sich die sozialen Kosten von Emissionen noch immer nicht in den Preisen wider und Ansätze zur Sektorkopplung werden durch hohe staatlich induzierte Preisbestandteile beim Strompreis (Steuern, Abgaben, Umlagen) behindert.

Die Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Ressourcen liegt in Deutschland bei deutlich unter 2 €/kg. Die Kosten für Wasserstoff aus Elektrolyse liegen je nach Technologie, Strompreis und Auslastung bei erheblich höheren Werten. Ohne die Internalisierung externer Kosten (Umweltverschmutzung etc.) wird sich dieses Verhältnis nicht grundlegend ändern und grüner Wasserstoff über lange Zeit nicht wettbewerbsfähig werden.

Die Herstellungskosten für Elektrolysewasserstoff sind sehr stark vom Strompreis getrieben. Das aktuelle Steuer- und Abgabensystem im Strombereich begünstigt aktuell eine On-site Produktion ohne Netzzugang auf der einen Seite und Großanlagen auf der anderen Seite. Letztere sind weitgehend von Abgaben und Umlagen befreit. Um mit geringer Fehlbedarfsförderung eine dezentrale Wasserstoffproduktion in Bayern und Deutschland zu schaffen, muss die Last der staatlich induzierten Strompreisbestandteile erheblich gesenkt werden.

Das Potenzial für Erneuerbare Energien ist europaweit sehr unterschiedlich. In Vorzugsregionen könnten Strom und Wasserstoff sehr günstig hergestellt werden. EU-weit wird aktuell die Schaffung eines Strombinnenmarkts angestrebt. Das gleicht regionale Preisunterschiede eher an, die unterschiedliche Voraussetzungen für die Produktion von Grünstrom reflektieren würden.

Der Einsatz von grünem Wasserstoff muss sich lohnen, zum Beispiel indem er die Emissionsbilanz der Unternehmen verbessert. Daher ist es wichtig, dass zertifizierter CO₂-reduzierter Wasserstoff auf die Reduktionsziele der Industrie angerechnet werden kann. Die Zertifikate müssen dabei mindestens europaweit gehandelt werden können. Bisher existiert ein solches Zertifizierungssystem nicht.

Sämtliche Rahmenbedingungen müssen derart ausgestaltet sein, dass eine volkswirtschaftlich möglichst sinnvolle Systementwicklung angereizt wird. Darüber hinaus müssen die Rahmenbedingungen verlässlich und planbar etabliert werden. In den kommenden Jahren sind sehr große Investitionen in Forschung und Entwicklung notwendig, um Wasserstofftechnologien und deren Produktion in industriellem Maßstab zu entwickeln. Dazu müssen Unternehmen verschiedener Branchen auf ein verlässliches Vorgehen der Politik vertrauen können.

Mit Blick auf die Rahmenbedingungen gibt es einen Trade-Off zwischen der Förderung des Markthochlaufs unter ungünstigen energiepolitischen Rahmenbedingungen und der Anpassung ebendieser Rahmenbedingungen. Eine Koordination von Akteuren und deren gezielte Förderung ist umso wichtiger, je weniger es gelingt, marktliche Elemente zur Steuerung wirtschaftlichen Handelns zu etablieren (CO₂-Bepreisung, Reduktion von staatlich induzierten Strompreisbestandteilen).

4.5 INVESTITIONEN UND FINANZIERUNG

Nachhaltigkeit spielt auch im Finanz- und Versicherungswesen eine immer größere Rolle. Durch das wachsende Umweltbewusstsein der Bevölkerung steigt auch der Druck auf die Banken und Kapitalanlagegesellschaften, sozialverträgliche und nachhaltige Produkte anzubieten. Auch die europäische und bundesdeutsche Politik reagiert und will mit gezielten Änderungen der politischen Rahmenbedingungen Investitionen in nachhaltige Unternehmen erhöhen. Mit dem von der EU angepeilten „Green-Deal“ sowie der geplanten Taxonomie für nachhaltige Unternehmungen (auch als ESG – „Environmental, Social, Green“-Kriterien bekannt) könnten Green-Investments für Banken und Kapitalanlagegesellschaften wegen der damit verbundenen Eigenkapital-Entlastung attraktiver werden als bisher. Dadurch sollen Anreize für private Investitionen in umweltfreundliche Produkte geschaffen werden und somit helfen, die Klimaziele der EU zu erreichen. Der „Sustainable-Finance-Beirat“ (SFB) der Bundesregierung empfiehlt darüber hinaus, dass künftig Bundesabsicherungen für Export-Kredite nur noch dann möglich sein sollen, wenn der Finanzkredit nicht die Pariser Klimaschutzziele oder die UN-Nachhaltigkeitsziele gefährdet. Bei der Umsetzung dieser Maßnahmen sollten nationale Alleingänge wenn möglich vermieden werden.

Neben dem politischen und gesellschaftlichen Druck bildet auch das aktuell günstige Zinsniveau ideale Voraussetzungen für Investitionen in neue Technologien und Infrastrukturen. Gerade bei kapitalintensiven Technologien kann der Zinssatz eine entscheidende Größe mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit darstellen.

5. ZIELE UND AMBITIONEN FÜR BAYERN: WARUM? WOHN? WIE?

Warum?

Vor dem Hintergrund des Klimawandels müssen sich Bayern und Deutschland hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem wandeln. Wasserstoff wird ein zentraler Baustein der Defossilisierung verschiedener Sektoren sein und bietet gleichzeitig ein enormes wirtschaftliches Potenzial für Bayern. Viele Nationen, vor allem aus dem asiatischen Raum, haben dieses Potenzial bereits erkannt und tätigen schon heute hohe Investitionen, um bei Wasserstofftechnologien Weltmarktführer zu werden oder ihre bereits geschaffene Wettbewerbsposition zu verteidigen. Dadurch entsteht ein kompetitives Marktumfeld, in dem es gilt, durch entschlossenes, strategisches Handeln die deutsche Technologieführerschaft zu behaupten und einen neuen technologischen Vorsprung zu erreichen. Die bayerische/deutsche Industrie ist mit ihrem starken Maschinen- und Anlagenbau, der Automobil und Automobilzulieferindustrie sowie der chemischen Industrie sehr gut aufgestellt, um große Teile der Wasserstoffwertschöpfungskette zu bedienen. Um sich eine führende Position im internationalen Wettbewerb zu erarbeiten ist jedoch ein weitsichtiges und ambitioniertes Vorgehen der Unternehmen von großer Bedeutung. Zukünftige Wettbewerbsfähigkeit macht jetzt Investitionen nötig, die möglicherweise nicht zu kurzfristigen Gewinnen führen werden, aber langfristig Marktanteile und den Erhalt von Arbeitsplätzen sichern. Dies gilt im Besonderen für die im Umbruch stehende bayerische Automobil- und Automobilzulieferindustrie. Wasserstofftechnologien eröffnen diesen und vielen weiteren Unternehmen attraktive neue Geschäftsfelder, in denen häufig bekannte Kompetenzen und Fertigkeiten weiter genutzt werden können.

Wohin?

Um die Potenziale einer weltweiten Wasserstoffwirtschaft effektiv zu entfalten braucht es ein gemeinsames Zielbild, an dem sich die Akteure orientieren können. Zentrale Ambitionen einer bayerischen Wasserstoffstrategie sind:

- Bayerische Unternehmen sollen weltweit führende Anbieter von Wasserstofftechnologien entlang aller Handlungsfelder werden und so neue Märkte in einem sich stark wandelenden Wirtschaftssystem erschließen.
- Bayern wird seine führende Position in Forschung und Entwicklung im Bereich von Wasserstofftechnologien verteidigen und weiter ausbauen. Durch einen beschleunigten Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis werden auf einer kurzen Zeitschiene marktfähige Produkte geschaffen und die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft gestärkt.
- Bayern wird weltweit führend in der Ausbildung von Fachkräften für die Wasserstoffwirtschaft von morgen sein und sich dadurch auf den strukturellen Wandel der heimischen Industrie vorbereiten.
- Bayern wird sich auf den Import von erneuerbaren Energieäquivalenten vorbereiten und dafür bestehende Partnerschaften festigen und neue Partnerschaften eingehen.
- Bayern wird die heimische Wasserstoffinfrastruktur massiv ausbauen, um eine effiziente Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung des Energieträgers zu gewährleisten.
- Langfristiges Ziel muss der Einsatz von grünem Wasserstoff sein. In einer möglichst kurzen Übergangsphase kann auch auf blauen Wasserstoff zurückgegriffen werden, solange dieser für die Erreichung der Klimaziele und den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft benötigt wird.

Wie?

Zum Erreichen dieses Zielbildes ist ein koordiniertes strategisches Vorgehen notwendig:

- Bayern braucht eine Wasserstoffstrategie, die relevante Handlungsfelder identifiziert und einen Aktionsplan skizziert, der stetig weiterentwickelt wird. Aufbauend auf der Strategie muss eine Roadmap entwickelt und stetig angepasst werden, die wichtigen Meilensteine auf dem Weg in eine bayerische Wasserstoffwirtschaft skizziert und die Akteure koordiniert.

- Es müssen Demonstrationsprojekte und Markteinführungsprogramme aufgesetzt werden, die einen simultanen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette bewirken. Dabei ist eine enge Koordination mit der Wissenschaft notwendig, um Erkenntnisse für die Anpassung von Meilensteinen nutzen zu können, Innovationszyklen zu verkürzen und zielgerichtet Fachkräfte von morgen auszubilden.
- Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft muss durch eine breite Netzwerk- und Öffentlichkeitsarbeit begleitet werden, um nationale und internationale Kooperationen zu beschleunigen und die Bevölkerung frühzeitig einzubinden.

6. GOVERNANCE, POLITISCHE FORDERUNGEN, KONKRETE MASSNAHMEN UND ROADMAP

Der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft kann nur durch starke Strukturen und ein engagiertes Handeln aller beteiligter Institutionen und Unternehmen gelingen. Die bayerische Staatsregierung hat mit der Gründung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) und des Wasserstoffbündnis Bayern einen ersten wichtigen Schritt getan. Neben der Entfaltung von Aktivitäten in Bayern sind insbesondere die Bundesregierung und die Europäischen Union aufgerufen, günstige energiepolitische Rahmenbedingungen, maßgeschneiderte Förderprogramme sowie den Aufbau zentraler Infrastrukturen zu schaffen.

6.1 FAHRPLAN FÜR DIE SKALIERUNG DER WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Die bayerische Staatsregierung hat im September 2019 das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) und das Wasserstoffbündnis Bayern ins Leben gerufen. Das Zentrum bringt Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammen, um die „Wasserstoffwirtschaft“ und insbesondere Wasserstoff in der Mobilität in Bayern schnellstmöglich voranzubringen und den Einsatz von Wasserstoff technologieoffen in der breiten Praxisanwendung zu erreichen. Das Zentrum bildet die Schnittstelle zwischen den zahlreichen Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, trägt dazu bei, dass die technologischen Handlungsfelder gleichmäßig entwickelt werden und kooperiert dabei mit Einrichtungen auf Bundesebene, Einrichtungen anderer Länder und ausgewählten Akteuren im internationalen Umfeld.

Die Aktivitäten des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) umfassen drei Bereiche:

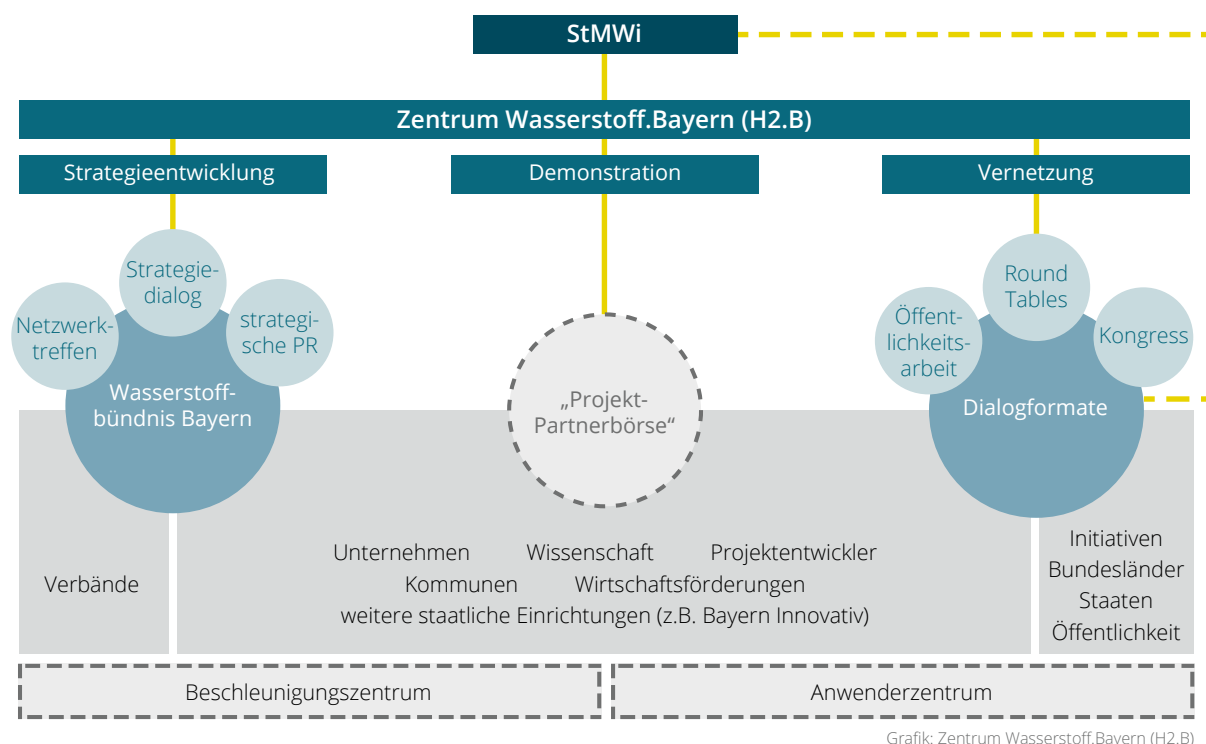
- Zusammen mit dem Wasserstoffbündnis Bayern – einem Zusammenschluss von derzeit 30 Industrieunternehmen, Mittelständlern und Verbänden – erarbeitet das Zentrum ein Positionspapier als Grundlage für eine bayerische Wasserstoffstrategie. Die intensive Einbeziehung zahlreicher Akteure einer künftigen Wasserstoffwirtschaft garantiert, dass bei der Entwicklung von Handlungsempfehlungen und politischen Forderungen die Bedürfnisse der Akteure von Beginn an wahrgenommen werden. Eine Weiterentwicklung des Strategiepapiers hin zu einer Roadmap soll ebenfalls in einem Beteiligungsprozess realisiert werden.
- Das Zentrum initiiert Demonstrationsprojekte, die innovative Wasserstofftechnologien erfolgreich im Real Einsatz demonstrieren und den umfassenden Einsatz von Wasserstofftechnologien im Realbetrieb vorbereiten sollen. Die Demonstrationsprojekte werden durch wissenschaftliche Projekte und technoökonomische Studien flankiert. Durch die Demonstrationsprojekte soll das technologische, ökonomische und ökologische Potenzial der jeweiligen Wasserstofftechnologien untereinander und im Vergleich zum Stand der Technik bewertet, Schwachstellen identifiziert, Roadmaps zur weiteren Entwicklung definiert und mögliche Skaleneffekte (Rohstoffverfügbarkeit, Genehmigungsrecht, Akzeptanz etc.) bei der großflächigen Umsetzung untersucht werden.
- Das Zentrum betreibt Netzwerkaktivitäten und Öffentlichkeitsarbeit, um den Aufbau nationaler und internationaler Kooperationen zu beschleunigen und um die allgemeine Wahrnehmung der Technologien und ihrer Perspektiven zu steigern. Durch die umfassende Koordination der Aktivitäten und die enge Verbindung des Zentrums zum bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie soll eine signifikante Beschleunigung der Aktivitäten erreicht werden. Das geschieht zum einen durch die schnellere Koordination von Aktivitäten, zum anderen auch durch die Reduktion von Investitionsunsicherheiten mittels eines verlässlichen regulatorischen Umfelds.

Perspektivisch ist der Aufbau einer Projektpartnerbörse angedacht. Auf dieser Plattform treffen sich Unternehmen, Kommunen, Wissenschaftler und Projektentwickler, um Projektvorhaben abzustimmen und geeignete Partner für die Umsetzung zu finden. Das Netzwerk kann zu Beginn aus Stakeholdern bestehen, die bereits mit dem

H2.B in Kontakt stehen und zukünftig auch über die Grenzen Bayerns hinweg ausgerollt werden.

Darüber hinaus fungiert das H2.B als Schnittstelle zu kommunalen Initiativen wie den HyLand-Regionen, Real-laboren sowie zu den kommunalen Wirtschaftsförderungen und überregionalen Einrichtungen des Technologietransfers wie Bayern Innovativ.

Das Zentrum Wasserstoff.Bayern unterstützt die Gründung und Ansiedlung von Beschleunigungs- und Anwenderzentren, zum Beispiel durch die Organisation von Netzwerktreffen zur Ermittlung der Bedarfe verschiedener Stakeholder aus Wirtschaft und Wissenschaft.



Grafik: Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B)

Abbildung 9:
Governance zur Entwicklung und Umsetzung der bayerischen Wasserstoffstrategie

6.2 POLITISCHE FORDERUNGEN AN DEN BUND UND DIE EUROPÄISCHE UNION

Die für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft notwendige Transformation von Industrien und Wirtschaftszweigen erfordert stabile und günstige energiepolitische Rahmenbedingungen, maßgeschneiderte Förderprogramme sowie den Aufbau zentraler Infrastrukturen. Als rechtsetzende Instanz ist dabei vor allem der Bund aber auch die Europäische Union in der Verantwortung.

Das Wasserstoffbündnis Bayern sieht folgende zentrale politische Handlungsfelder:

- Der Rollout von Wasserstofftechnologien im großen Maßstab erfordert eine Förderung in maßgeschneiderten, koordinierten Programmen. Es gilt jedoch: Je eher tragfähige Geschäftsmodelle für innovative Wasserstofftechnologien aus den energiepolitischen Rahmenbedingungen heraus möglich werden, umso geringer ist der Bedarf an Fördermitteln. Sektorenübergreifende, faire Marktzutrittschancen für alle klimafreundlichen Technologien müssen daher oberste Priorität haben.
- Eine grundlegende Überarbeitung des Systems der Umlagen und Abgaben im Stromsektor ist unbedingt anzustreben. Eine Energiepreisreform muss hohe staatlich induzierte Preisbestandteile (Umlagen, Steuern,

Abgaben, hier insb. die EEG-Umlage) beim Strom reduzieren, um eine effektive Sektorkopplung und somit die möglichst kostengünstige Produktion von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen zu ermöglichen.

- Es wird erwartet, dass die Kosten klimaschädlicher Technologien durch steigende CO₂-Preise schrittweise angehoben werden. Dies senkt nicht nur die Notwendigkeit staatlicher Förderung zum Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft, es sendet auch klare Innovationssignale in Richtung der Industrie und unterstützt somit eine rasche Transformation und die Entwicklung zukunftsweisender Geschäftsmodelle auf der Basis Erneuerbarer Energien. Zur Vermeidung eines Wettbewerbsnachteils aufgrund einer ambitionierten Klimaschutzgesetzgebung in Europa sollte die Möglichkeit von *border carbon adjustments* überprüft werden.
- Eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen kann durch die Einführung von Experimentierklauseln im Rahmen von Demonstrationsprojekten vorbereitet werden. Wirksame regulatorische Stellschrauben können so im Rahmen von Pilotprojekten identifiziert werden. Die Anwendung von Experimentierklauseln sollte an dem Potenzial wirtschaftlicher Wertschöpfung gemessen werden.
- Ein europaweites Herkunftsnachweissystem für CO₂-reduzierten Wasserstoff ist auf einer kurzen Zeitachse einzuführen, so dass Erneuerbare Energie auch in Form von Wasserstoff gehandelt werden kann. Dies schafft die Grundlage dafür, dass Unternehmen, die dem Emissionshandelsmechanismus oder Anforderungen an ihre Emissionsbilanz unterliegen (zum Beispiel durch Anforderungen ihrer Kunden), diese Anforderungen auch durch den Einsatz CO₂-reduzierten Wasserstoffs erfüllen können.
- Im Bereich der Mobilität sind technologie neutrale politische und regulatorische Rahmenbedingungen für die Beschaffung und den Betrieb von emissionsfreien und emissionsarmen Fahrzeugen anzustreben. Dazu ist unter anderem die Quote für Erneuerbare Energien im Verkehr in 2030 auf mindestens 20% anzuheben.
- Neben dem Ausbau der Ladesäuleninfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge muss auch die Tankstelleninfrastruktur für die Wasserstoffmobilität ambitioniert ausgebaut werden und ein entsprechender EU-weiter Ausbau eingefordert werden.
- Planung und Aufbau eines Leitungssystems für Wasserstoff in Deutschland und Europa (Backbones). Die Bundesnetzagentur soll mit der Koordination einer integrierten Planung von Strom-, Erdgas- und Wasserstoffnetzen beauftragt werden. Darüber hinaus ist ein Rechtsrahmen für die Umstellung von Erdgas- in H₂-Netzen und die regulatorische Berücksichtigung der H₂-Readiness der Gasnetze zu schaffen.
- Dem ÖPNV kommt bei der Einführung von Wasserstofftechnologie im Mobilitätssektor eine besondere Bedeutung zu. Die Betreiber des ÖPNV sollten daher durch Investitionszuschüsse beim Kauf von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen unterstützt werden.
- Die zulässigen Beimischungsquoten für Wasserstoff im Gasnetz sollten überprüft und ggf. erhöht werden.
- Die Förderung von Maßnahmen zum Einsatz von CO₂-reduzierten Gasen wie Wasserstoff muss weiter ausgebaut werden.
- Die heimische Wasserstoffproduktion wird zukünftig maßgeblich durch elektrolytische Spaltung von Wasser geprägt sein. Ein konsequenter Ausbau der Erneuerbaren Energien ist daher auch für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft essenziell.
- Es müssen rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den wirtschaftlichen Betrieb von EE-Anlagen auch nach Ablauf der zwanzigjährigen Förderung ermöglichen, um zu verhindern, dass noch funktionsfähige Anlagen im großen Maßstab abgebaut werden.
- Direkte und indirekte Subventionen umweltschädlicher wirtschaftlicher Aktivitäten verzerren den Wettbewerb zu Lasten umweltfreundlicher Technologien und müssen daher schrittweise abgeschafft werden. Dies muss mit Rücksicht auf die im internationalen Wettbewerb stehende Industrie geschehen.
- Genehmigungsverfahren, etwa für den Bau von Wasserstofftankstellen und Elektrolyseuren, müssen erheblich beschleunigt werden.
- Maßnahmen, die bereits heute die Investition und den Betrieb von Wasserstofftechnologien begünstigen, wie etwa die Befreiung der Maut für Nullemissions-LKW, müssen konsequent weiter umgesetzt werden.

6.3 HANDLUNGSPOTENZIAL FÜR DEN FREISTAAT BAYERN UND FÖRDERUNG BAYERISCHER UNTERNEHMEN

Auch der Freistaat Bayern hat umfassende Möglichkeiten, die Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln und den Markthochlauf signifikant zu beschleunigen.

Maßgeschneiderte Förderprogramme

1. Im Rahmen eines bayerischen Aktionsplans Wasserstoff müssen Demonstrationsprojekte initiiert werden, die bestehende und zukünftige Förderprogramme der EU, des Bundes und der Länder nutzen. Bayerische Förderprogramme sollten die Förderung von Bund und EU zielgerichtet ergänzen und können auch als Beschleuniger dienen, um Initiativen schneller umsetzen zu können. Bei der Ausgestaltung der Projekte müssen künftige Rahmenbedingungen, zum Beispiel die Möglichkeiten der Förderung von Betriebskosten, frühzeitig geprüft werden. Unerlässlich für den koordinierten Hochlauf ist die Förderung einer flankierenden Forschung, um kontinuierlich das technologische, ökonomische und ökologische Potenzial der jeweiligen Wasserstofftechnologien untereinander und im Vergleich zum Stand der Technik zu bewerten, Schwachstellen zu identifizieren und mögliche Skaleneffekte (Rohstoffverfügbarkeit, Genehmigungsrecht, Akzeptanz etc.) bei der großflächigen Umsetzung untersuchen zu können. Erkenntnisse aus den Demonstrationsprojekten sollten einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.
2. Ausgewählte Mobilitäts- und Wasserstoffprojekte sind besonders zu fördern, um die Ziele eines emissionsfreien Verkehrs und der Energieerzeugung in dem von der Politik vorgegebenen zeitlichen Rahmen umzusetzen.
 - a. Öffentliche Beschaffung von Nullemissionsfahrzeugen; ambitioniertere Quoten für öffentliche Ausschreibungen als von der Clean Vehicle Directive vorgeschrieben.
 - b. Beschleunigter Aufbau der Tankstelleninfrastruktur an strategisch wichtigen Punkten mit 350 und 700 bar-Technologie. Betrieb hochfrequentierter Wasserstofftankstellen an Orten mit Mehrfachnutzung (zum Beispiel PKW, LKW, Bus und Bahn).

Aufbau belastbarer Netzwerke

3. Aufbau eines koordinierten Netzwerkes zwischen Industrie und Hochschulen, um einen bestmöglichen Austausch zwischen den Partnern zu erreichen.
4. Gemeinsame Nutzung von Forschungs- und Entwicklungsinfrastrukturen, Identifikation attraktiver Technologiepfade und Anwendungen.

Flankierende Forschung

5. Erkenntnisse wasserstoffrelevanter Forschung sollten zentral, zum Beispiel über das H2.B gebündelt werden. Dies ermöglicht die Evaluierung einer Vielzahl von Projekten und Synergieeffekte für zukünftige Vorhaben. Ausgewählte Ergebnisse könnten nach Zustimmung der beteiligten Partner in Datenbanken öffentlich zugänglich gemacht werden und so zu einer steileren Lernkurve beitragen.

Beschleunigungs- und Anwenderzentren

6. Bayern braucht ein „Beschleunigungstechnikum Wasserstoff“. In dem Zentrum soll Fertigungskompetenz für die Produktion von Schlüsselkomponenten gebündelt und weiter ausgebaut werden. Schwerpunkte des Beschleunigungstechnikums reichen vom Grundlagenverständnis bis in die marktreife Anwendung hinein. Starke Industrieanbindung sollen Entwicklungszeiten massiv verkürzen und innovative, Wasserstoff-spezifische Produktions- und Apparatetechnologien schnellstmöglich zur Marktreife führen.
7. Bayern braucht ein „Test-, Zertifizierungs- und Standardisierungszentrum“. Hier soll das bestmögliche Zusammenspiel von Entwicklung, Skalierung, industrieller Fertigung, Validierung durch Testung, Zertifizierung und Standardisierung realisiert werden.

Ausbildung von Fachkräften

8. Bayern braucht zusätzliche Ausbildungs- und Studienplätze im Bereich der Wasserstofftechnologien und -wirtschaft, um exzellente Fachkräfte auszubilden. Die Beschleunigungs- und Anwenderzentren können sehr wertvolle Bausteine einer zwingend erforderlichen Aus- und Weiterbildungsstrategie sein, die Fachkräfte für die zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Bayern zur Verfügung stellt.

Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation

9. Im Rahmen einer koordinierten Öffentlichkeitsarbeit müssen potenzielle Bedenken gesellschaftlicher Gruppen proaktiv adressiert werden. Bereits früh müssen Erfolgsgeschichten aus Demonstrationsprojekten identifiziert und in geeigneten Formaten gegenüber der Öffentlichkeit dargestellt werden. Darüber hinaus sind Kommunikationsstrategien zu entwickeln.

Aufbau internationaler Kontakte

10. Die bayerischen Repräsentanzen sind verstärkt bei der Initiierung internationaler Kontakte einzubinden.

6.4 ROADMAP FÜR DIE SKALIERUNG DER WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Die bayerische Wasserstoffwirtschaft muss jetzt entwickelt und die richtigen Weichen für die Zukunft gestellt werden. Dazu muss – unmittelbar nach Vorlage einer bayerischen Wasserstoffstrategie – von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft eine Roadmap erarbeitet werden, die relevante, technologische Meilensteine identifiziert und ausweist und den sektorenspezifischen CO₂-Zielen bis 2030/2050 Rechnung trägt. Diese stärkt das Vertrauen aller Akteure in den politischen Willen und kann für handelnde Unternehmen als Richtschnur dienen. Entlang dieser Roadmap sollten je nach Technologie-Reifegrad geeignete Maßnahmen und Demonstrationsprojekte für Wasserstofftechnologien erarbeitet und umgesetzt werden. In diesem abschließenden Kapitel wird ein grober Entwurf einer Roadmap skizziert, der relevante Meilensteine für Bayern enthalten kann. Dabei ist zu beachten, dass der Erfolg oder Misserfolg beim Erreichen der gesetzten Ziele in erheblichem Maße von dem Zusammenspiel gesetzlicher Rahmenbedingungen und geeigneter Förderprogramme abhängig ist. Die Meilensteine der Roadmap stehen somit in engem Zusammenhang mit der Schaffung von Rahmenbedingungen und Förderprogrammen. Dies muss in der Roadmap zum Ausdruck kommen, die zeitnah mit den Akteuren des Wasserstoff Bündnisses erarbeitet wird. Darüber hinaus sollten vom H2.B koordinierte wissenschaftliche Untersuchungen und Studien angefertigt werden, die beispielsweise heutige und zukünftige Wasserstoffquellen und -senken räumlich aufgeschlüsselt abschätzen, um daraus Schlussfolgerungen zu optimierten Logistikkonzepten ableiten zu können.

Der benötigte CO₂-freie Wasserstoff entstammt entweder regionaler Erzeugung (aus Elektrolyse, Biomasse oder als Nebenprodukt) oder wird importiert. Die Elektrolysekapazität in Bayern muss sukzessive gesteigert werden. Dabei ist auf die Einbindung der Elektrolyseanlagen in Gesamtsysteme zu achten, um möglichst profitable Betreibermodelle zu entwickeln. Der Import von grünem Wasserstoff aus Vorzugsregionen wie Norddeutschland oder dem europäischen beziehungsweise globalen Ausland muss beginnen. Dabei sollte ein technologieoffener Ansatz bei den eingesetzten Logistikkonzepten gewählt werden.

Für einen erfolgreichen Rollout der Wasserstoffwirtschaft, muss sowohl ein Angebot von (grünem) Wasserstoff als auch eine Nachfrage geschaffen werden. Der Mobilitätssektor kann dabei eine entscheidende Rolle spielen. Der schnelle Hochlauf der Fahrzeugzahlen wird nicht ohne ausländische Modelle möglich sein, da in der kurzen Frist noch keine deutschen und bayerischen Alternativen verfügbar sind. Kooperationen bayerischer OEMs mit anderen internationalen Herstellern sichern auch den bayerischen Herstellern Know-how aus dem Verkauf und dem Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen. Mit dem Hochlauf der Fahrzeugzahlen muss auch der Ausbau der Tankstelleninfrastruktur einhergehen.

Neben den Fahrzeugen werden Brennstoffzellen auch stationär zum Einsatz kommen. Die Anzahl von Brennstoffzellen als hocheffiziente BHKWs kann auch in der mittleren Frist in Bayern erheblich gesteigert werden. An-

fänglich werden vor allem fossile Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe dienen. Mittelfristig kann – ohne Tausch der Anlagen – eine Umstellung auf eine Versorgung solcher Anlagen mit grünem Wasserstoff erfolgen.

Die bayerische Wasserstoff-Roadmap muss eng mit den Vorhaben der anderen Bundesländer und den Aktivitäten der Bundesregierung abgestimmt werden, um einen koordinierten Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu gewährleisten. Das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) koordiniert in einem weiteren Dialogprozess im Wasserstoffbündnis Bayern und mit weiteren Stakeholdern die Entwicklung der Roadmap und begleitet den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft durch die Initiierung von Demonstrationsprojekten, Netzwerk- und Öffentlichkeitsarbeit.

Erzeugung	Elektrolyse	tbd	tbd	tbd
	Biomassekonversion	tbd	tbd	tbd
	Nebenprodukt	tbd	tbd	tbd
Import	Import	tbd	tbd	tbd
Logistik	Speicher	tbd	tbd	tbd
	Pipelines	tbd	tbd	tbd
	Schiffe	tbd	tbd	tbd
	Züge	tbd	tbd	tbd
	LKW	tbd	tbd	tbd
	Tankstellen (350 bar)	tbd	tbd	tbd
	Tankstellen (700 bar)	tbd	tbd	tbd
Verbrauch	Anteil grüner H2 am Verbrauch	tbd	tbd	tbd
	PKW	tbd	tbd	tbd
	LKW	tbd	tbd	tbd
	Busse	tbd	tbd	tbd
	Flurförderfahrzeuge	tbd	tbd	tbd
	Züge	tbd	tbd	tbd
	H2-basierte Heizsysteme	tbd	tbd	tbd

2025 2030 2050

Grafik: Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B)

Abbildung 10:
Beispiel einer bayerischen Wasserstoff-Roadmap bis 2050. (tbd = to be discussed)

7. QUELLEN

- [1] iea. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities; 2019.
- [2] IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition); 2019.
- [3] Umweltbundesamt. Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Rescue Studie; 2019.
- [4] iea. World Energy Outlook 2019: International Energy Agency; 2019.
- [5] ENTSO-E, ENTSG. Ten-Year Network Development Plan 2020; 2019.
- [6] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Prioritäten der Industrie für die Nationale Wasserstoffstrategie; 2019.
- [7] Hydrogen Council. Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition; 2017.
- [8] Hydrogen Council. How hydrogen empowers the energy transition; 2017.
- [9] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km. Studie im Auftrag der H₂ Mobility; 2019.
- [10] Nationale Wasserstoffstrategie. Vorläufige Fassung vom 30.01.2020.
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Klimaschutz in Zahlen; 2019.
- [12] Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. Der Wasserfußabdruck; 2020.
- [13] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland; 2019.
- [14] Forschungszentrum Jülich GmbH. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050; 2019.
- [15] IN4climate.NRW. Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen: Ein Diskussionsbeitrag der AG Wasserstoff von IN4climate.NRW zur Entwicklung der nationalen Wasserstoffstrategie; 2019.
- [16] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Nettostromerzeugung in Deutschland in 2019; 2020.
- [17] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2019.
- [18] Statista. Automobilindustrie Deutschland; 2020.
- [19] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. Daten und Fakten; 2020.
- [20] Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie. Schriftliche Anfrage: Stromimport und Stromexport in Bayern; 2017.
- [21] Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer. Norddeutsche Wasserstoffstrategie; 2019.
- [22] Europäische Kommission. Actions towards implementing the Integrated SET Plan. Energy Efficiency and CO₂ reduction in the Iron & Steel Industry.
- [23] Kölling M. Japan glaubt an Wasserstoff: Wie in Fernost der alternative Antrieb gefördert wird. Handelsblatt 2019, 17 September 2019.

8. PARTNER IM WASSERSTOFFBÜNDNIS BAYERN

AUDI AG
BAUER COMP Holding GmbH
Bayerischer Industrie- und Handelskammertag BIHK
Bayerischer Städtetag
BayernLB
BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH
Bayernwerk AG
bayme – Bayerischer Unternehmensverband Metall und Elektro e. V.
BayWa AG
BayWa r.e. renewable energy GmbH
BMW AG
erdgas schwaben GmbH
Erlanger Stadtwerke ESTW
Framatome GmbH
Fraunhofer Gesellschaft
Grob Aircraft SE
Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH
H2 Mobility
HI ERN – Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien
H-TEC SYSTEMS GmbH
Hydrogenious LOHC Technologies GmbH
HYNERGY GmbH
Kraftanlagen München GmbH
LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
Linde plc
MAN Energy Solutions SE
MAN Truck & Bus SE
NürnbergMesse GmbH
Proton Motor Fuel Cell GmbH
Robert Bosch GmbH
Schaeffler AG
Siemens AG
TenneT TSO GmbH
vbm – Verband der Bayerischen Metall- und Elektro-Industrie e. V.
vbw – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.
Vitesco Technologies
VKU – Verband Kommunalen Unternehmen e. V. – Landesgruppe Bayern

Stand: Mai 2020



H2.B ZENTRUM
WASSERSTOFF.
BAYERN