

Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft

Focus Paper | #5



Wasserstoffwirtschaft

Chancen und Herausforderungen für die
Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft

Impressum

© Januar 2023
Bertelsmann Stiftung, Gütersloh

Bertelsmann Stiftung
Carl-Bertelsmann-Straße 256
33311 Gütersloh
Telefon +49 5241 81-0

Verantwortlich

Thieß Petersen

Autor

Thieß Petersen

Lektorat

Paul Kaltefleiter

Grafikdesign

Jürgen Schultheiß

Bildnachweis

© Pongsakorn - stock.adobe.com

Über uns

Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft

Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und soziale Teilhabe produktiv miteinander zu verbinden – das ist der Kerngedanke und das Erfolgsrezept der Sozialen Marktwirtschaft. Doch der Klimawandel und die Begrenzung natürlicher Ressourcen, ein abnehmendes Erwerbspersonenpotenzial, Globalisierungsprozesse und der digitale Wandel setzen unser bisheriges Wirtschafts- und Gesellschaftsmodell unter Druck. Damit die Soziale Marktwirtschaft auch für künftige Generationen ein verlässliches Leitbild bleibt, müssen wir sie zu einer Nachhaltigen Sozialen Marktwirtschaft transformieren.

Die ökologische Transformation erzeugt Wechselwirkungen und Konflikte zwischen den verschiedenen Zieldimensionen einer Nachhaltigen Sozialen Marktwirtschaft. Der Arbeitsschwerpunkt „Economics of Transformation“ widmet sich den makroökonomischen Wirkungszusammenhängen zwischen verschiedenen Zielparametern und schafft empirisches Steuerungswissen zu wirtschaftspolitischen Maßnahmenbündeln, die den inhärenten Zielkonflikten vorbeugen, sie auflösen oder Synergiepotenziale freisetzen können.

Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft

Focus Paper | #5

Wasserstoffwirtschaft

Chancen und Herausforderungen für die Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft

Thieß Petersen

Im Kontext der Reduzierung von Treibhausgasen und einer Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft spielt Wasserstoff eine zentrale Rolle – in Wissenschaft, Politik und Unternehmen sehen viele Expert:innen im Wasserstoff den Schlüssel zum Erreichen ambitionierter Klimaziele. Dieses Focus Paper bietet einen Überblick über die Grundlagen und Einsatzbereiche von Wasserstoff sowie über die damit verbundenen Vor- und Nachteile. Darüber hinaus werden wirtschaftliche und gesellschaftliche Rationalität sowie internationale Aspekte einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft diskutiert.

Inhalt

1. Grundlagen des Energieträgers Wasserstoff	6
2. Ausgangsstoffe und Nebenprodukte der Wasserstoffgewinnung	6
3. Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff	7
4. Wasserstoff-Farbenlehre und Klimaneutralität	8
5. Vorteile und Nutzen der Wasserstoffwirtschaft.....	9
6. Nachteile, Kosten und Erfordernisse der Wasserstoffwirtschaft	11
7. Einsatzbereiche von Wasserstoff	14
8. Internationale Aspekte der Wasserstoffwirtschaft.....	17
9. Wirtschaftspolitische Aspekte der Wasserstoffwirtschaft	21
10. Flankierende wirtschaftspolitische Maßnahmen.....	25
11. Fazit und Ausblick	26
Literatur	28

1. Grundlagen des Energieträgers Wasserstoff

Wasserstoff (H₂) ist das häufigste chemische Element im Weltall und ein **Energieträger**. Der Energiegehalt von Wasserstoff kann vielfältig genutzt werden. Bei der Nutzung von Wasserstoff entstehen **keine Treibhausgasemissionen**: Wasserstoff verbrennt ohne CO₂-Emissionen zu Wasserdampf (vgl. Adam et al. 2020: 6). So gesehen handelt es sich um einen klimaneutralen Energieträger. Deshalb ist emissionsfreier Wasserstoff ein zentraler Baustein einer klimaneutralen Wirtschaftsstruktur.

Allerdings kommt Wasserstoff in der Natur nur in **Verbindung** mit anderen Stoffen vor. Die wichtigsten dieser Verbindungen sind Wasser, Erdgas, Erdöl, Kohle und Biomasse sowie weitere wasserstoff- und kohlenwasserstoffhaltige Verbindungen. Um den gewünschten Wasserstoff zu isolieren, muss **Energie** aufgewendet werden. Dies führt zu chemischen Reaktionen, die die Verbindung des Wasserstoffs mit den Ausgangsstoffen auflösen (vgl. Domnick 2018: 38). Das Ergebnis ist ungebundener Wasserstoff auf der einen sowie die getrennten Stoffe (Neben- oder Abfallprodukte) auf der anderen Seite.

Darüber hinaus kann Wasserstoff auch **weiterverarbeitet** werden. Der Wasserstoff wird also nicht direkt genutzt, sondern in einem (oder mehreren) weiteren Schritt(en) weiterverarbeitet. So kann Wasserstoff beispielsweise zu synthetischem Methan (CH₄) verarbeitet werden. Neben einer Umformung zu einem anderen **gasförmigen** Stoff ist auch eine Umwandlung in **flüssige** Stoffe möglich. Ein Beispiel dafür ist die Umwandlung zu flüssigen Brenn- bzw. Kraftstoffen, den sogenannten E-Fuels (also electrofuels bzw. Elektro-Kraftstoffe). Diese synthetischen Kraftstoffe haben den Vorteil, dass sie einfacher zu transportieren sind als gasförmige Brennstoffe (vgl. DIHK 2020: 7). Auch Verbrennungsmotoren können mit Wasserstoff betrieben werden (Wasserstoffverbrennungsmotor).

Ob **Wasserstoff** tatsächlich eine klimaneutrale Energie- und Rohstoffquelle ist, hängt im Kern von zwei Einflussgrößen ab: Erstens von dem verwendeten **Ausgangsstoff** bzw. den restlichen Stoffen, die nach der Trennung des Wasserstoffs von dem Ausgangsstoff übrig bleiben (und der Frage, ob ggf. entstehende Treibhausgase dauerhaft gespeichert werden können oder nicht), und zweitens von der **Energie**, die zur Trennung des Wasserstoffs von seinem Ausgangsstoff verwendet wird. Es sind verschiedene Kombinationen von eingesetzter Energie und verwendeten Ausgangsstoffen möglich. Aus den verschiedenen Wasserstoffgewinnungsformen ergeben sich unterschiedliche Ausmaße hinsichtlich der Treibhausgasemissionen des erzeugten Wasserstoffs.

2. Ausgangsstoffe und Nebenprodukte der Wasserstoffgewinnung

Wenn **fossile Energieträger** wie Erdgas oder Kohle zur Trennung des Wasserstoffs verwendet werden, entsteht entweder Kohlenstoffdioxid bzw. Kohlendioxid (CO₂), Kohlenstoffmonoxid bzw. Kohlenmonoxid (CO) oder fester Kohlenstoff (C). Mit Blick auf die Klimaneutralität ist entscheidend, was mit den freigesetzten Treibhausgasen bzw. dem Kohlenstoff geschieht (vgl. DIHK 2020: 6 f.):

- Die Nebenprodukte können gespeichert werden und somit nicht in die Atmosphäre gelangen. Die Speicherung erfolgt in Lagerstätten, z. B. in ehemaligen Erdöl- oder Erdgaslagern. Diese Form der Speicherung wird als „**Carbon Capture and Storage**“-Verfahren (kurz: CCS-Verfahren) bezeichnet, also als Kohlenstoffabscheidung und -speicherung.
- Denkbar ist auch, dass der Kohlenstoff bzw. das CO₂ nicht gespeichert wird, sondern als Input für die Produktion anderer Produkte verwendet wird. Wenn das Nebenprodukt der

Wasserstoffgewinnung etwa für die Herstellung von Chemikalien, Brennstoffen oder Trockeneis verwendet wird, wird dies als „**Carbon Capture and Usage**“-Verfahren (kurz: CCU-Verfahren) bezeichnet, also als Kohlenstoffabscheidung und -verwendung.

Wird **Wasser** als Ausgangsstoff genutzt, entstehen Wasserstoff und Sauerstoff. Da in diesem Fall keine Treibhausgase anfallen, ist diese Form der Wasserstoffgewinnung mit Blick auf die anfallenden Nebenprodukte treibhausgasneutral.

Zudem ist an **Bioenergieträger** als Ausgangsstoff zu denken, also an z. B. Biomasse, Biokraftstoffe und Biogas. Genutzt werden somit organische Stoffe, die entweder aus Abfällen der Forst- und Landwirtschaft stammen oder aber speziell für die Generierung von Wasserstoff angebaut werden. Bei der Nutzung dieser Ausgangsstoffe werden die Treibhausgase, die ursprünglich in den organischen Stoffen gespeichert waren, wieder freigesetzt.

Schließlich gibt es auch noch Wasserstoff, der in **natürlicher Umgebung** vorkommt. Dies bedeutet, dass der Wasserstoff in Gesteinsformationen abgelagert ist. Um ihn zu gewinnen, sind Bohrungen und das sogenannte **Fracking** erforderlich. Dabei wird Flüssigkeit unter hohem Druck in das Gestein gepresst, um bestehende Risse zu erweitern oder neue Risse entstehen zu lassen. So wird der Wasserstoff freigesetzt. Dieses Verfahren ist jedoch höchst umstritten, u. a. weil die eingesetzten Fracking-Gemische (eine Mischung aus Sand, Wasser und Chemikalien) einen hohen Wasserverbrauch bedeuten, Lärm- und Luftemissionen verursachen sowie das Grundwasser verunreinigen können (vgl. BMU 2012). Die Potenziale dieses natürlichen Wasserstoffs werden als äußerst gering angesehen.

3. Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff

Es gibt verschiedene Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff aus Ausgangsstoffen. Zu den wichtigsten gehören die folgenden (vgl. DIHK 2020: 4–8, Horng und Kalis 2020: 5–11 und NORD/LB 2021: 4–7):

Wasserelektrolyse: Hierbei wird Wasser unter Hinzufügung von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Wenn die dafür erforderliche Energie aus erneuerbaren Quellen stammt – also z. B. aus Wind- oder Sonnenenergie –, handelt es sich um treibhausgasneutralen Wasserstoff. Dieser wird als **grüner** Wasserstoff bezeichnet. Wird als Energie Kernkraft eingesetzt, liegt **pinkter** Wasserstoff vor (andere Quellen bezeichnen diesen Wasserstoff als **rot**).

Dampfreformierung: Dieses Trennungsverfahren wird vor allem für den Ausgangsstoff Erdgas verwendet. Dazu wird Wasserdampf eingesetzt, der die Kohlenwasserstoffe des Erdgases in Wasserstoff und CO₂ zerlegt. Welche Form des Wasserstoffs daraus resultiert, hängt von der eingesetzten Energie und vom Umgang mit den Nebenprodukten ab. Wenn CO₂ freigesetzt wird und in die Atmosphäre gelangt, handelt es sich um **grauen** Wasserstoff. Wird das CO₂ hingegen gespeichert (CCS-Verfahren) oder in der Produktion weiterverwendet (CCU-Verfahren), wird von **blauem** Wasserstoff gesprochen.

Vergasung: Bei diesem Trennungsprozess wird Wasserstoff durch eine Erhitzung aus dem Ausgangsstoff gewonnen. Wenn es sich bei dem Ausgangsstoff um Steinkohle handelt, wird von **schwarzem** Wasserstoff gesprochen. Wird Braunkohle verwendet, entsteht **brauner** Wasserstoff. Dabei werden die in diesen fossilen Energieträgern gebundenen Treibhausgase freigesetzt.

Thermische Spaltung: Bei diesem Verfahren wird Erdgas oder Methan unter Einsatz von hohen Temperaturen in Wasserstoff, festen Kohlenstoff und nur sehr geringe Mengen CO₂ gespalten, das Verfahren wird auch Methanpyrolyse genannt. Wenn die erforderliche Hitze durch Energie aus erneuerbaren Quellen

erzeugt und zudem der gesamte feste Kohlenstoff langfristig gebunden wird (z. B. in der Bau- und Werkstoffindustrie), handelt es sich um **türkisen** Wasserstoff.

Fracking: Wie bereits beschrieben, wird dieses Verfahren zur Gewinnung des in Gesteinsformationen vorkommenden Wasserstoffs verwendet. Der daraus resultierende Wasserstoff wird als **weißer** Wasserstoff bezeichnet (vgl. Horng und Kalis 2020: 11). Andere Quellen sprechen hingegen von weißem Wasserstoff, wenn der Wasserstoff als Nebenprodukt von chemischen Produkten anfällt (z. B. NORD/LB 2021: 5 und Umweltbundesamt 2021a).

4. Wasserstoff-Farbenlehre und Klimaneutralität

Aus der Kombination verschiedener Ausgangsstoffe sowie unterschiedlicher Trennungsverfahren – inklusive der dafür erforderlichen Energie – ergeben sich verschiedene Bezeichnungen von Wasserstoff (siehe Tabelle 1). Dazu wird – wie schon in Abschnitt 3 ersichtlich – eine **Farbpalette** verwendet. Die Farben dienen der Unterscheidung der Herstellungsverfahren und des damit verbundenen Ausmaßes des Treibhausgasausstoßes des erzeugten Wasserstoffs. Wasserstoff selbst ist dagegen ein farbloses Gas.

Überblick Wasserstoffbezeichnungen			
Bezeichnung des Wasserstoffs	Eigenschaften bzw. Merkmale		
	Ausgangsstoffe	Trennungsverfahren	Nebenprodukt
Schwarzer Wasserstoff	Steinkohle	Zugabe von Hitze (Vergasung)	CO ₂
Brauner Wasserstoff	Braunkohle		
Grauer Wasserstoff	Erdgas	Zugabe von Wasserdampf (Dampfreformierung)	CO ₂
Blauer Wasserstoff			CO ₂ , das gespeichert oder weiterverwendet wird
Türkiser Wasserstoff	Verschiedene, vornehmlich Erdgas	Zugabe von Hitze aus erneuerbaren oder CO ₂ -neutralen Energiequellen	Fester Kohlenstoff (C), der dauerhaft gebunden wird
Gelber Wasserstoff	Wasser	Nutzung von Strom aus gemischter (und damit unbekannter) Herkunft	Bei Verwendung fossiler Energie: CO ₂
Pinker bzw. roter Wasserstoff		Trennungsverfahren mit Energie aus Kernkraft	Kernenergie: CO ₂ -frei, Stilllegung der Kernkraftwerke und Lagerung des atomaren Mülls ggf. mit Kohlenstofffreisetzung
Grüner Wasserstoff		Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen (z. B. Sonne und Wind)	CO ₂ -neutral
Oranger Wasserstoff	Biomasse	Verschiedene	Abgabe des ursprünglich von den organischen Stoffen gespeicherten Kohlenstoffs
Weißer Wasserstoff	Natürlicher, in Gesteinsformationen gebundener Wasserstoff	Fracking	Bei Einsatz fossiler Brennstoffe: CO ₂
	Nebenprodukt von chemischen Prozessen	Verschiedene	

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Horng und Kalis 2020: 8–11, NORD/LB 2021: 4 f., DIHK 2020: 6 f., BMWi 2020: 29, SRU 2021: 16 und Umweltbundesamt 2021a.

| BertelsmannStiftung

Mit Blick auf die **CO₂-Neutralität** kann letztendlich nur der **grüne** Wasserstoff als CO₂-neutral eingestuft werden.

Blauer und **türkiser** Wasserstoff werden zwar vereinzelt auch als CO₂-neutral bezeichnet (z. B. BMWi 2020: 3), tatsächlich sollten beide Arten aber lediglich als kohlenstoff- bzw. CO₂-arm eingestuft werden. Grund ist, dass bei den Kohlenstoff-Speicherverfahren immer noch Restmengen an Treibhausgasen freigesetzt

werden und in die Atmosphäre gelangen – es ist nach derzeitigem Stand technisch nicht möglich, 100 Prozent der freigesetzten CO₂-Emissionen aufzufangen und anschließend dauerhaft zu speichern (vgl. Umweltbundesamt 2021a). Zudem ist noch nicht klar, welche Umweltfolgen die Speicherung des Kohlenstoffs hervorruft (vgl. Horng und Kalis 2020: 9). Hinzu kommt, dass sowohl beim Transport und bei der Einlagerung des Kohlenstoffs Emissionen anfallen als auch bei der Förderung und beim Transport der Ausgangsstoffe zur Wasserstoffgewinnung (vgl. Bukold 2020: 9, 37).

Beim **pinken** bzw. **roten** Wasserstoff verursacht die eingesetzte Kernenergie zwar keine Treibhausgasemissionen, allerdings ist das erforderliche Uran keine erneuerbare Energiequelle. Auch ist der Kohlenstoffausstoß, der mit der Stilllegung der Kernkraftwerke und mit der Lagerung der atomaren Abfälle verbunden ist, derzeit noch schwer abschätzbar (vgl. Horng und Kalis 2020: 10). Zudem ist an die hohen Umweltrisiken zu denken, die sich im Fall eines Reaktorunfalls oder auch bei der Endlagerungsproblematik ergeben (vgl. Umweltbundesamt 2021a).

Beim **weißen** Wasserstoff, der aus in Gesteinsformationen gebundenem Wasserstoff gewonnen wird, sind die mit dem Fracking verbundenen – und bisher noch nicht ausreichend untersuchten – Umweltauswirkungen zu berücksichtigen.

Alle **anderen** Wasserstoffarten setzen entweder den im Ausgangsstoff gebundenen Kohlenstoff frei (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Biogas, Biomethan, Biokraftstoff) oder die verwendete fossile Energie führt zu Treibhausgasemissionen.

Im Ergebnis bedeutet dies also: „Insgesamt sollte grüner Wasserstoff als der einzige nachhaltige Wasserstoff eingestuft werden.“ (Horng und Kalis 2020: 11, ebenso BMWi 2020: 3) Da gegenwärtig jedoch weniger als ein Prozent des weltweiten Wasserstoffs emissionsfrei hergestellt wird, ist die Wasserstoffproduktion aktuell noch mit **hohen Emissionen** verbunden: Die derzeit pro Jahr weltweit hergestellten 70 Millionen Tonnen reinen Wasserstoffs verursachen rund 830 Millionen Tonnen CO₂. Davon entweichen etwa 700 Millionen Tonnen CO₂ in die Atmosphäre. Die restlichen 130 Millionen Tonnen CO₂ werden in der Düngemittelherstellung eingesetzt (vgl. Bukold 2020: 4 f., 17). Für eine vollständige Klimabilanz der gegenwärtigen Wasserstoffproduktion sind auch die Treibhausgasemissionen einzubeziehen, die dadurch eingespart werden, dass dieser Wasserstoff anstelle fossiler Energieträger eingesetzt wird. Belastbare Zahlen sind uns dazu jedoch nicht bekannt.

5. Vorteile und Nutzen der Wasserstoffwirtschaft

Zentraler und unmittelbarer Vorteil des Einsatzes von Wasserstoff anstelle fossiler Energieträger ist die Förderung der **Klimaneutralität**: Sofern es sich um grünen Wasserstoff handelt, entstehen keine Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus müssten bei einer ehrlichen Bilanzierung der Treibhausgasemissionen auch alle Aktivitäten, die zum Aufbau der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur und zum Betrieb dieser Infrastruktur notwendig sind, CO₂-frei sein. Das betrifft also vor allem die erforderlichen Produktionsanlagen zur Wasserstofferzeugung sowie die Speicher- und Transportinfrastruktur (vgl. ausführlicher Abschnitt 6).

Wasserstoff hat zudem eine **höhere Energiedichte** als andere chemische Brennstoffe. Das heißt, die Energie pro Kilogramm des Energieträgers ist größer als bei anderen Stoffen. Mit Blick auf fossile Brennstoffe ist die Energiedichte von Wasserstoff rund dreimal höher (vgl. NORD/LB 2021: 6), d. h., ein Kilogramm Wasserstoff enthält so viel Energie wie beispielsweise drei Kilogramm Benzin. Diesem Vorteil steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass die **volumetrische Energiedichte** von Wasserstoff sehr gering ist. Selbst bei sehr hohem Druck hat Wasserstoff ein großes Volumen, was entsprechend große Behälter verlangt. Das bedeutet gleichzeitig relativ hohe Transportkosten.

Positiv aus Sicht der **Ressourceneffizienz** ist der Umstand, dass der Wirkungsgrad von Wasserstoff vergleichsweise hoch ist. Exemplarisch zeigt sich das an einem Vergleich eines Verbrennungsmotors mit einer Brennstoffzelle. Zunächst einmal ist der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle größer als der eines Benzin- oder Dieselmotors. Der Wirkungsgrad – er gibt an, welcher Anteil der zugeführten Energie in die gewünschte Energieform umgewandelt wird – liegt bei traditionellen Verbrennungsmotoren derzeit bei rund 25 Prozent. Bei einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle in der mobilen Anwendung beträgt er hingegen rund 40 Prozent. Hinzu kommt, dass ein Brennstoffzellen-Antrieb weniger bewegliche Mechanik benötigt als ein üblicher Verbrennungsmotor. Das bedeutet einen geringeren Verschleiß und eine geringere Wartungsintensität – und damit eine Einsparung von Energie und Rohstoffen, die im Kontext von Wartung und Reparatur eingesetzt werden müssen (vgl. Weider, Metzner und Rammler 2004: 13).

Wasserstoff hat zudem den Vorteil, dass er relativ gut **speicherbar** und **transportierbar** ist (vgl. NORD/LB 2021: 5 f.) – abgesehen von dem weiter oben erwähnten hohen Transportvolumen. Das ermöglicht z. B. einen temporären oder regionalen Ausgleich von Angebotsüberschüssen und Nachfrageüberhängen auf dem Markt für Energie – der zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer bestimmten Region erstellt, aber temporär nicht benötigte Wasserstoff kann für einen späteren Bedarf gespeichert werden oder in Regionen gebracht werden, in denen die Energienachfrage höher ist als das Angebot. Allerdings setzt die Nutzung von Wasserstoff eine entsprechende Speicher- und Transportinfrastruktur voraus (vgl. Abschnitt 6).

Positiv ist schließlich noch der Umstand, dass der Aufbau einer funktionsfähigen Wasserstoffwirtschaft zusätzliche **Arbeitsplätze** schaffen kann und damit auch Einkommen (vgl. Horng und Kalis 2020: 18). Neben den direkten Beschäftigungseffekten sind auch indirekte Beschäftigungszuwächse zu berücksichtigen (vgl. Merten et al. 2020: 97–99):

- Die **direkten Beschäftigungseffekte** betreffen die zusätzlichen Einstellungen von den Unternehmen, die Wasserstoffproduktionsanlagen sowie die Transport- und Speicherkapazitäten betreiben. Der Beschäftigungszuwachs resultiert aus dem Betrieb dieser Anlagen sowie aus deren Wartung.
- Die **indirekten Beschäftigungseffekte** beziehen sich zum einen auf die wirtschaftlichen Aktivitäten im Vorleistungsbereich. Dazu zählen u. a. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Wasserstofftechnologien, die Planung und der Bau der erforderlichen Gebäude, Maschinen bzw. Anlagenteile sowie weiterer Investitionsgüter, beratende Tätigkeiten und andere Unternehmensdienstleistungen, technische Umstellungen im Bereich des Schwerlastverkehrs und schließlich auch der Ausbau der Produktionskapazitäten für erneuerbare Energien, sofern diese von der Wasserstoffindustrie benötigt werden. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass diese indirekten Beschäftigungseffekte sowie die direkten Beschäftigungszuwächse bei den betroffenen Beschäftigten zu Einkommenszuwächsen führen. Werden die zusätzlichen Einkommen für den Kauf von Konsumgütern verwendet, steigert das die Produktion in den betreffenden Unternehmen und damit auch die Zahl der dort beschäftigten Personen.

Das konkrete Ausmaß der gesamtwirtschaftlichen Beschäftigungszuwächse ist von zahlreichen Determinanten abhängig und daher nicht eindeutig vorhersehbar. Das Ausmaß der mittel- und langfristigen Arbeitsplatzzuwächse, die sich aus dem Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ergeben können, weist daher eine breite Bandbreite aus (siehe Box 1). Darüber hinaus sind diesen Arbeitsplatzzuwächsen die Arbeitsplatzverluste gegenüberzustellen, die im Zuge der Umstellung zu Wasserstofftechnologien und erneuerbaren Energien an anderen Stellen verloren gehen.

Box 1: Schätzungen der langfristigen Arbeitsplatzzuwächse der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland

Die Höhe der zusätzlichen Arbeitsplätze, die sich durch den Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland bis 2030 bzw. 2050 ergeben können, hängt von sehr vielen Rahmenbedingungen ab. Wie stark wird die Nachfrage nach Wasserstoff in diesem Zeitraum steigen? Wie hoch ist der Anteil dieses Bedarfs, der importiert wird? Wird der für grünen Wasserstoff notwendige erneuerbare Strom in Deutschland hergestellt oder importiert? Kann Deutschland sich als international wettbewerbsfähiger Anbieter von Anlagen zur Wasserstoffproduktion und -weiterverarbeitung etablieren und diese in den Rest der Welt exportieren? Je nachdem, wie die Antwort auf diese und weitere Fragen ausfällt, schwanken die prognostizierten Beschäftigungszuwächse. Dazu nur ein Beispiel: Eine Studie, die die Kosten von importiertem Wasserstoff mit den Kosten von in Deutschland produziertem Wasserstoff vergleicht, arbeitet mit unterschiedlichen Annahmen zum Ausmaß der inländisch hergestellten Wasserstoffmengen. Die daraus resultierenden ökonomischen Effekte lassen sich wie folgt zusammenfassen: „In Abhängigkeit der Wasserstoffnachfrage und des Umfangs der heimischen Bedarfsdeckung in einer Bandbreite von 0 bis 90 % können die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Effekte in 2050 zwischen jährlich rund 2 und 30 Mrd. Euro Bruttowertschöpfung bzw. ca. 20.000 und 800.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffherstellung – d. h. inklusive der Stromerzeugung, der Produktion der benötigten Anlagen und aller damit direkt und indirekt verbundenen Vorstufen – liegen.“ (Merten et al. 2020: 15) Bereiche, in denen diese Beschäftigungszuwächse anfallen, sind vor allem die folgenden: der gesamte Bereich der erneuerbaren Energien, Anlagen der Wasserelektrolyse, der sonstige Bau von Produktionsanlagen sowie die Bereiche, die dem Transport und der Speicherung von Wasserstoff dienen. Dieser Beschäftigungszuwachs impliziert einen Produktionszuwachs und damit eine Erhöhung der einheimischen Wertschöpfung sowie der daraus resultierenden Einkommen. In den berechneten Werten sind die positiven Auswirkungen auf die Beschäftigung und die Einkommen, die sich aus dem Export von Anlagen der Wasserstoffproduktion und der Wasserstoffweiterverarbeitung ergeben, nicht enthalten, d. h., es ergeben sich weitere Zuwächse bei der Beschäftigung und den Einkommen in Deutschland (vgl. Merten et al. 2020: 109–120).

6. Nachteile, Kosten und Erfordernisse der Wasserstoffwirtschaft

Ein zentraler Nachteil der Nutzung von Wasserstoff besteht in der **hohen Energieintensität**. Die skizzierten Prozesse zur Trennung des Wasserstoffs von den verschiedenen Ausgangsstoffen benötigen viel Energie. Damit der daraus gewonnene Wasserstoff einen Beitrag zur Emissionsreduzierung bzw. Klimaneutralität leisten kann, muss es sich dabei um erneuerbare Energie handeln. Eine klimafreundliche Wasserstoffwirtschaft verlangt also den **Ausbau der erneuerbaren Energien**. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch in den restlichen energieintensiven Wirtschaftsbereichen der Bedarf an erneuerbaren Energien steigt. Die Wasserstoffwirtschaft konkurriert somit mit anderen Einsatzbereichen der erneuerbaren Energien (vgl. NORD/LB 2021: 7 f.).

Beim Ausbau der erneuerbaren Energien ist an alle Bereiche dieser Energieformen zu denken, also u. a. an die Solar- und Windenergie, an Biomasse, an Wasserkraft und Erdwärme etc. (vgl. Hennische und Fishedick 2007: 30 f. sowie Tabelle 2).

Übersicht erneuerbare Energieformen

Primärenergiequelle	Erscheinungsform	Natürliche Energieumwandlung	Technische Energieumwandlung	Sekundärenergie
Sonne	Biomasse	Biomasse-Produktion	Heizkraftwerk/ Konversionsanlage	Wärme, Strom, Brennstoff
	Wasserkraft	Verdunstung, Niederschlag, Schmelzen	Wasserkraftwerk	Strom
	Windkraft	Atmosphärenbewegung	Windenergieanlage	Strom
		Wellenbewegung	Wellenkraftwerk	Strom
	Solarstrahlung	Meeresströmung	Meeresströmungskraftwerk	Strom
		Erwärmung der Erdoberfläche und Atmosphäre	Wärmepumpen	Wärme
			Meereswärmekraftwerk	Strom
		Solarstrahlung	Fotolyse	Brennstoff
			Solarzelle, Photovoltaikkraftwerk	Strom
	Kollektor, solarthermisches Kraftwerk	Wärme		
Mond	Gravitation	Gezeiten	Gezeitenkraftwerk	Strom
Erde	Vor allem Isotopenzerfall	Geothermie	Geothermisches Heizkraftwerk	Wärme, Strom

Quelle: Henicke und Fishedick 2007: 30.

BertelsmannStiftung

Zusätzlich zur Bereitstellung von ausreichend viel erneuerbarer Energie verlangt der flächendeckende Einsatz von Wasserstoff in der Wirtschaft eine entsprechende **Wasserstoffinfrastruktur**. Dazu gehören vor allem folgende Elemente (vgl. BMWi 2020: 7 f., DIHK 2020: 8–14 und Adam et al. 2020):

Erzeugungsinfrastruktur: Erforderlich sind zunächst einmal Produktionsanlagen zur Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland. Die benötigte Infrastruktur – bestehend aus Gebäuden mit der erforderlichen technologischen Ausstattung – richtet sich grundsätzlich nach den gewählten und im dritten Abschnitt skizzierten Herstellungs- bzw. Trennverfahren. Da das Ziel der Klimaneutralität jedoch nur mit grünem Wasserstoff erreicht werden kann, sollte auch nur die dafür erforderliche Erzeugungsinfrastruktur errichtet werden. Reichen die Produktionskapazitäten Deutschlands nicht aus, kann der Wasserstoff aus dem Ausland importiert werden. Damit es jedoch nicht zu einem „Carbon Leakage“ kommt (also zu einer Verlagerung emissionsintensiver Aktivitäten ins Ausland, vgl. Petersen 2021: 116–121), ist darauf zu achten, dass es sich bei dem importierten Wasserstoff um grünen Wasserstoff handelt.

Wasserstoff-Speicherinfrastruktur: Wasserstoff kann sowohl gasförmig als auch flüssig gespeichert werden. Dies verlangt entsprechende Behälter, also z. B. Gasdruckbehälter. Hierbei sind auch Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen, also z. B. der Umstand, dass Wasserstoff leicht entzündbar ist (vgl. DIHK 2020: 10).

CO₂-Speicherinfrastruktur: Bei dieser Infrastruktur handelt es sich um die physischen Anlagen, die für die Speicherung von freigesetzten Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem im zweiten Abschnitt erwähnten „Carbon Capture and Storage“-Verfahren erforderlich sind. Konkret betrifft dies z. B. den Umbau von ehemaligen Erdöl- oder Erdgaslagern, in denen das CO₂ gespeichert wird, das bei der Produktion von blauem und türkischem Wasserstoff anfällt. Hier ist neben dem Kostenaspekt zu berücksichtigen, dass die Errichtung der erforderlichen Endlager und der Transportinfrastruktur zu den Speicherstätten lange Zeit in Anspruch nimmt, auf einen erheblichen Widerstand der Bevölkerung vor Ort treffen dürfte und dass die verfügbaren Speicherkapazitäten begrenzt sind (vgl. Bukold 2020: 10, 24, 50). Für die Europäische Union liegt die geologische CO₂-Speicherzahl bei schätzungsweise etwas über 100 Milliarden Tonnen (vgl. ebenda: 52).

Zum Vergleich: 2021 erreichten die weltweiten CO₂-Emissionen einen Wert von rund 38 Milliarden Tonnen (vgl. Statistisches Bundesamt 2022).

Transportinfrastruktur: Sofern der Wasserstoff nicht direkt am Ort der Nutzung hergestellt wird, braucht es eine Infrastruktur für den Transport des Wasserstoffs. Das betrifft sowohl den Transport über weite Strecken (z. B. mit Schiffen oder Fernleitungen) als auch die kleinteilige Verteilung von Wasserstoff in einer Region, also in einer engmaschigeren Verteilinfrastruktur (vgl. Hebling et al. 2019: 2). Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese Transporte zu realisieren. Gasförmiger Wasserstoff kann mithilfe von Rohrleitungen bzw. Pipelines transportiert werden. Dafür ist nicht notwendigerweise der Bau eines komplett neuen Netzes von Pipelinetrassen erforderlich, der mit hohen Kosten verbunden wäre (zu denen auch die anfallenden Kosten für Genehmigungsverfahren im Kontext der notwendigen Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren gehören). In Deutschland wäre es stattdessen möglich, das bestehende deutsche Gasnetz zu nutzen. Dieses besteht aus rund 40.000 Kilometern Fernleitungen und 470.000 Kilometern Verteilnetzen. Hier wären zwar Anpassungsmaßnahmen erforderlich (z. B. im Bereich von Messgeräten, Verdichtern, Ventilen und Armaturen), aber die daraus resultierenden Kosten sind überschaubar und wesentlich geringer als im Fall des Aufbaus eines eigenständigen Pipelinenetzes – sie liegen nach Ansicht von Adam et al. bei schätzungsweise zehn bis 15 Prozent der Kosten eines Neubaus (vgl. Adam et al. 2020: 30). Allerdings ist es nicht immer technisch möglich, Erdgaspipelines für den Transport von Wasserstoff umzurüsten. Zudem hängt die Höhe der Umbaukosten von vielen Faktoren ab, u. a. vom für die Rohre verwendeten Stahltypen, von den zu transportierenden Wasserstoffmengen, von geografischen Gegebenheiten etc. Angaben zu den Kostenvergleichen eines Neubaus von Pipelines mit denen der Umwidmung bestehender Erdgaspipelines gelten deshalb nicht pauschal (vgl. SRU 2021: 38 f.).

Ein Transport mit Lastkraftwagen bzw. Tankwagen und Schiffen oder auf der Schiene setzt für den gasförmigen Wasserstoff Hochdruckbehälter voraus bzw. entsprechende Behälter für verflüssigten Wasserstoff. Zudem wird für den Einsatz von Wasserstoff im Straßenverkehr ein leistungsfähiges Netz mit einer entsprechenden **Tankinfrastruktur** benötigt, also der Aufbau eines Netzwerkes von Wasserstofftankstellen für Pkws und Nutzfahrzeuge (vgl. BMWi 2020: 11).

Sicherheitsinfrastruktur: Da Wasserstoff leicht entzündbar ist, kann bereits ein auf den Boden fallendes Werkzeug oder die Reibung von Textilien eine Entzündung auslösen (vgl. AGBF-Bund 2008: 4). Zudem kann Wasserstoff in gasförmiger Gestalt leicht entweichen – und sich beim Ausströmen wiederum schnell entzünden. Dies setzt hohe Anforderungen an die Sicherheitstechnologien zur Überwachung von allen benötigten Anlagen – beginnend bei der Erzeugung des Wasserstoffs über dessen Transport und Speicherung bis hin zur Verwendung des Wasserstoffs. Dazu gehört neben technischen Vorrichtungen auch die Entwicklung von Messmethoden, Bewertungskriterien sowie technischen Normen und Standards (vgl. BMWi 2020: 8).

Bildungsinfrastruktur: Eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft benötigt entsprechend ausgebildete Fachkräfte, d. h., „Wasserstoff ist ... auch ein Bildungsthema“ (BMWi 2020: 14). Die Umstellung auf die Wasserstofftechnologie führt in zahlreichen Bereichen zu Anpassungen der Infrastruktur. Neue Technologien bedeuten in der Regel auch neue Kompetenzanforderungen an die Beschäftigten. Betroffen davon sind vor allem (aber keineswegs ausschließlich) die Automobilindustrie samt deren Zuliefererbetriebe, der Energiesektor, der Maschinenbau sowie die Stahl- und die Chemieindustrie. Gefordert sind hier sowohl das berufliche Aus- und Weiterbildungssystem als auch das Hochschulsystem. Da sich Wasserstofftechnologien gegenwärtig noch in einer sehr frühen Phase der Markteinführung befinden, ist der Bedarf an Kompetenzen mit Bezug zu Wasserstofftechnologien (H₂-Kompetenzen) derzeit noch gering. Bei zunehmender Marktreife ist jedoch mit wachsenden Bedarfen an Beschäftigten mit H₂-Kompetenzen zu rechnen. Sollten diese Fachkräfte dann nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen, kommt es zu einem Fachkräfteengpass, der den Ausbau der Wasserstofftechnologie behindern würde (vgl. ausführlicher Grimm, Janser und Stops 2021).

Innovationsinfrastruktur: Da sich die Wasserstofftechnologien in vielen Bereichen noch in einer frühen Entwicklungsphase befinden, bedarf es umfangreicher Maßnahmen zur Weiterentwicklung dieser Technologien. Davon sind alle Bereiche entlang der gesamten Wasserstoffkette betroffen – also die Wasserstoffherzeugung ebenso wie die Technologien zur Speicherung, zum Transport und zur Verwendung von Wasserstoff (vgl. DIHK 2020: 17 f. und BMWi 2020: 13 f.). Neben unternehmerischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bedarf es dazu auch einer staatlichen Forschungs- und Innovationsförderung, was die Förderung von Wissenschaftler:innen einschließt (vgl. Abschnitt 9).

Eine große Herausforderung beim Aufbau der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur besteht darin, dass eine flächendeckende Nutzung von Wasserstoff in Deutschland voraussetzt, dass alle diese Infrastrukturelemente aufeinander abgestimmt sind. Notwendig ist also der Aufbau **komplexer wasserstoffbasierter Wertschöpfungsketten**, die bei der Wasserstoffherzeugung beginnen und dann alle weiteren Bereiche – Speicherung, Transport und Nutzung des Wasserstoffs bis hin zur dauerhaften Speicherung von Kohlenstoff – betreffen. So setzt beispielsweise der Bau einer Produktionsanlage, die Brennstoffzellen für Pkws und Lkws herstellt, voraus, dass es eine entsprechend hohe Nachfrage nach wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen gibt. Diese Nachfrage stellt sich jedoch nur ein, wenn die potenziellen Käufer:innen sicher sein können, dass es ein leistungsfähiges und öffentlich zugängliches Versorgungsnetzwerk mit günstigem Wasserstoff gibt. Neben dem dafür erforderlichen Netz an Wasserstofftankstellen verlangt das auch eine leistungsfähige Logistikinfrastruktur. Diese wird wiederum nur bereitgestellt, wenn die Betreiber:innen davon ausgehen, dass ihre Transportkapazitäten auch in Anspruch genommen werden. Eine funktionsfähige und wettbewerbsfähige Wasserstoffinfrastruktur verlangt also, dass alle genannten Infrastrukturelemente gleichzeitig aufgebaut werden und dann in ihrer Gesamtheit zur Verfügung stehen. Kurz gefasst liegt somit ein **Henne-Ei-Problem** vor: „ohne zuverlässige Nachfrage kein Angebot, ohne zuverlässiges Angebot keine Nachfrage“ (Agora Energiewende, Agora Industrie 2022: 15). Das verlangt eine **Koordinierung** zahlreicher wirtschaftlicher Aktivitäten, an denen wiederum viele private und staatliche Akteur:innen aus ganz Deutschland bzw. sogar Europa beteiligt sind (vgl. Grimm 2020: 23–27).

Neben diesem Koordinierungsaspekt ist aus gesamtwirtschaftlicher Sicht zu berücksichtigen, dass alle genannten Maßnahmen zum Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur entsprechende **private** und **öffentliche Investitionen** verlangen. Das kann zur Folge haben, dass die dafür erforderlichen produktiven Ressourcen – also Arbeitskräfte, Maschinen, Energie, Rohstoffe und Vorleistungen – an anderen Stellen fehlen. Zu denken ist neben Konsumzwecken auch an andere Bereiche der ökologischen Transformation sowie an die digitale Transformation und Maßnahmen zur Anpassung an die Herausforderungen der gesellschaftlichen Alterung in Deutschland (allen voran zur Förderung des arbeitssparenden technologischen Fortschritts und zur Erhöhung der Erwerbsbeteiligung von Menschen im erwerbsfähigen Alter). Diese Kosten sind jedoch als eine Investition in eine zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen in Deutschland anzusehen.

Neben den genannten ökonomischen bzw. monetären Kosten, die mit der Errichtung der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur verbunden sind, müssen auch die Treibhausgasemissionen in der **Klimabilanz der Wasserstoffwirtschaft** berücksichtigt werden, die mit dem Ressourcen- und Energieverbrauch verbunden sind, der für den Aufbau und die anschließende Nutzung dieser Infrastruktur anfällt. Gleiches gilt für die Entsorgung bzw. Stilllegung der Anlagen, nachdem sie das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben.

7. Einsatzbereiche von Wasserstoff

Für Wasserstoff gibt es verschiedene Verwendungsmöglichkeiten. Zu den wichtigsten gehören der Einsatz als Energiequelle in der Mobilität und für das Heizen von Räumen bzw. Gebäuden sowie der Einsatz als Energieträger und Rohstoff in der Industrie sowie in der Stromversorgung. Allerdings sind neben den technischen Einsatzmöglichkeiten auch wirtschaftliche Erwägungen, also die Frage der Kosten und der Effizienz,

zu berücksichtigen. Sie sorgen dafür, dass nicht alle technisch möglichen Einsatzarten wirtschaftlich sinnvoll sind.

Im Bereich **Verkehr** bzw. **Mobilität** wird Wasserstoff (direkt oder als Elektro-Kraftstoff) zum Antrieb von Fahrzeugen verwendet. Dazu kann z. B. die Brennstoffzellentechnologie mit einem Elektromotor kombiniert werden (Brennstoffzellenfahrzeug). Die Brennstoffzellen wandeln dabei die chemische Energie direkt in elektrische Energie um. Das erlaubt einen höheren Wirkungsgrad (vgl. Weider, Metzner und Rammler 2004: 13). Grundsätzlich ist der Einsatz von Wasserstoff im gesamten Verkehrswesen denkbar (Privat-Pkws, Wasserstoffbusse im öffentlichen Personennah- und -fernverkehr, Lkws im Straßenschwerlastverkehr, andere Nutzfahrzeuge, Schienenverkehr, Flugzeuge, Schiffe, vgl. DIHK 2020: 15 f.). Derzeit gibt es jedoch noch zahlreiche technologische Grenzen für einen umfassenden Einsatz von Wasserstoff im Verkehrswesen. Dazu gehören u. a. geringe Reichweiten und der Umstand, dass gasförmiger Wasserstoff große Tanks benötigt. Letzteres verlangt ggf., den Wasserstoff zu komprimieren oder zu verflüssigen, was beides energieaufwendig ist. Daher ist es derzeit vielfach sinnvoller, direkt mit erneuerbarem Strom zu arbeiten (vgl. Umweltbundesamt 2021a). Hinzu kommt, dass „die Effizienz von mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen bis zu 60 Prozent unter derjenigen von batterieelektrischen Fahrzeugen“ liegt (Agora Energiewende, Agora Industrie 2022: 9). Der Einsatz von wasserstoffbasierten Energieträgern sollte folglich vor allem dort erfolgen, wo eine Elektrifizierung entweder technisch nicht möglich oder aber wirtschaftlich nicht sinnvoll ist (vgl. Grimm 2020: 22 und SRU 2021: 61).

Für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehrsbereich bedeutet dies vom heutigen Kenntnisstand ausgehend, dass voraussichtlich auch langfristig nur der Einsatz von Flüssigwasserstoff (oder von aus Wasserstoff hergestellten Kraftstoffen wie z. B. Methanol) im Bereich des internationalen Schiffs- und Flugverkehrs sinnvoll sein wird. Für Pkws ist der Einsatz von grünem Wasserstoff wenig wahrscheinlich. Grundsätzlich werden wasserstoffbetriebene Fahrzeuge keine oder bestenfalls eine untergeordnete Rolle spielen. Auch im Bereich des Schienenverkehrs ist Wasserstoff keine günstige Alternative. Wirtschaftlich sinnvoller ist eine Elektrifizierung mit Oberleitungen und dem Einsatz von klimaneutral erzeugtem Strom (vgl. SRU 2021: 59–61).

Zur Versorgung von **Gebäuden** mit **Wärme** kann Wasserstoff eingesetzt werden, entweder mit den schon erwähnten Brennstoffzellen oder unter Einsatz von Heizkesseln. Allerdings ist auch hier zu beachten, dass fossile Brennstoffe durch eine Reihe von anderen erneuerbaren Energien ersetzt werden können, also z. B. durch Solarenergie, Windenergie, Erdwärme und andere Formen der Umgebungswärme (Wärme aus Luftschichten oder Oberflächengewässern) sowie durch die Nutzung der Abwärme von technischen Geräten (vgl. DIHK 2020: 16 und Umweltbundesamt 2021a). Die Verwendung von Wasserstoff zur Erzeugung von Gebäudewärme hat zudem den Nachteil, dass der Wirkungsgrad von Wasserstoff geringer ist als von anderen Energien. Das hat u. a. zur Folge, dass die Bereitstellung einer bestimmten Wärmemenge mit Wasserstoff 500 bis 600 Prozent mehr erneuerbaren Strom benötigt als die Herstellung dieser Wärmemenge mit einer Wärmepumpe (vgl. SRU 2021: 64). Wegen der daraus resultierenden höheren Heizkosten gehen die meisten Prognosen davon aus, dass Wasserstoff auch langfristig für die Wärmeversorgung von Einzelgebäuden keine sinnvolle Alternative ist. Geeigneter ist eine Umstellung auf eine Wärmeerzeugung mithilfe erneuerbarer Energie. Grüner Wasserstoff eignet sich daher nur dann, wenn der Einsatz anderer erneuerbarer Energien nicht möglich oder nicht effizient ist (vgl. SRU 2021: 64).

In der **Industrie** ist Wasserstoff sowohl als **Energieträger** als auch als **Rohstoff** nutzbar. Denkbar ist beispielsweise der Einsatz in der **Eisen-** und **Stahlindustrie**. Ausgangsstoff der Stahlproduktion sind Eisenerze. Aus ihnen muss zunächst der Sauerstoff entfernt werden. Die chemische Reaktion, die den Sauerstoff entzieht, wird Reduktion genannt. In der Stahlgewinnung eingesetzte Reduktionsmittel sind z. B. Kohlenstoff und Koks, was zu einer Freisetzung von entsprechenden CO₂-Emissionen führt (vgl. Domnick 2018: 11 f.). Wird grüner Wasserstoff anstelle von Kohlenstaub als Reduktionsmittel eingesetzt, lassen sich gegenüber der konventionellen Produktionstechnologie bis zu 97 Prozent der CO₂-Emissionen einsparen (vgl. SRU 2021: 54). Darüber hinaus gibt es weitere Einsatzbereiche von Wasserstoff in der Industrie. Dazu gehören u. a. die folgenden (vgl. SRU 2021: 53–56):

- In **Erdölraffinerien** wird bereits jetzt Wasserstoff eingesetzt, um unerwünschte Stoffe (z. B. Schwefel, Stickstoff und andere Verunreinigungen) aus dem Rohöl zu entfernen. Notwendig ist hier die vollständige Umstellung auf grünen Wasserstoff.
- Bei der Produktion von Düngemitteln wird **Ammoniak** als ein Grundstoff gebraucht. Für die Ammoniakherstellung werden Stickstoff und Wasserstoff benötigt. Auch hier gilt es, den jetzt noch auf Basis von fossilen Rohstoffen produzierten Wasserstoff durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Gleiches gilt für die Produktion von **Methanol**, für dessen Herstellung ebenfalls Wasserstoff benötigt wird und das u. a. als Lösemittel in der chemischen Industrie sowie als Zusatzstoff in Kraftstoffen zum Einsatz kommt.
- Weitere Einsatzbereiche sind u. a. die **Nahrungsmittelindustrie** (dort erhöht Wasserstoff die Haltbarkeit von Lebensmitteln), die **Metall verarbeitende** Industrie (dort wird Wasserstoff als Reduktionsmittel und für die Legierung von Metallen eingesetzt) sowie die **Zementindustrie** und die **chemische Industrie**. Zudem wird Wasserstoff als **Kühlmittel** in Kraftwerken und industriellen Produktionsanlagen genutzt.

Es gibt somit eine Reihe von Industriebereichen, in denen Wasserstoff als Input benötigt wird. Zukünftig gilt es, hier nur noch grünen Wasserstoff einzusetzen. Gegenwärtig betrifft das vor allem die Eisen- und Stahlproduktion sowie die chemische Industrie. Perspektivisch geht der Sachverständigenrat für Umweltfragen davon aus, dass Wasserstoff auch in der Glas- und Keramikbranche sowie in der Nichteisenmetallindustrie eingesetzt wird (vgl. SRU 2021: 56).

Eine vierte Anwendungsmöglichkeit betrifft schließlich die **Stromversorgung**. Wie in Abschnitt 6 erläutert, ist die Wasserstoffproduktion sehr energieintensiv. Wasserstoff ist daher keine eigenständige Energiequelle, sondern lediglich ein Energieträger. Dennoch kann Wasserstoff im Kontext eines Systems erneuerbarer Energien eine Rolle spielen: Wenn es in Zeiten mit einer geringen Solar- und Windenergieeinspeisung zu einer Angebotsverknappung auf dem Strommarkt kommt, bietet sich eine **Rückverstromung** von Wasserstoff an. Das bedeutet, dass die Energie des Wasserstoffs wieder in elektrische Energie umgewandelt wird. Allerdings sollte diese Option nur in Ausnahmefällen genutzt werden (vgl. SRU 2021: 65–67).

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass es zwar technisch gesehen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff gibt, dass aber nicht alle technisch machbaren Optionen auch wirtschaftlich sinnvoll sind. Häufig ist es sinnvoller, direkt mit erneuerbaren Energien zu arbeiten anstatt mit grünem Wasserstoff. In einer Studie der Agora Energiewende werden zur Sinnhaftigkeit eines Einsatzes von grünem Wasserstoff folgende Einschätzungen abgegeben (vgl. Agora Energiewende, Agora Industrie 2022: 11–13):

- Konsens über die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Wasserstoff besteht u. a. in den Bereichen des Langstrecken-Luftverkehrs und des Langstrecken-Schiffsverkehrs, in der Stahlindustrie in Form einer emissionsarmen Wasserstoffdirektreduktion (vgl. zur Stahlindustrie ausführlicher Bertelsmann Stiftung 2023) sowie überall dort, wo Wasserstoff als Produktionsmittel bzw. Inputfaktor benötigt wird.
- Umstritten ist der Wasserstoffeinsatz u. a. im Bereich der industriellen Hochtemperaturwärme sowie im Verkehrsbereich bei Lkws, Bussen, dem Schienenverkehr sowie dem Kurzstrecken-Luftverkehr und -Schiffsverkehr.
- Konsens über keine sinnvollen Einsatzbereiche besteht u. a. mit Blick auf Pkws und leichte Nutzfahrzeuge sowie bei Wasserstoff als Wärmequelle für einzelne Gebäude.

Aus den verschiedenen möglichen Einsatzbereichen von Wasserstoff ergeben sich unterschiedliche Abschätzungen zum **zukünftigen Wasserstoffbedarf** Deutschlands. Dafür gibt es eine Reihe von Szenarien.

Sie weisen jedoch eine **große Bandbreite** von prognostizierten Wasserstoffbedarfen aus. Grund dafür sind unterschiedliche Annahmen, die den jeweiligen Szenarien zugrunde liegen. Das betrifft u. a. das Ausmaß der für 2050 angenommenen Treibhausgasreduktionsziele, den Umfang der Nutzung fossiler Energieträger, die Fortschritte bei der Steigerung der Energieeffizienz, Änderungen des Lebensstils hin zu einer Suffizienz (also der bewussten Reduzierung des Material- und Energieverbrauchs), das Ausmaß des Einsatzes von CCS-Verfahren und den Elektrifizierungsgrad (vgl. SRU 2021: 8–10). Aus der Kombination unterschiedlicher Annahmen ergeben sich unterschiedlich hohe Wasserstoffbedarfe für das Jahr 2050. Selbst wenn nur Szenarien berücksichtigt werden, die für 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität unterstellen (d. h. vollständige Treibhausgasneutralität oder eine Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen um 95 Prozent), schwanken die Schätzungen zum Wasserstoffbedarf in Deutschland im Jahr **2050** erheblich (vgl. SRU 2021: 8–10 und die dort angegebene Literatur):

- Die **höchsten Wasserstoffbedarfe** sehen Szenarien, in denen der Klimaschutz entweder erst sehr spät umgesetzt wird oder in denen der Elektrifizierungsgrad relativ gering ist – wie weiter oben skizziert, ist eine Elektrifizierung, die mit klimaneutralem Strom arbeitet, eine sinnvolle Alternative zu grünem Wasserstoff. In diesen Szenarien liegen die geschätzten Bedarfe bei rund 910 bzw. sogar knapp 980 Terawattstunden (TWh).
- Den **geringsten Wasserstoffbedarf** berechnet ein Szenario, in dem eine substantielle Veränderung der Konsumgewohnheiten und des Lebensstils angenommen wird. Die damit verbundene Verringerung des Verbrauchs von Energie bewirkt einen Wasserstoffbedarf in Höhe von lediglich knapp 225 TWh.
- **Zwischen** diesen Extremwerten liegen mehrere Szenarien, die einen Bedarf in Höhe von rund 400 TWh oder etwas mehr erwarten.

Die heimischen **Produktionsmöglichkeiten** Deutschlands liegen in jedem dieser Szenarien unter den prognostizierten Wasserstoffbedarfen. Grund dafür ist vor allem der Umstand, dass in einem dicht besiedelten Land wie Deutschland die verfügbare Fläche ein limitierender Faktor ist. Die meisten Szenarien gehen davon aus, dass Deutschland im Jahr 2050 zwischen 100 und 200 TWh Wasserstoff produzieren kann. Die Differenz zwischen diesen Produktionsmöglichkeiten und den Wasserstoffbedarfen muss dann aus dem Ausland **importiert** werden.

8. Internationale Aspekte der Wasserstoffwirtschaft

Unabhängig von den Flächenrestriktionen in Deutschland ist ein Import von grünem Wasserstoff auch eine kostengünstige Alternative zu in Deutschland hergestelltem grünem Wasserstoff. Da erneuerbare Energien zentral für die Bereitstellung von klimaneutralem Wasserstoff sind, haben **sonnen-** und **windreiche** Regionen einen Preisvorteil bei der Herstellung von grünem Wasserstoff. Daher gibt es Prognosen, die erwarten, dass Deutschland bis 2050 rund **75 Prozent** des jährlichen Wasserstoffbedarfs durch **Importe** decken wird (vgl. Kruse und Wedemeier 2021: 28). Die am Ende des siebten Abschnitts genannten Szenarien kommen zu ähnlichen Größenordnungen. Im Kontext dieser Importe sind eine Reihe von Aspekten zu beachten.

Zunächst einmal gilt es, **Wasserstoffpartnerschaften** mit dem Ausland zu etablieren, um so die Wasserstoffversorgung abzusichern. Das betrifft z. B. den Abgleich der benötigten Wasserstoffmengen mit den Produktionskapazitäten der ausländischen Anbieter:innen (vgl. Hebling et al. 2019: 39 f.), um für eine langfristige Versorgungssicherheit zu sorgen. Neben mengenmäßigen Festlegungen sind auch technische Details zu berücksichtigen, also z. B. der Aggregatzustand, in dem der Wasserstoff geliefert wird (also in flüssiger Form oder gasförmig). Diese Kenntnis ist relevant für die in Deutschland erforderliche Transport- und

Speicherinfrastruktur. Sofern der Wasserstoff aus fernen Regionen kommt, ist ein Transport auf Schiffen denkbar. Dies setzt jedoch entsprechende Infrastrukturen in den deutschen Seehäfen voraus (vgl. Kruse und Wedemeier 2021: 28). Zudem bedarf es einer weiteren Distributionsinfrastruktur, die den importierten Wasserstoff von den Seehäfen weitertransportiert. Die Kosten der Ferntransporte und der kleinteiligen Distribution können ggf. so hoch sein, dass sich der Import von preiswerterem ausländischem grünem Wasserstoff preislich nicht mehr lohnt. Die Wahl geeigneter Partnerschaftsländer hängt somit von einer Reihe von Aspekten ab, zu denen neben den bereits erwähnten Themen auch Fragen der politischen und rechtlichen Stabilität gehören (siehe Box 2).

Hinzu kommt, dass funktionierende grenzüberschreitende Wasserstoffpartnerschaften eine leistungsfähige **internationale Wasserstofftransportinfrastruktur** voraussetzen (vgl. Merten et al. 2020: 12). Hier sind verschiedene Transportoptionen möglich. Ihre Vorteilhaftigkeit richtet sich u. a. nach der zu überwindenden Strecke (vgl. Staiß et al. 2022: 110–112):

- Aus Kostensicht ist der Transport von reinem Wasserstoff über Distanzen bis zu **4.000 Kilometern** am günstigsten, wenn der gasförmige Wasserstoff per Pipeline transportiert wird. Zudem kann damit auch ein hoher Reinheitsgrad des Wasserstoffs garantiert werden.
- Ein Transport von Flüssigwasserstoff per Schiff ist wirtschaftlich lohnend bei Distanzen von mehr als **8.000 Kilometern**. Allerdings befinden sich die dafür notwendigen Wasserstofftanker noch in der Entwicklungsphase. Auch die erforderlichen Anlandungsterminals müssen noch gebaut werden. Ob die **LNG-Terminals**, die gegenwärtig in Deutschland errichtet werden, um die Abhängigkeit von russischem Erdgas zu reduzieren, dafür zukünftig nutzbar sind, ist unklar. Grundsätzlich ist eine Umrüstung von Teilen eines LNG-Terminals für flüssigen Wasserstoff technisch möglich. Allerdings sind erhebliche technische Anpassungen erforderlich, was zu entsprechend hohen Kosten führt. Belastbare Aussagen zur Höhe der Umrüstungskosten sind derzeit schwierig, u. a. weil es keine Erfahrungswerte dazu gibt. Eine im November 2022 veröffentlichte Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung kommt daher zu folgender Einschätzung: „Currently, it is uncertain if there is a future use case for LNG terminals with renewable energy carriers, which poses a risk for them to become stranded assets in the medium term.“ (Riemer, Schreiner und Wachsmuth 2022: 6)

Box 2: Beispiel für ein geeignetes außereuropäisches Wasserstoffpartnerland

Ein außereuropäisches Land, das als Lieferant für grünen Wasserstoff nach Deutschland infrage kommt, ist **Marokko**. Geografisch und klimatisch verfügt das Land sowohl über eine hohe solare Einstrahlung im Landesinneren als auch über Meeresküsten, die den Einsatz von entsalztem Meerwasser in der Herstellung von grünem Wasserstoff sowie die Nutzung von Windkraft (sowohl onshore als auch offshore) ermöglichen. Das Land ist rund 2.800 Kilometer von Deutschland entfernt, was den Einsatz einer Pipeline für den Wasserstofftransport erlaubt. Das Land gilt als politisch stabil und kann so die erforderliche Investitionssicherheit bieten. Zudem werden die bilateralen Beziehungen zu Deutschland als hoch angesehen (vgl. Merten et al. 2020: 40–42).

Um dem Ziel der globalen Klimaneutralität zu dienen, ist sicherzustellen, dass es sich bei dem aus dem Ausland importierten Wasserstoff um grünen Wasserstoff handelt. Das verlangt international harmonisierte und zertifizierte **Standards** und Normen – sowohl für den Wasserstoff als auch für wasserstoffbasierte Chemikalien und weitere Vorleistungen (vgl. Hebling et al. 2019: 40).

Zum Aspekt der **Versorgungssicherheit** gehört die Frage, wie groß die Menge an wasserstoffbasierten Energieträgern und Grundstoffen sein soll, die in Deutschland hergestellt wird. Zur Reduzierung der Importabhängigkeit aus weit entfernten Regionen bietet sich an, **europäische Gemeinschaftsprojekte** zum Aufbau der erforderlichen Wasserstoffherstellungsanlagen anzustoßen. Das verlangt dann auch ein

europaweites Transportnetz. Wegen des hohen Bedarfs an grünem Wasserstoff und des damit verbundenen Bedarfs an erneuerbaren Energien bietet es sich an, europaweit an geeigneten Standorten Wasserstoffproduktionsanlagen zu errichten, also z. B. im Süden Europas, um dadurch eine solare Wasserstoffproduktion zu ermöglichen.

Denkbar sind darüber hinaus auch weltweite Standorte der Wasserstoffproduktion. In diesem Kontext kommen vor allem etwa sonnenreiche Regionen im **globalen Süden** in Betracht. Allerdings ist dabei – neben den längeren Transportwegen – zu berücksichtigen, dass der Export von Wasserstoff aus den weniger entwickelten Volkswirtschaften dazu führen kann, dass diese Länder wegen der daraus resultierenden Energieengpässe im eigenen Land vermehrte Investitionen in fossile Energiequellen durchführen (vgl. BMWi 2020: 12). Hinzu kommt, dass in den Ländern des globalen Südens die Energiewende vor Ort verzögert werden kann, weil die vorhandenen Arbeitskräfte für den Ausbau der exportorientierten Wasserstoffwirtschaft benötigt werden und somit nicht mehr für die eigene Energiewende zur Verfügung stehen – die fossilen Produktionsstrukturen würden folglich erhalten bleiben (vgl. Merten et al. 2020: 11). Beide Entwicklungen würden zu dem weiter oben schon genannten „Carbon Leakage“ führen: Den in Deutschland und Europa durch den Import von grünem Wasserstoff eingesparten Treibhausgasemissionen stehen zusätzliche Emissionen gegenüber, die in den Ländern des globalen Südens dadurch entstehen, dass dort zusätzliche fossile Energie verbraucht wird, wenn der exportierte grüne Wasserstoff durch diese Energie ersetzt wird.

Beim Import von grünem Wasserstoff aus weit entfernten Regionen mit günstigen klimatischen Voraussetzungen für die Produktion von grünem Wasserstoff ist jedoch zu beachten, dass die **Transportkosten** von Wasserstoff derzeit hoch sind. Im Durchschnitt wird geschätzt, dass allein der Transport von importiertem Wasserstoff durch ein **Schiff** die Gesamtkosten um 50 bis 150 Prozent erhöht. Wird zudem berücksichtigt, dass eine Unterbrechung der Zulieferketten durch politische Krisen, Pandemien, Blockaden wichtiger Verkehrsrouten etc. möglich ist, ist es durchaus plausibel, dass die heimische Produktion von Wasserstoff günstiger ist als ein Import aus Übersee (vgl. Bukold 2020: 55). Zu dieser Einschätzung kommt auch eine Studie des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI): Danach würde beispielsweise ein Kilogramm grüner Wasserstoff, das in Algerien hergestellt und anschließend als Flüssigwasserstoff mit einem Schiff nach Deutschland transportiert wird, ab dem Importterminal in Deutschland rund vier Euro kosten. In Deutschland lokal hergestellter grüner Wasserstoff wäre nach der Studie, die sich auf das Jahr 2030 bezieht, mit 3 bis 3,50 Euro pro Kilogramm preiswerter (vgl. Schulte, Schönfisch und Brändle 2020: 2 f.). Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass der Transport von flüssigem Wasserstoff in Zukunft wegen technologischer Fortschritte voraussichtlich günstiger wird, sodass sich dann der Wasserstoffimport aus Ländern der Sub Sahara oder sogar aus weiter entfernten Ländern wie Australien und Argentinien lohnen könnte (vgl. Grimm 2020: 25). Zudem ist zu berücksichtigen, dass Wasserstoff auch über entsprechend angepasste **Erdgaspipelines** aus dem Ausland importiert werden kann. In der bereits erwähnten EWI-Studie wird beispielsweise konstatiert, dass in Spanien produzierter grüner Wasserstoff im Fall eines Transports in einer solchen Pipeline zwischen 2 Euro und 2,70 Euro pro Kilogramm kosten würde – das wäre preiswerter als in Deutschland erzeugter grüner Wasserstoff, sodass der Wasserstoffimport günstiger wäre (vgl. Schulte, Schönfisch und Brändle 2020: 3). Einschränkend ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Aufbau neuer Pipelines für den grenzüberschreitenden Transport von Wasserstoff lange Zeit in Anspruch nimmt. Während der Errichtungsphase eines internationalen Pipelinesystems kann es daher sein, dass auf den Schiffstransport ausgewichen werden muss (vgl. Merten et al. 2020: 10).

Zudem ist beim Import von grünem Wasserstoff aus Entwicklungsländern zu berücksichtigen, dass die dafür benötigten Wassermengen dann nicht mehr für landwirtschaftliche Zwecke und als Trinkwasser zur Verfügung stehen. Gerade für die trinkwasserarmen Volkswirtschaften Nordafrikas könnte das zu **Versorgungsproblemen** führen (vgl. DIHK 2020: 17). In Volkswirtschaften, die über Meeresküsten verfügen, kann der Wasserbedarf durch Meerwasser gedeckt werden. Da entsprechende Elektrolyseverfahren jedoch gegenwärtig auf reines Wasser angewiesen sind, verlangt dies vorab eine Entsalzung des Meerwassers. Diese Entsalzungsverfahren verursachen Kosten, die es zu berücksichtigen gilt (vgl. Merten et al. 2020: 41).

Zur Umgehung der Wasserversorgungsproblematik sowie der hohen Transportkosten wäre es denkbar, dass Industrieländer wie Deutschland grünen Wasserstoff im eigenen Land herstellen und dabei auf **importierten klimaneutralen Strom** aus dem Ausland zurückgreifen, also beispielsweise auf Solarenergie aus Nordafrika. Allerdings ist dabei wiederum an Transportkosten zu denken, die bei Strom aus den entsprechenden Netzkosten bestehen (vgl. Matthes et al. 2020: 4).

Außenwirtschaftliche Beziehungen spielen schließlich noch eine Rolle bei der dauerhaften **Speicherung von CO₂** oder festem Kohlenstoff, der bei der Herstellung von blauem und türkischem Wasserstoff entsteht. Im sechsten Abschnitt wurden die Probleme skizziert, die mit deren Speicherung in Deutschland verbunden sind (Errichtungs- und laufende Betriebskosten der Endlagerstätten, lange Genehmigungsverfahren, Widerstände der betroffenen Bevölkerung sowie eine nur begrenzte geologische Speicherkapazität). Um die damit verbundenen Kosten zu vermeiden, können entsprechende Lagerstätten in weit entfernten Ländern genutzt werden. Dabei sind jedoch die Kosten des Transports des CO₂ bzw. des festen Kohlenstoffs zu berücksichtigen (vgl. Schulte, Schönfish und Brändle 2020: 4).

Bei einer weltweit aufgestellten Wasserstoffproduktion stellt sich die Frage, wie entsprechende Produktionskapazitäten in wenig entwickelten Volkswirtschaften finanziert werden können. Hierzu gibt es verschiedene **Finanzierungsinstrumente** (vgl. Petersen 2021: 161 f.):

- Wenn Unternehmen aus Industrienationen in weniger entwickelten Volkswirtschaften Wasserstoffproduktionsanlagen errichten wollen, können sie diese Anlagen selbst finanzieren. Es handelt sich dann um eine **private ausländische Direktinvestition**.
- Wenn es für die Produktionsanlagen in den Entwicklungs- und Schwellenländern keine privaten Investor:innen aus dem Ausland gibt, kann der Bau dieser Anlagen durch Mittel der **Entwicklungshilfe** finanziert werden. Neben den Mitteln aus der nationalen Entwicklungspolitik einzelner Länder ist auch an eine multilaterale Lösung zu denken, bei der viele Länder ihre finanziellen Mittel zusammentragen und in einem gemeinsamen Fonds bündeln. Ein Beispiel dafür ist der **Green Climate Fund** (GCF). Er wurde 2010 auf der Klimakonferenz in Cancún gegründet und ist das zentrale multilaterale Instrument, um die globalen Treibhausgasemissionen zu reduzieren.
- Eine andere Möglichkeit zur Finanzierung emissionsreduzierender Maßnahmen in Entwicklungsländern ist der **Clean Development Mechanism**, zu Deutsch: der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung. Industrieländer können Projekte zur Verringerung der Treibhausgasemissionen in Entwicklungsländern finanzieren und sich die dadurch erzielten Emissionsreduktionen gutschreiben lassen. Dieser Mechanismus wurde im Dezember 1997 im Kyoto-Protokoll, das im Februar 2005 in Kraft trat, etabliert. Mit diesem marktwirtschaftlich orientierten Instrument können Industrieländer die Treibhausgasemissionen dort verringern, wo die Emissionsvermeidungskosten am geringsten sind. Für die erzielten Emissionsreduzierungen im Ausland werden Zertifikate ausgestellt (Certified Emission Reductions). Sie werden den Investor:innen im Industrieland übertragen und können von diesen als Emissionsrecht eingesetzt oder verkauft werden. Dieser Weg steht auch privaten Unternehmen frei. So kann es gelingen, privates Kapital für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Schwellen- und Entwicklungsländern zu mobilisieren.

Alle diese Finanzierungsinstrumente eignen sich auch, um die Produktionskapazitäten für erneuerbare Energien in geografisch und klimatisch günstigen Regionen zu finanzieren und mit diesem Strom anschließend in den Industrienationen des globalen Nordens grünen Wasserstoff zu produzieren.

Auch wenn geografisch bzw. klimatisch günstige Rahmenbedingungen Schwellen- und Entwicklungsländer des globalen Südens zu einem attraktiven Ort für die Produktion von grünem Wasserstoff machen, ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass zumindest in den nächsten Jahren die Erwartungen an die Höhe der Importmengen begrenzt bleiben sollten. Neben den Finanzierungsproblemen sind auch **realwirtschaftliche**

Engpässe zu berücksichtigen. Wie im sechsten Abschnitt beschrieben, stellt der Aufbau und Betrieb einer leistungsfähigen Wasserstoffindustrie hohe Anforderungen an die physische Infrastruktur sowie an die Qualifikationen und Kompetenzen der Beschäftigten. Wenn das schon für eine hoch entwickelte Volkswirtschaft wie Deutschland eine enorme Herausforderung darstellt, ist es – jenseits der bereits genannten Finanzierungsprobleme – für weniger entwickelte Volkswirtschaften eine noch viel höhere Hürde. Auf absehbare Zeit können aus den Schwellen- und Entwicklungsländern also – wenn überhaupt – nur begrenzte Wasserstoffimporte erwartet werden. Dies gilt insbesondere, wenn diese Volkswirtschaften im Zuge ihres Bevölkerungswachstums und des wirtschaftlichen Aufholprozesses in den kommenden Jahren einen steigenden Energie- und Ressourcenbedarf haben werden.

Ein letzter hier zu nennender Aspekt der internationalen Wasserstoffwirtschaft ist der Umstand, dass Deutschland zwar kein Exporteur von Wasserstoff sein wird, aber durchaus gute **Exportmöglichkeiten** im Bereich des **Anlagen-** und **Maschinenbaus** hat. In diesem Bereich hat Deutschland gegenwärtig eine führende Weltmarktposition. Das ist die Basis für den Export von Anlagen, die im Ausland für die Herstellung und die Weiterverarbeitung von Wasserstoff benötigt werden. Wenn es auch zukünftig gelingt, diese Marktposition zu erhalten und sogar auszubauen, können sich deutsche Unternehmen dauerhaft als exportstarke Vorreiter auf dem Weltmarkt etablieren und so die Basis für einen hohen Beschäftigungsgrad mit hohen Arbeitseinkommen schaffen (vgl. Merten et al. 2020: 16).

9. Wirtschaftspolitische Aspekte der Wasserstoffwirtschaft

Der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft ist in einer Marktwirtschaft primär eine Aufgabe der privaten Wirtschaftsakteur:innen, also der Unternehmen und der Verbraucher:innen. Allerdings bedarf es zusätzlicher staatlicher Maßnahmen, die diesen technologischen Wandel flankieren und forcieren.

In den bisherigen Ausführungen wurde mehrfach darauf hingewiesen, dass auf grünem Wasserstoff basierende Produkte und Produktionsverfahren aus Sicht der Verbraucher:innen und der Unternehmen derzeit und auf absehbare Zeit im Vergleich zu Produkten und Produktionsverfahren, die auf fossilen Energien basieren, rein **preislich** bzw. **betriebswirtschaftlich betrachtet** keine sinnvolle Entscheidung sind: Für die Konsument:innen sind mit fossilen Energien hergestellte Produkte preiswerter und für Unternehmen sind entsprechende Produktionsverfahren mit geringeren Produktionskosten verbunden. Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ist jedoch der zusätzliche Vorteil von grünem Wasserstoff, dass dadurch das Ausmaß der Treibhausgasemissionen verringert und der Klimawandel mit all seinen negativen Begleiterscheinungen abgemildert werden kann. Unter Berücksichtigung dieser positiven externen Effekte fällt der gesamtwirtschaftliche Nutzen von grünem Wasserstoff größer aus als der privatwirtschaftliche. Die einzelwirtschaftlich rationalen (sprich nutzenmaximierenden) Entscheidungen von privaten Haushalten und Unternehmen sind dann aus gesamtgesellschaftlicher Sicht nicht mehr rational (sprich wohlfahrtsmaximierend). Ökonom:innen sprechen in solchen Fällen von einem **Marktversagen**. Dessen Korrektur bzw. Heilung verlangt ein staatliches Eingreifen. Dafür bieten sich verschiedene Interventionsmöglichkeiten an.

Zu diesen staatlichen Maßnahmen gehört es zuallererst, die **finanziellen Anreize** so zu gestalten, dass sich für die Unternehmen und Verbraucher:innen der Umstieg auf Produkte der Wasserstoffwirtschaft finanziell lohnt. Dazu ist es erforderlich, dass **klimaschädliche staatliche Subventionen** für fossile Brennstoffe abgebaut werden und der **CO₂-Preis** in Deutschland und Europa spürbar erhöht wird. Letzteres kann der Staat erreichen, indem die maximal zulässige Zahl von Emissionszertifikaten im Rahmen des europäischen Zertifikathandelssystems verringert wird (das lässt den Preis für diese Zertifikate steigen) oder indem mit einer CO₂-Mengensteuer gearbeitet wird, deren Höhe entsprechend steigt. Durch einen höheren CO₂-Preis lassen sich die privatwirtschaftlichen Anreize erhöhen, auf die teureren Wasserstofftechnologien umzusteigen (vgl. Horng und Kalis 2020: 20). Das bedeutet, dass nun die aus Sicht der einzelnen Verbraucher:innen und

Unternehmen nutzenmaximierenden (und damit rationalen) Entscheidungen mit den Entscheidungen übereinstimmen, die klimapolitisch geboten sind (und daher als gesamtgesellschaftlich rational angesehen werden können).

Ein weiteres Instrument, das den derzeit noch bestehenden Preisnachteil der Wasserstofftechnologien gegenüber Technologien mit fossilen Energien beseitigen kann, sind sogenannte „**Carbon Contracts for Difference**“ (siehe Box 3).

Box 3: Carbon Contracts for Difference

CO₂-Differenzverträge sind ein Instrument, mit dem klimafreundliche Projekte selbst dann betriebswirtschaftlich lohnend werden, wenn der CO₂-Preis geringer ist als die Emissionsvermeidungskosten, die mit diesem Projekt verbunden sind (vgl. Richtstein und Neuhoff 2019). Dazu ein fiktives **Beispiel**: Angenommen, ein Unternehmen steht vor der Entscheidung, eine neue Produktionsanlage zu errichten, deren zukünftige Laufzeit zehn Jahre beträgt. Es kann eine Anlage erworben werden, die mit fossilen Energien arbeitet, oder eine CO₂-arme Anlage, die mit Wasserstoff arbeitet. Letztere hat ein Investitionsvolumen, das sechs Millionen Euro höher ist als im Fall einer fossilen Anlage. Dafür werden aber auch jedes Jahr 10.000 Tonnen weniger CO₂ ausgestoßen. Bei einer linearen Abschreibung und keinen weiteren laufenden Kosten liegen die Emissionsvermeidungskosten somit jährlich bei 60 Euro pro Tonne CO₂ (verteilt auf die 10.000 eingesparten Tonnen ergeben die jährlichen Abschreibungen in Höhe von 600.000 Euro 60 Euro pro Tonne CO₂). Ob sich diese Investition lohnt, hängt ab von dem Preis, der für die Emissionszertifikate im Rahmen des Europäischen Emissionshandels zu zahlen ist. Da sich dessen Höhe aus dem Verhältnis von angebotenen und nachgefragten Zertifikaten ergibt, ist die Höhe des Zertifikatspreises schwankend und folglich für die kommenden zehn Jahre nicht bekannt. Zur Reduzierung dieser Unsicherheit kann das Unternehmen mit dem Staat einen CO₂-Differenzvertrag abschließen, in dem folgende Regelung getroffen wird: Sollte der zu zahlende Zertifikatspreis unter den Emissionsvermeidungskosten des Unternehmens liegen, also z. B. nur 45 Euro betragen, erhält das Unternehmen die Differenz von 15 Euro pro eingesparter Tonne CO₂ vom Staat ersetzt. Dadurch unterliegt das Unternehmen dem gleichen CO₂-Preis wie seine Konkurrenzunternehmen, die mit fossilen Energien arbeiten. Sollte der Zertifikatspreis hingegen höher sein und beispielsweise 80 Euro betragen, muss das Unternehmen die Differenz von 20 Euro an den Staat abführen. Diese Regelungen haben zur Folge, dass ein Unternehmen mit einer emissionsärmeren – aber möglicherweise teureren – wasserstoffbasierten Produktionstechnologie stets die gleichen preislichen Wettbewerbsbedingungen hat wie Unternehmen, die diese Technologie nicht anwenden. Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht hat dies den Vorteil, dass innovative Technologien verwendet und damit die territorialen CO₂-Emissionen reduziert werden.

Denkbar sind neben diesen marktwirtschaftlichen bzw. Preisinstrumenten auch Anpassungen bei den **regulatorischen Rahmenbedingungen**, also z. B. Vorgaben bezüglich einer bestimmten Mindestquote an CO₂-frei erzeugtem Wasserstoff an der gesamten Wasserstoffproduktion (vgl. Kruse und Wedemeier 2021: 31 und Hebling et al. 2019: 2–4).

Schließlich könnte der Staat auch dadurch in den Markt eingreifen, dass er die aus Sicht des Klimaschutzes positiven wirtschaftlichen Aktivitäten subventioniert. **Subventionen** wirken für die Unternehmen wie eine zusätzliche Einnahme, die sie erhalten, wenn sie mit grünem Wasserstoff arbeiten. Das erhöht den betriebswirtschaftlichen Anreiz, diese Technologien anzuwenden. Für die Konsument:innen reduziert eine Subvention den zu zahlenden Nettopreis. Dadurch steigt die preisliche Attraktivität, auf klimaneutrale Produkte umzusteigen. Eine andere Form der Subventionierung besteht darin, dass der Staat selbst als Anbieter auf dem Markt aktiv wird. Er könnte z. B. in **staatlichen Unternehmen** grünen Wasserstoff herstellen und diesen anschließend zu konkurrenzfähigen Preisen verkaufen. Daraus resultierende Verluste müssten durch andere

staatliche Einnahmen – also z. B. durch Steuergelder – gedeckt werden. Gleiches ist auch für die Bereitstellung einer Wasserstofftransportinfrastruktur und der Speicherinfrastruktur denkbar.

Ein höherer CO₂-Preis ist ein **finanzieller Anreiz** für die Verbraucher:innen und Unternehmen, auf wasserstoffhaltige Produkte und Produktionsverfahren umzusteigen. Bei einem höheren staatlichen CO₂-Preis steigen die Preise für alle Produkte, die bei der Herstellung und Nutzung fossile Brennstoffe benötigen – und damit Treibhausgasemissionen verursachen. Der Umstieg auf wasserstoffhaltige Produkte wird dadurch für die privaten Wirtschaftsakteur:innen preislich attraktiver: Verbraucher:innen fragen Produkte der Wasserstoffwirtschaft nach, weil sie dann keinen CO₂-Preis zahlen müssen, was den Preis für Konsumprodukte verringert. Unternehmen passen sich an die geänderten Verbraucherwünsche an, weil sie anderenfalls ihre Produkte nicht mehr verkaufen können. Zudem lohnt sich für die Unternehmen der Umstieg auf wasserstoffhaltige Produktionsverfahren, weil sie so ihre Produktionskosten reduzieren können, wenn der zu zahlende CO₂-Preis höher ist als die Mehrkosten, die mit dem Umstieg auf die Wasserstofftechnologie verbunden sind. Und wenn erst einmal einige Unternehmen diesen technologischen Umstieg getätigt haben, müssen ihre Konkurrenten diesem Vorgehen folgen, weil sie sonst ihre preisliche Wettbewerbsfähigkeit verlieren und vom Markt verschwinden. Der skizzierte Prozess eines Umstiegs auf wasserstoffbasierte Produkte und Produktionsverfahren wird noch beschleunigt, wenn die Konsument:innen von sich aus ein Interesse an klimafreundlichen Produkten haben und wenn Unternehmen neben der Gewinnmaximierung weitere unternehmerische Ziele verfolgen, zu denen auch die Reduzierung der Treibhausgasemissionen und die Bekämpfung des Klimawandels gehören.

Dennoch sind die Unternehmen und Verbraucher:innen auf weitere staatliche Maßnahmen angewiesen, um den Umstieg auf Wasserstofftechnologien vollständig umzusetzen.

Eine Aufgabe für die Wirtschaftspolitik ist die **Förderung** der erforderlichen **Wasserstoffinfrastruktur**, allen voran der erforderlichen Rohrleitungsnetze für den Transport von Wasserstoff, eines umfangreichen Netzes öffentlich zugänglicher Wasserstofftankstellen sowie des Umbaus des öffentlichen Personennah- und -fernverkehrs (vgl. Grimm, Nöh und Schwarz 2021: 164). Auch die Verfahren zur Speicherung bzw. Weiterverarbeitung des Kohlenstoffs, der bei den Trennverfahren entsteht – also die im zweiten Abschnitt genannten „Carbon Capture and Storage“- sowie „Carbon Capture and Usage“-Verfahren –, benötigen weitere staatliche Unterstützung. Gefordert ist neben der **Finanzpolitik**, die für die Finanzierung der notwendigen öffentlichen Investitionen sorgen muss, auch die staatliche **Innovationspolitik**.

Notwendige Voraussetzung für einen raschen und umfassenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland ist zudem ein **konsistenter Rechtsrahmen**, der die gesamte Wertschöpfungskette umfasst. Das beinhaltet die rechtlichen Bestimmungen zur Planung und Genehmigung von Produktionsanlagen sowie zum Aufbau einer Wasserstofftransportinfrastruktur und der Speicherinfrastruktur, das Gefahrgutrecht, bauplanungsrechtliche Bestimmungen, Regelungen zu den Kosten des Strombezugs und viele weitere Aspekte. Eine umfangreiche Studie zum Status quo des derzeit bestehenden rechtlichen Rahmens identifiziert eine Vielzahl von Hemmnissen und Lücken, die einem schnellen Ausbau der Wasserstoffwirtschaft im Wege stehen. Die Hemmnisse reichen von einer unklaren Rechtslage bis hin zu Regelungen, die dazu führen, „dass die derzeitige Rechtslage konkret einer Umsetzung entgegensteht“ (Allolio, Ohle und Schäfer 2022: 1). Hinzu kommen komplexe Genehmigungsverfahren mit hohen formellen Anforderungen, die langwierige Prozesse mit sich bringen. Verfahrensvereinfachungen können hier zu einer Beschleunigung des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft führen (vgl. ausführlicher Allolio, Ohle und Schäfer 2022).

Da klimaneutraler Wasserstoff nur produzierbar ist, wenn die dafür erforderliche Energie aus erneuerbaren Quellen stammt, ist eine staatliche Förderung des Ausbaus der **erneuerbaren Energien** notwendig. Sollte es Deutschland nicht gelingen, ausreichende Mengen an erneuerbarer Energie bereitzustellen, müsste die benötigte Energie aus dem Ausland importiert werden. Das verlangt u. a. die Bereitstellung der erforderlichen Transportinfrastruktur, um erneuerbare Energien aus dem Ausland zu erwerben und anschließend zu den Orten in Deutschland zu befördern, an denen sie benötigt werden.

Da sich die Wasserstoffindustrie noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet, ist der Ausbau der staatlichen **Grundlagenforschung** in den genannten Technologiebereichen – also vor allem der Wasserstofftechnologien und der erneuerbaren Technologien – notwendig. Dazu gehören Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, die die jetzt noch sehr hohe Energieintensität der Wasserstoffproduktion verringern. Zur Durchführung der entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bedarf es zudem einer **bildungspolitischen Flankierung**, um den Bedarf an Fachkräften und Wissenschaftler:innen zu decken. Alternativ ist an die Anwerbung dieser Fachkräfte und Wissenschaftler:innen aus dem Ausland zu denken, was den Bereich der **Migrations- und Integrationspolitik** betrifft.

Zwingend notwendig ist eine **arbeitsmarkt- und sozialpolitische Flankierung** des Strukturwandels, der aus der Umstellung zur Wasserstofftechnologie erfolgt. Das umfasst neben monetären Transferzahlungen passgenaue Weiterbildungsmaßnahmen (qualifikatorische Anpassung der Erwerbspersonen an die neuen Arbeitsmarktanforderungen) und Mobilitätshilfen (regionale Anpassung von Arbeitskräfteangebot und -nachfrage). Ohne diese Unterstützungsmaßnahmen für diejenigen, die Arbeitsplatz- und Einkommensverluste erleiden, drohen soziale Spannungen und politische Blockaden, die die Transformation hin zu einer emissionsneutralen Wasserstoffwirtschaft erheblich erschweren.

Notwendig ist zudem eine **außenwirtschaftliche Flankierung** der inländischen Maßnahmen zur Förderung der Wasserstofftechnologien. Ohne eine solche besteht die Gefahr, dass deutsche Unternehmen und Verbraucher:innen auf fossile Brennstoffe bzw. CO₂-haltige Produkte aus dem Ausland ausweichen, wodurch dort die CO₂-Emissionen steigen, was das Ziel der globalen Klimaneutralität konterkarieren würde. Darüber hinaus fällt es deutschen Unternehmen angesichts der Konkurrenz mit ausländischen Unternehmen, die weiterhin mit preiswerteren fossilen Energien arbeiten, schwer, Wasserstofftechnologien überhaupt zur konkurrenzfähigen Marktreife zu entwickeln. Ein denkbare Instrument zur Lösung dieser Problematik ist ein europäischer „**Carbon Border Adjustment Mechanism**“. Das bedeutet, dass Produkte, die aus einem Nicht-EU-Land stammen und in der EU verkauft werden, entsprechend ihren CO₂-Emissionen mit einem CO₂-Importzoll belegt werden. So lässt sich der Preisvorteil dieser Importprodukte gegenüber den mithilfe von Wasserstoff produzierten deutschen Produkten auf dem EU-Binnenmarkt reduzieren oder sogar beseitigen (vgl. ausführlicher Petersen 2021: 137–152 und Holzmann 2022).

Schließlich braucht eine funktionsfähige Wasserstoffwirtschaft einen regulativen staatlichen Rahmen. Notwendig ist beispielsweise die Entwicklung einheitlicher **Qualitäts- und Nachhaltigkeitsstandards** für die Wasserstoffwirtschaft – nicht nur im Inland, sondern idealerweise auch international –, um sicherzustellen, dass importierter, als grüner Wasserstoff deklarierter Wasserstoff tatsächlich klimaneutral ist (vgl. BMWi 2020: 13). Nationale technologische Standards werden u. a. benötigt, damit die Schnittstellen zwischen Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -transport sowie schließlich dem Verwendungsort zusammenpassen.

Wichtig für die Gesamtheit der genannten Rahmenbedingungen ist, dass die vom Staat vorgegebenen **Rahmenbedingungen langfristiger** Natur sind. Die im sechsten Abschnitt beschriebenen physischen Infrastrukturanlagen haben in der Regel eine sehr lange Nutzungsdauer. Das impliziert für private Investor:innen eine entsprechend lange Abschreibungsdauer. Entsprechende private Investitionen setzen eine Planungssicherheit voraus, und diese verlangt wiederum, dass die staatlichen Rahmenbedingungen **stabil** sind (vgl. Grimm 2020: 24). Das gilt sowohl für die Höhe der CO₂-Preise, steuerliche Regelungen, Subventionen bzw. staatliche Förderungen als auch für die staatlich bereitgestellten Infrastrukturelemente.

Eine wichtige staatliche Aufgabe besteht schließlich noch in der Lösung der im sechsten Abschnitt skizzierten **Koordinierungsaufgaben**, die für den simultanen Aufbau aller für eine leistungsfähige Wasserstoffwirtschaft erforderlichen Infrastrukturelemente erforderlich ist. Dafür bietet sich eine **nationale Wasserstoffstrategie** an. Hier gibt es in Deutschland und Europa erheblichen Handlungsbedarf: „Während Japan, China, Südkorea und Australien schon seit Jahren im Rahmen von Strategieprozessen die Wertschöpfungskette einer Wasserstoffwirtschaft entwickeln, hat die Entwicklung von Wasserstoffstrategien und Roadmaps in

Europa, mit Ausnahme der Schweiz, gerade erst begonnen.“ (Grimm 2020: 23) So hat die **Bundesregierung** erst am 10. Juni 2020 die „Nationale Wasserstoffstrategie“ verabschiedet (vgl. BMWi 2021: 1). Ihr Ziel ist es, mithilfe von grünem Wasserstoff die Klimaschutzziele zu erreichen und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu erhalten bzw. nach Möglichkeit auch zu erhöhen. Um dies zu erreichen, verbindet die Wasserstoffstrategie die Klima- und Energiepolitik mit der Industrie- und Innovationspolitik. Im Fokus steht dabei die Förderung von integrierten Projekten, also Aktivitäten, die die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette umfassen (vgl. BMWi 2021: 1 f.).

Einen weiteren Beitrag zur Lösung des Koordinierungsproblems könnte der Staat dadurch leisten, dass er – quasi im Sinne einer **Initialzündung** – selbst als Produzent von Wasserstoff und als Nachfrager von wasserstoffbasierten Produkten auftritt. Wenn der Staat beispielsweise Wasserstoff in staatlichen Unternehmen herstellt und zumindest Teile eines Wasserstofftransportnetzes anbietet, würde das für Wasserstoff verarbeitende Unternehmen die notwendige Wasserstoffversorgung erleichtern. Als Nachfrager könnte der Staat im Rahmen des staatlichen Beschaffungswesens garantieren, dass er über einen bestimmten Zeitraum eine Mindestmenge an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen abnehmen wird. Dies erhöht die Absatzerwartungen und Planungssicherheit der Privatunternehmen, die diese Fahrzeuge anbieten.

10. Flankierende wirtschaftspolitische Maßnahmen

Um die Kosten und den Ressourcenverbrauch, die mit der Wasserstoffproduktion verbunden sind, zu reduzieren, sind weitere Maßnahmen erforderlich, die über den Bereich der Wasserstoffwirtschaft hinausgehen.

Dort, wo Wasserstoff als Energiequelle genutzt wird, ist es hilfreich, die **Energieproduktivität** zu steigern. Wenn es beispielsweise gelingt, ein bestimmtes Konsumprodukt mit weniger Energie herzustellen, wird weniger Energie verbraucht – und damit fällt auch der Bedarf an Wasserstoff geringer aus. Falls Wasserstoff als Rohstoff für industrielle Produktionszwecke benötigt wird, erreicht eine Steigerung der **Ressourcenproduktivität** das gleiche Ziel. Eine höhere Ressourcenproduktivität ist darüber hinaus in allen Bereichen der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur notwendig, denn so lassen sich die Treibhausgasemissionen, die mit der Errichtung und dem Betrieb dieser physischen Anlagen verbunden sind, verringern.

Zur Steigerung der Ressourcenproduktivität bieten sich u. a. **digitale Technologien** an. Die systematische Auswertung von Big Data, unterstützt durch künstliche Intelligenz, kann dazu beitragen, dass wirtschaftliche Entscheidungs- und Produktionsprozesse schneller, präziser und zuverlässiger durchgeführt werden können. Das reduziert den Ressourcenverbrauch und damit auch den Bedarf an Wasserstoff als Energieträger oder Rohstoffinput. Exemplarisch seien hierzu nur zwei Maßnahmen genannt (vgl. ausführlicher Petersen und Rausch 2021: 26 f.):

- Lieferant:innen können mithilfe eines **Funkmodems** feststellen, wann sie Öltanks oder Getränke- und Zigarettenautomaten wieder nachfüllen müssen und so die Routen der Tanklaster bzw. Transporter optimieren (vgl. Mattern und Flörkemeier 2010: 111). Damit sinkt der Energieverbrauch, also auch der Bedarf an wasserstoffbasierter Energie im Verkehrswesen.
- Der Begriff der **Predictive Maintenance** betrifft die Auswertung von Daten von Maschinen, um diese aus der Ferne zu überwachen und zu warten (vgl. Spiekermann 2019: 17). Diese vorausschauende Wartung von Maschinen erhöht deren Nutzungsdauer und verringert dadurch den Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Energie, die für die Herstellung von Ersatzprodukten anfallen würden.

Eine weitere flankierende Maßnahme ist die Reduzierung der Transportkosten durch eine höhere **Energieeffizienz** im **Verkehrswesen**. Dieser Aspekt betrifft vor allem – aber keinesfalls ausschließlich – den Import

von preiswertem grünen Wasserstoff aus weit entfernten Regionen, die diesen Wasserstoff wegen ihrer geografischen und klimatischen Vorteile zu geringeren Kosten herstellen können als Deutschland bzw. andere europäische Länder. Wenn es gelingt, die Kosten des Transports von Wasserstoff durch eine höhere Produktivität und Effizienz im Verkehrswesen zu reduzieren, lohnt sich der Import dieses Wasserstoffs inklusive der erforderlichen Weiterverteilung innerhalb Deutschlands.

Darüber hinaus ist auch an neue Produktions- und Konsumansätze zu denken, die ebenfalls den Ressourcenverbrauch reduzieren:

- Im Bereich der Produktion kann die **zirkuläre Ökonomie** (Circular Economy) den Ressourcenverbrauch reduzieren. Bei diesem Wirtschaftskonzept verbleiben die verwendeten Stoffe, die mit der Herstellung eines Produkts verbunden sind, auch über die Lebensdauer des Gegenstands im Stoffkreislauf. Zentrale Elemente der zirkulären Ökonomie sind „die Wieder- und Weiterverwendung von Waren, das Recycling von Materialien und Stoffen sowie eine Gestaltung der Waren, die eine Kreislaufführung ohne Verluste in der Qualität ermöglicht“ (Hiebel et al. 2017: 7). Ziel ist, Abfälle, Emissionen und eine Entnahme natürlicher Ressourcen aus der Umwelt so weit wie möglich zu verringern. Wenn dies gelingt, wird auch weniger Wasserstoff als Energieträger oder Input benötigt.
- Ein Beispiel für Konzepte eines ressourcenschonenden Konsums ist die **Sharing Economy**. Gebrauchsgegenstände werden mithilfe einer digitalen Vernetzung von mehreren Nutzer:innen geteilt. Dies wird auch als Collaborative Consumption bzw. gemeinschaftlicher Konsum bezeichnet (vgl. Fücks 2016: 316). Ein prominentes Beispiel dafür ist das Carsharing. Bei dieser Nutzungsform werden die Menschen Mitglied in einem Carsharing-Netzwerk, das eine bestimmte Zahl von Automobilen erwirbt. Die Netzwerkmitglieder können diese Automobile gegen die Zahlung eines Mitgliedsbeitrags und/oder einer nutzungsabhängigen Gebühr benutzen. Wenn sich mehrere Haushalte dadurch ein Auto teilen und nicht mehr jeder Haushalt ein eigenes Automobil kauft, werden weniger Autos produziert. Das verringert den produktionsbedingten Ressourcenverbrauch und damit auch den Wasserstoffbedarf.

Die skizzierten Maßnahmen zur Steigerung der Ressourcen- und Energieproduktivität haben zur Folge, dass ein gegebenes Niveau wirtschaftlicher Aktivitäten mit einem geringeren Ressourcen- und Energieeinsatz bewältigt werden kann. Damit sinkt für sich genommen der Bedarf an Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff.

11. Fazit und Ausblick

Zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität leistet Wasserstoff einen wichtigen Beitrag. Allerdings gilt dies nur, wenn es sich um **grünen Wasserstoff** handelt, der daraus entsteht, dass Wasser unter Hinzufügung von erneuerbarer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird, ohne dass Treibhausgasemissionen anfallen.

Gegenwärtig werden in Deutschland jährlich rund 55 bis 60 Terawattstunden Wasserstoff produziert und verbraucht (zum Vergleich: die deutsche Nettostromerzeugung lag 2019 bei 518 Terawattstunden, vgl. Grimm 2020: 23). Dabei handelt es sich allerdings überwiegend um grauen Wasserstoff aus Erdgas. Nur rund 5 Prozent sind grüner Wasserstoff (vgl. Kruse und Wedemeier 2021: 27). Weltweit liegt der Anteil des emissionsfreien Wasserstoffs an der gesamten verwendeten Wasserstoffmenge sogar bei unter einem Prozent (vgl. Bukold 2020: 17). Grund für diesen geringen Anteil sind die derzeit noch sehr **hohen Kosten**, die bei der Herstellung von Wasserstoff anfallen – vor allem bei CO₂-freiem grünem Wasserstoff, aber auch bei blauem und türkisem Wasserstoff, die CO₂-arm sind (siehe Box 4).

Box 4: Kosten der Wasserstoffproduktion in Deutschland und Europa

Eine eindeutige Quantifizierung der Herstellungskosten von Wasserstoff ist wegen der zahlreichen Produktionsverfahren und der unterschiedlichen Produktionsbedingungen – also z. B. der Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie – nicht möglich. So kommt beispielsweise eine Ausarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestags bezüglich der Frage zu diesen Produktionskosten in Deutschland und im Ausland zu der Einschätzung, dass dieser Kostenvergleich nicht vorgenommen werden kann (vgl. Deutscher Bundestag 2020: 4). Es gibt jedoch eine Reihe von Schätzungen mit zumindest ähnlichen Ergebnissen. So kommt Bukold in seinen Untersuchungen zu der Einschätzung, dass die Herstellungskosten von einem Kilogramm grünem Wasserstoff in Westeuropa gegenwärtig bei durchschnittlich rund fünf bis sechs Euro liegen. Das sind doppelt so hohe Kosten wie im Fall des blauen Wasserstoffs und dreimal so hohe Produktionskosten wie bei grauem Wasserstoff (vgl. Bukold 2020: 7). Horng und Kalis präsentieren ähnliche Schätzungen. Danach liegen die Kosten für die Herstellung von einem Kilogramm schwarzem, braunem bzw. grauem Wasserstoff (also Wasserstoff auf Basis fossiler Ausgangsstoffe) in Europa bei rund 1,50 Euro. Bei blauem Wasserstoff betragen die Kosten rund zwei Euro und bei grünem Wasserstoff zwischen 2,50 und 5,50 Euro (vgl. Horng und Kalis 2020: 12).

Wegen der hohen Produktionskosten ist Wasserstoff im Vergleich zu fossilen Energien derzeit preislich **nicht wettbewerbsfähig**. Matthes et al. kommen zu folgender Einschätzung: Wenn grüner Wasserstoff in Deutschland im Vergleich zu Erdgas wettbewerbsfähig sein sollte, müsste der CO₂-Preis bei über 300 Euro pro Tonne CO₂ liegen. Blauer Wasserstoff hätte den gleichen Preis wie Erdgas, wenn der CO₂-Preis bei etwas unter 200 Euro pro Tonne CO₂ liegen würde (vgl. Matthes et al. 2020: 4 f.). Diese CO₂-Preise würden die Kosten des Einsatzes von Erdgas entsprechend erhöhen, wodurch Wasserstoff preislich wettbewerbsfähig wird. Zum Vergleich: Die Preise, die für Zertifikate im Rahmen des Europäischen Emissionshandels bezahlt werden mussten, lagen in den ersten elf Monaten des Jahres 2022 bei durchschnittlich knapp 80 Euro (vgl. DEHSt 2022: 5). Das ist bereits der höchste Preis über so einen langen Zeitraum. In den Jahren 2019 und 2020 lag der jahresdurchschnittliche Zertifikatspreis bei jeweils rund 25 Euro (vgl. DEHSt 2021: 6).

Von **zentraler Bedeutung** für einen Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland sind drei Aspekte: **Ers**tens eine ausreichende Menge an erneuerbarer Energie, **zweitens** eine leistungsfähige, möglichst emissionsarme Wasserstoffinfrastruktur und **drittens** technologische Fortschritte bei den Verfahren zur Herstellung von grünem Wasserstoff, der – wie gezeigt – momentan noch so hohe Produktionskosten hat, dass er sowohl gegenüber fossilen Brennstoffen also auch gegenüber den anderen Wasserstoffarten nicht wettbewerbsfähig ist.

Damit das geschieht, müssen die aus Sicht des Klimaschutzes zwingend erforderlichen Maßnahmen auch aus Sicht der privaten Haushalte und Unternehmen lohnend sein – sonst ist in einer Marktwirtschaft kein flächendeckender Umstieg auf wasserstoffbasierte Produkte und Produktionsverfahren zu erwarten. Für die deutsche Wirtschaftspolitik ergeben sich daraus unserer Ansicht nach **drei konkrete Handlungsansätze**:

1. Um die Wasserstoffwirtschaft preislich wettbewerbsfähiger zu machen, sollten **Preisverzerrungen** zulasten wasserstoffbasierter Energie abgeschafft werden. Das verlangt den Abbau von Subventionen für fossile Energien und die Einpreisung der negativen externen Effekte, die Treibhausgasemissionen hervorrufen. Letzteres verlangt einen spürbar höheren CO₂-Preis in Deutschland und Europa als jetzt. Gegenwärtig geht das Umweltbundesamt davon aus, dass eine im Jahr 2021 in Deutschland ausgestoßene Tonne CO₂ weltweit Schäden in Höhe von 201 Euro verursacht (vgl. Umweltbundesamt 2021b). Eine funktionierende Marktwirtschaft verlangt, dass diese gesamtgesellschaftlichen Zusatzkosten in den Marktpreisen enthalten sind. Und wie weiter oben bereits erwähnt: Bei diesem CO₂-Preis wäre zumindest blauer Wasserstoff gegenüber Erdgas preislich wettbewerbsfähig.

2. Zur Flankierung der Aktivitäten privater Wirtschaftsakteur:innen sind die im neunten und zehnten Abschnitt genannten **wirtschaftspolitischen Aktivitäten** zu intensivieren. Das betrifft vor allem die staatliche Förderung der erforderlichen öffentlichen Transportinfrastruktur, den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Intensivierung der öffentlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, die Flankierungen in den Bereichen der Arbeitsmarkt-, Bildungs- und Sozialpolitik sowie eine außenwirtschaftliche Flankierung.
3. Um die skizzierten Abstimmungsprobleme im Kontext der erforderlichen simultanen Errichtung umfangreicher Infrastrukturanlagen durch private Akteur:innen in den Griff zu bekommen, sollte der Staat – hier vor allem der Bund – eine koordinierende Rolle übernehmen und eine sektor- und akteursübergreifende **gesamtwirtschaftliche Wasserstoffstrategie** vorantreiben – idealerweise in enger Abstimmung mit einer entsprechenden Strategie auf Ebene der EU.

Alle diese Maßnahmen werden jedoch nicht verhindern können, dass Deutschland auf absehbare Zeit auf den **Import von grünem Wasserstoff** angewiesen sein wird. Wegen der im achten Abschnitt skizzierten Kosten, die mit dem Transport von importiertem Wasserstoff verbunden sind, wird der Wasserstoffimport mit einem Schiff aus weit entfernten Regionen auf absehbare Zeit betriebswirtschaftlich keine vernünftige Lösung sein. Sinnvoller ist der Import von Wasserstoff für Deutschland aus Regionen, die näher liegen und gleichzeitig über ein umfangreiches Angebot an erneuerbaren Energien verfügen. Das sind vor allem sonnenreiche Regionen in Südeuropa und Nordafrika sowie skandinavische Regionen, die über viel Wasser- und Windkraft verfügen. Der Wasserstofftransport sollte dabei in Pipelines erfolgen, was bei diesen Entfernungen aus Kostengründen sinnvoll ist. Zur Sicherstellung dieser Importmöglichkeiten ist es erforderlich, dass Deutschland entsprechende Wasserstoffpartnerschaften mit **südeuropäischen Ländern** und vergleichbaren **europäischen Nachbarn** etabliert. Das kann auch eine finanzielle Unterstützung beim Aufbau der notwendigen Wasserstoffinfrastruktur in diesen Ländern einschließen. Dabei dürfen jedoch die Erwartungen an die importierbaren Wasserstoffmengen nicht zu hoch angesetzt werden. Wie im achten Abschnitt beschrieben, setzt der Wasserstoffimport aus Schwellen- und Entwicklungsländern voraus, dass diese Länder die erforderliche anspruchsvolle Wasserstoffinfrastruktur erst einmal errichten und anschließend betreiben können. Das kostet Zeit und braucht gut ausgebildete Fachkräfte sowie technologisches Know-how.

Auf absehbare Zeit ist es daher eher unwahrscheinlich, dass die Schwellen- und Entwicklungsländer die Mengen an grünem Wasserstoff liefern können, die Deutschland und Europa für eine Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen benötigen, aber selbst nicht herstellen. Das hat zur Folge, dass Wasserstoff – vor allem, wenn er klimaneutral hergestellt sein soll – ein knapper Energieträger bleiben wird. Das macht es notwendig, Wasserstoff nur dort einzusetzen, wo dies eine effiziente Handlungsoption ist.

Literatur

- Adam, P., S. Engelshove, F. Heunemann, T. Thiemann und C. von dem Bussche (2020). „Wasserstoffinfrastruktur – tragende Säule der Energiewende“. *Whitepaper von Siemens Energy, Gascade Gastransport GmbH und Nowega GmbH*. Ohne Ort.
- AGBF-Bund (Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland) (2008). *Wasserstoff und dessen Gefahren – Ein Leitfaden für Feuerwehren*. Köln.
- Agora Energiewende, Agora Industrie (2022). *12 Thesen zu Wasserstoff*. Berlin.
- Allolio, F., L. Ohle und J. Schäfer (2022). „Studie zum Rechtsrahmen einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft“. *Rechtswissenschaftliche Studie im Auftrag der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie*. Berlin.
- Bertelsmann Stiftung (Hrsg.) (2023). *Ökonomische Evaluation klimapolitischer Instrumente*. Gütersloh.

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2012). *Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Kurzfassung*. Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2021). *Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie*. Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin.
- Bukold, S. (2020). *Blauer Wasserstoff – Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades*. Ohne Ort.
- DEHSt (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt) (2022). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen – November 2022*. Berlin.
- DEHSt (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt) (2021). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen – Jahresbericht 2020*. Berlin.
- Deutscher Bundestag (Wissenschaftliche Dienste) (2020). „Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff“. *Dokumentation WD 5 – 3000 – 029/20*. Berlin.
- DIHK (Deutscher Industrie- und Handelskammertag) (2020). *Wasserstoff – DIHK-Faktenpapier*. Berlin und Brüssel.
- Domnick, C. (2018). „Vergleichende Untersuchung und Bewertung verschiedener wasserstoffbasierter Direktreduktionsverfahren zur Senkung der Treibhausgasemissionen in der Stahlproduktion“. *Bachelor-Arbeit im Studiengang Verfahrenstechnik der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg*. Hamburg.
- Fücks, R. (2016). *Intelligent wachsen – Die grüne Revolution*. Bonn.
- Grimm, V. (2020). „Der Green Deal als Chance für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit in Europa: Wasserstoff und synthetische Energieträger“. *ifo Schnelldienst* (73) 6/2020. 22–28.
- Grimm, V., M. Janser und M. Stops (2021). „Kompetenzen für die Wasserstofftechnologie sind jetzt schon gefragt“. *IAB-Kurzbericht* 11/2021. Nürnberg.
- Grimm, V., L. Nöh und M. Schwarz (2021). „Investitionen für nachhaltiges Wachstum in Deutschland: Status quo und Perspektiven“. *Wirtschaftsdienst* (101). 162–167.
- Hebling, C., M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller, T. Pfeifer, P. Plötz, O. Ranzmeyer, A. Schaadt, F. Sensfuß, T. Smolinka und M. Wietschel (2019). *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Karlsruhe und Freiburg.
- Hennicke, P., und M. Fishedick (2007). *Erneuerbare Energien*. München.
- Hiebel, M., J. Bertling, J. Nühlen, H. Pflaum, A. Somborn-Schulz, M. Franke, K. Reh und S. Kroop (2017). „Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie“. *Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie, Landesverband NRW*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.). Oberhausen.
- Holzmann, S. (2022). „Zwischen Klimaschutz und Industrieerhalt – Was kann der CBAM leisten?“. *Policy Brief Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft 4/2022*. Bertelsmann Stiftung (Hrsg.). Gütersloh.
- Horng, P., und M. Kalis (2020). *Wasserstoff – Farbenlehre: Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie*. Berlin und Greifswald.
- Kruse, M., und J. Wedemeier (2021). „Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung“. *Wirtschaftsdienst* (101). 26–32.
- Mattern, F., und C. Flörkemeier (2010). „Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge“. *Informatik-Spektrum* (33). 107–121.
- Matthes, F. C., C. Heinemann, T. Hesse, P. Kasten, R. Mendelevitch, D. Seebach und C. Timpe (2020). *Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe – Eine Überblicksuntersuchung*. Berlin.
- Merten, F., A. Scholz, C. Krüger, S. Heck, Y. Girard, M. Mecke und M. Goerge (2020). *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung*. Wuppertal und Berlin.
- NORD/LB (2021). *Wasserstoffwirtschaft: Chancen, Herausforderungen und Grenzen*. Hannover.
- Petersen, T. (2021). *CO₂ zum Nulltarif? Warum Treibhausgasemissionen einen Preis haben müssen*. Gütersloh.

- Petersen, T., und T. Rausch (2021). „Klimawandel abbremsen – CO₂-Preise und digitale Innovation als Chance“. *Megatrend-Report #03* der Bertelsmann Stiftung. Gütersloh.
- Richtstein, J. C., und K. Neuhoff (2019). „CO₂-Differenzverträge für innovative Klimalösungen in der Industrie“. *DIW aktuell* Nr. 23. Berlin.
- Riemer, M., F. Schreiner und J. Wachsmuth (2022). *Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia – Analysis of Technical Feasibility und Economic Considerations*. Karlsruhe.
- Schulte, S., M. Schönfisch und G. Brändle (2020). „Wasserstoff: Bezugsoptionen für Deutschland – Kostenvergleich von importiertem und lokal produziertem CO₂-armen Wasserstoff“. *EWI Policy Brief*. Köln.
- Spiekermann, M. (2019). „Chancen und Herausforderungen in der Datenökonomie“. *Aus Politik und Zeitgeschichte* (69) H. 24-26. 16–21.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2021). *Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse*. Berlin.
- Staiß, F., J. Adolf, F. Ausfelder, C. Erdmann, M. Fishedick, C. Hebling, T. Jordan, G. Klepper, T. Müller, R. Palkovits, W.-R. Poganietz, W.-P. Schill, M. Schmidt, C. Stephanos, P. Stöcker, U. Wagner, K. Westphal und S. Wurbs (2022). *Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030: Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse*. München.
- Statistisches Bundesamt (2022). *Treibhausgase: G20 verursachen 81 % der globalen CO₂-Emissionen* (Datenstand 3.11.2022). ([Treibhausgase: G20 verursachen 81 % der globalen CO₂-Emissionen - Statistisches Bundesamt \(destatis.de\)](https://www.destatis.de/DE/Presseportal/Neuerscheinungen/Themen/Klima/energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle)).
- Umweltbundesamt (2021a). „Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem“. Veröffentlicht auf [umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle) am 11.3.2021 (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle>).
- Umweltbundesamt (2021b). „Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen“. Veröffentlicht auf [umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten) am 10.8.2021 (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>).
- Weider, M., A. Metzner und S. Rammler (2004). „Das Brennstoffzellen-Rennen – Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie“. *WZB Discussion Paper* SP III 2004-101. Berlin.

Adresse | Kontakt

Bertelsmann Stiftung
Carl-Bertelsmann-Straße 256
33311 Gütersloh
Telefon +49 5241 81-0

Dr. Thieß Petersen
Senior Advisor
Telefon +49 5241 81-81218
thiess.petersen@bertelsmann-stiftung.de

www.bertelsmann-stiftung.de/economicsoftransformation

www.bertelsmann-stiftung.de