

Szenarien und Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung von Wasserstoff und synthetischen Folgeprodukten



Eine Untersuchung für das Institut für Wärme und Mobilität - IWO

Michael Bräuninger, Mark-Oliver Teuber, Silvia Stiller und Sven Schulze

Hamburg, Dezember 2020

Ansprechpartner
Prof. Dr. Michael Bräuninger
ETR: Economic Trends Research GbR
Tel: 040 28475131
braeuninger@mb-etr.de



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Entwicklung der Windenergie in Deutschland	6
3. Mögliche Ausbaupfade für die Wasserstoffnutzung	10
4. Investitionsentscheidungen	14
5. Eine Bewertung der nationalen Wasserstoffstrategie	21
6. Fazit	24
Quellenverzeichnis	26



Das Wichtigste in aller Kürze

Bei der Windenergie haben hohe und langfristig garantierte Preise zu einem schnellen Aufbau von Erzeugungskapazitäten geführt. Der Kapazitätsaufbau hat zu Lerneffekten geführt, die eine erhebliche Kostensenkung ermöglicht haben.

Bei den Erzeugungskapazitäten von Wasserstoff und seinen synthetischen Folgeprodukten könnte in naher Zukunft ein ähnlicher Kapazitätsaufbau mit erheblichen Lerneffekten erfolgen. Für den Markthochlauf müssen dafür jedoch entsprechende Investitionsanreize gesetzt werden.

In einem stilisierten Marktmodell werden zwei Szenarien betrachtet:

- 1) **Regulierungsszenario:** Grüner Wasserstoff wird nur für bestimmte Anwendungen in den Markt gebracht. Andere Sektoren werden ganz vom Wasserstoffeinsatz abgeschottet. In der Folge entwickelt sich der Markt für Wasserstoff nur langsam.
- 2) **Marktszenario:** Es werden Investitionen in den Aufbau von Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff gefördert und die nachfrageseitige Regulierung anwendungsoffen gestaltet. Der Preis für grünen Wasserstoff bildet sich vorwiegend am Markt, wobei es die Entscheidung der Marktteilnehmer ist, ob grüner Wasserstoff eingesetzt wird. In der Folge wird grüner Wasserstoff in vielen Anwendungen eingesetzt und der Markt entwickelt sich schnell.

Im Marktszenario kommt es kurzfristig zu Preissteigerungen für grünen Wasserstoff, die erhebliche Investitionsanreize generieren. Es kommt schnell zu einem Ausbau der Kapazitäten, zu Produktionssteigerungen, zu Lerneffekten und dann auch zu einem Rückgang der Preise. Wasserstoff wird schneller in den Markt eingeführt als im Regulierungsszenario, dadurch können schneller größere Mengen fossiler Energieträger substituiert werden. Eine detaillierte Diskussion der Szenarien zeigt, dass das Marktszenario insgesamt überlegen ist.

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie wird ein Markthochlauf von Wasserstoff angestrebt, der im Grundsatz anwendungsoffen ist. Die Ziele und Maßnahmen sind im Grundsatz sehr gut mit einem schnellen Kapazitätsaufbau im Marktszenario zu vereinbaren. Dies steht jedoch in einem gewissen Widerspruch zu den konkret genannten Priorisierungen einzelner Anwendungen und möglichen unterschiedlichen Förderverfahren für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Dabei bedeutet der Ausschluss bestimmter Anwendungen von einer Förderung in der Praxis den dortigen Nichteinsatz dieser derzeit noch teureren Technologie. Für den angestrebten schnellen Markthochlauf mit signifikanten CO₂-Einsparungen ist es daher von herausragender Bedeutung, die Produktion und den Einsatz von Wasserstoff und seinen synthetischen Folgeprodukten konsequent anwendungsoffen zu fördern.



1. Einleitung

Deutschland strebt an, zusammen mit den anderen Staaten der Europäischen Union bis zum Jahre 2050 Treibhausgasneutralität zu realisieren. Langfristig korrespondiert dies mit dem Ziel der Klimaneutralität gemäß den Zielen des Übereinkommens von Paris aus dem Jahre 2015. Vereinbart wurde dort, die Erderwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau möglichst auf 1,5 Grad zu beschränken. Die Bundesregierung erkennt dabei an, dass „gasförmige und flüssige Energieträger für ein Industrieland wie Deutschland auch langfristig ein integraler Teil des Energiesystems bleiben werden“.¹ Grünem Wasserstoff kommt mithin „eine zentrale Rolle bei der Weiterentwicklung und Vollendung der Energiewende“ zu. Diese Schlüsselrolle erhält grüner Wasserstoff und seine synthetischen Folgeprodukte wie Power-to-Gas und Power-to-Liquids, weil sie es ermöglichen, erneuerbare Energie zu speichern und zu transportieren. Damit erlauben Wasserstoff und seine synthetischen Folgeprodukte die zeitliche und örtliche Abkoppelung des Energieverbrauchs von der Energiegewinnung.

Die Abkoppelung des Energieverbrauchs von der Erzeugung ist nicht nur für Deutschland, sondern auch für viele andere Industrieländer mit begrenzten heimischen Potenzialen zur Erzeugung von erneuerbarer Energie bedeutsam. Gleichzeitig bietet die Erzeugung von grünem Wasserstoff und seiner synthetischer Folgeprodukte wirtschaftliche Potenziale für viele Schwellen- oder Entwicklungsländer mit großen Angeboten an Flächen mit günstigen Erzeugungsmöglichkeiten von erneuerbarer Energie. Vor diesem Hintergrund hat die Bundesregierung die „Nationale Wasserstoffstrategie“ formuliert, mit der Deutschland zur führenden Nation bei den Anwendungen moderner Wasserstofftechnik werden soll. In der Umsetzung der Wasserstoffstrategie wird Deutschland außenwirtschaftliche Partnerschaften mit solchen Ländern aufbauen, in denen aufgrund der geographischen Lage Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte effizient produziert werden können. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Konjunkturprogramms beschlossen, den Ausbau der Wasserstoffwirtschaft mit 9 Mrd. Euro zu fördern.

Die Analyse zielt darauf ab, die Investitionsentscheidungen für Anlagen zur Produktion von erneuerbarem Wasserstoff zu verstehen und transparent zu machen. Dazu wird in Kapitel 2 dargestellt, wie sich Investitionen und Erzeugungskapazitäten bei der Windenergie entwickelt haben. Dies ist für die Marktentwicklung von Wasserstoff aus zwei Gründen relevant: Zum einen waren für den Aufbau der Kapazitäten von Windenergie hohe Investitionen in eine neue Technologie notwendig. Da dies auch bei dem Aufbau von Kapazitäten zur Erzeugung von Wasserstoff notwendig ist, könnte die Entwicklung der Windenergiekapazitäten ein Vorbild für die Wasserstoffkapazitäten sein. Zum anderen wird die für die Erzeugung von grünem Wasserstoff notwendige regenerative Energie zu einem Großteil Windstrom sein, sodass wiederum hohe Investitionen in

¹ Deutscher Bundestag (2020) S. 112



Windenergieanlagen notwendig sind. Darüber hinaus wird auch Photovoltaik, insbesondere in sonnenreichen Ländern, dazu genutzt werden, Elektrolyseure und Syntheseanlagen zu betreiben. In Kapitel 3 werden die Ausbaupotenziale von erneuerbarem Wasserstoff dargestellt. Dabei wird auf die möglichen Kostendegressionen in den verschiedenen Anwendungsbereichen von Wasserstoff eingegangen.

In Deutschland wird aktuell diskutiert, ob Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte in allen möglichen Anwendungsbereichen oder nur gezielt in bestimmten Bereichen eingesetzt werden sollte. Für eine ökonomische Analyse dieser Fragestellung wird dazu in Kapitel 4 ein stark stilisiertes Modell der Investitionsentscheidungen für erneuerbaren Wasserstoff dargestellt. Mit dem Modell werden einige Simulationen durchgeführt, in denen gezeigt wird, wie sich die Entwicklung des Absatzmarktes auf die Investitionsentscheidung auswirkt. Dabei wird insbesondere untersucht, welchen Einfluss der Absatzmarkt von Wasserstoff auf die Investitionsentscheidung hat. Betrachtet werden zwei Ansätze:

1. **Marktszenario:** Es werden auf verschiedenen Märkten gleichzeitig Anreize geschaffen, erneuerbaren Wasserstoff einzusetzen.
2. **Regulierungsszenario:** Erneuerbarer Wasserstoff soll zunächst nur in wenigen, ausgewählten Anwendungsbereichen eingesetzt werden und wird auch nur für diese Anwendungen gefördert.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen findet dann in Kapitel 5 eine Bewertung der nationalen Wasserstoffstrategie statt. Kapitel 6 zieht ein Fazit.



2. Entwicklung der Windenergie in Deutschland

Die Energieerzeugung mittels Windenergie ist den letzten Jahren stark ausgebaut worden. Die Bruttostromerzeugung der Windenergie stieg dabei von 35,3 Mrd. kWh im Jahr 2006 auf 52,7 Mrd. kWh im Jahr 2012 auf zuletzt 126,0 Mrd. kWh im Jahr 2019 an. Damit war Windenergie im Jahr 2019 für 51,6 Prozent der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien verantwortlich. Davon entfielen 41,5 Prozent auf Windenergie an Land und 10,1 Prozent auf Windenergie auf See. Mittlerweile werden damit über 20 Prozent des gesamten deutschen Stroms durch Windkraftanlagen erzeugt.²

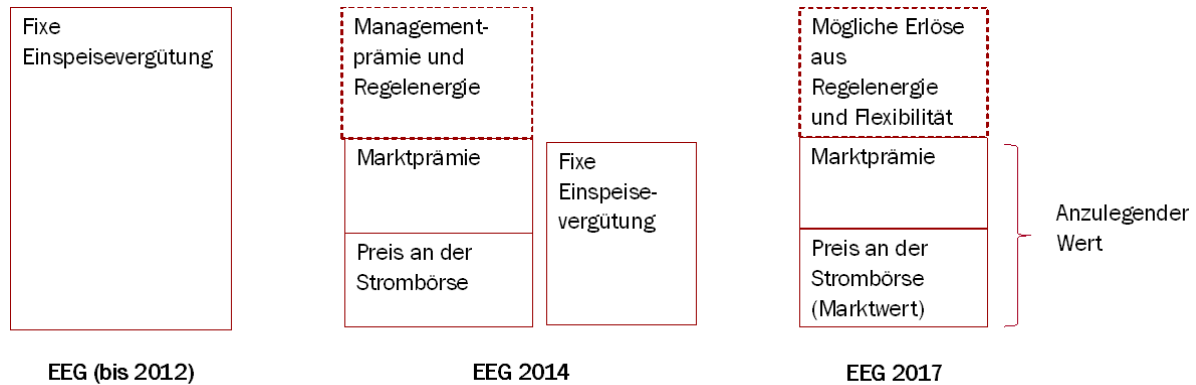
Die stetig gewachsene Windenergieerzeugung ist das Resultat eines starken Ausbaus der Erzeugungskapazitäten. Bisher hat der Kapazitätsaufbau im Wesentlichen an Land stattgefunden. So stieg die installierte Leistung von Onshore-Windanlagen zwischen dem Jahr 2000 mit 6,1 Mio. kW bis zum Jahr 2019 auf 53,3 Mio. kW. In den nächsten Jahren wird ein starkes Wachstum der Kapazitäten auf See angestrebt. Während im Jahr 2014 erst 1 Mio. kW an Leistung installiert war, ist die installierte Leistung bis zum Jahr 2019 bereits auf 7,5 Mio. kW gewachsen.

Im Folgenden wird kurz dargestellt, welche Anreize zu dem Kapazitätsaufbau für Windenergie geführt haben. Die Förderung der Windenergienutzung in Deutschland erfolgte in den letzten Jahrzehnten mithilfe des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), das am 1. April 2000 in Kraft getreten ist, und seither vielfach novelliert wurde. Dies spiegelt sich auch im Förderregime wider. Während bis zum Jahr 2011 fixe Einspeisevergütungen über einen großen Teil des Lebenszyklus der entsprechenden Anlagen gewährt wurden, wurde ab dem Jahr 2012 die Vergütung zunehmend differenziert und mit dem EEG 2017 ein Ausschreibungsverfahren eingeführt. Abbildung 1 stellt die unterschiedlichen Systematiken der Förderung bzw. Vergütung stilisiert dar.

² Zu den Daten siehe BMWi (2019) und BMWi (2020a).



Abbildung 1: Förderung gemäß verschiedenen Versionen des EEG



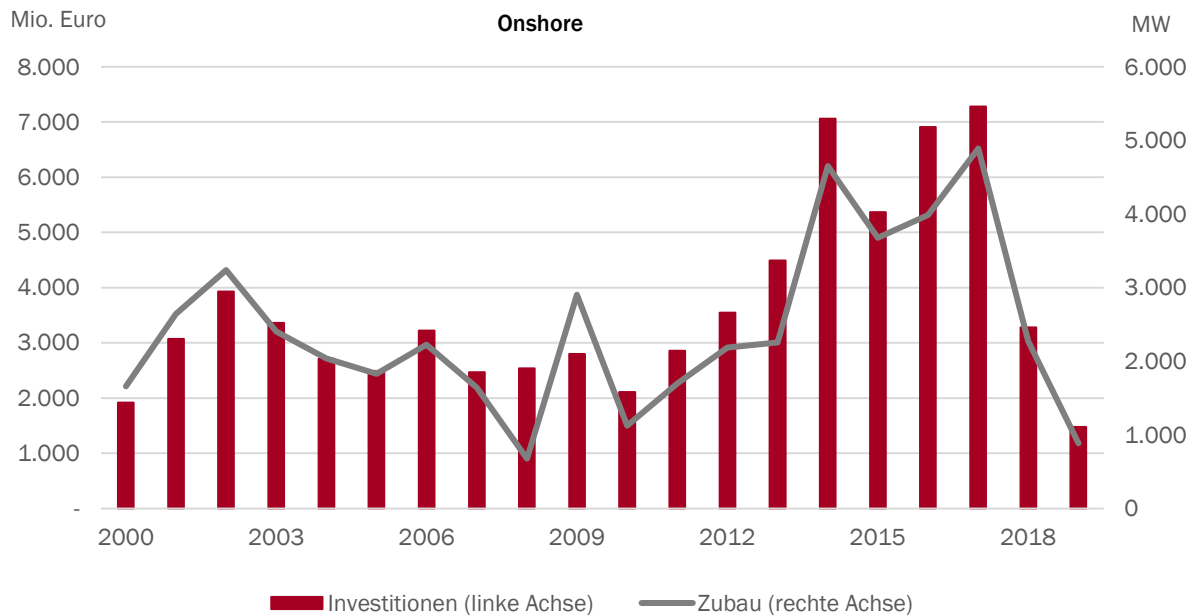
Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von Next-Kraftwerke (2020)

Grundsätzlich hatten bzw. haben die Regelungen des EEG die folgenden, auch für den potenziellen Ausbau der Wasserstofftechnologie, relevanten Effekte:

- Für die Investoren in Windanlagen bestanden vor allem zu Beginn des EEG infolge der Garantien in Bezug auf Vergütungen und Mengenabnahme für längere Zeit keine Marktrisiken. Es verblieben technologische Risiken sowie das Risiko schwankender Wetterbedingungen und damit variierender Windbedingungen.
- Mit den garantierten und deutlich über den Marktpreisen liegenden Einspeisevergütungen wurden erhebliche Investitionsanreize gesetzt. Dabei wurden die Investitionsanreize allerdings nicht über einen Marktmechanismus erzeugt, sondern im politischen Prozess vorgegeben. Die Kosten sind über die EEG-Umlage an die Verbraucher weitergegeben worden.

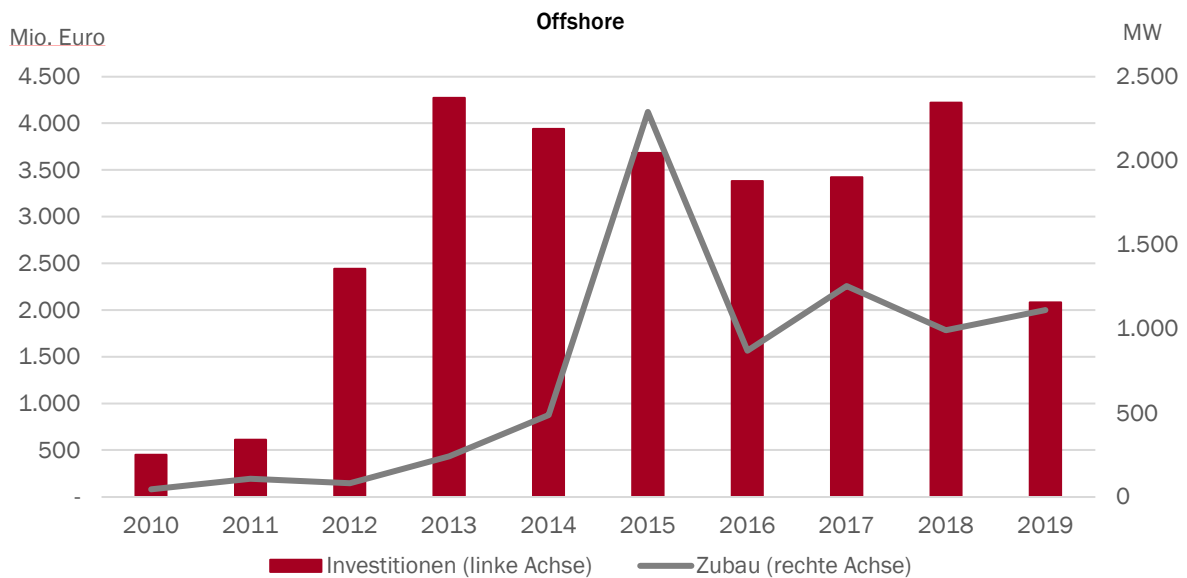


Abbildung 2: Investitionen und Zubau Windenergie Onshore, 2000-2019



Quelle: BMWi (2020a)

Abbildung 3: Investitionen und Zubau Windenergie Offshore, 2010-2019



Quelle: BMWi (2020a)

Die Abbildungen 2 und 3 verdeutlichen die Anreizwirkungen auf die Investitionen in den Bereichen der On- und Offshore-Windenergie. Der Zubau an Kapazitäten mittels Investitionen im Onshore-Bereich zeigt eine deutliche Spitze vor dem Wechsel zum Ausschreibungsmodell, also vor dem Jahr 2018, weil viele Investitionsentscheidungen vorgezogen wurden, um noch in den Genuss



fixer Einspeisevergütungen zu kommen. Aufgrund der teilweise abweichenden Bedingungen im Offshore-Bereich waren die Schwankungen bei den Investitionen zwischen 2013 und 2018 weniger stark ausgeprägt. Sie lagen zwischen 3,4 Mrd. und 4,3 Mrd. Euro. Jedoch führten auch hier Änderungen der Regulierung und damit der Anreizmechanismen ab 2019 zu einem merklichen Rückgang der Investitionen auf gut 2 Mrd. Euro. Es ist allerdings zugleich darauf hinzuweisen, dass das Ziel der Einführung des Ausschreibungsmodells vor allem in der Rückführung oder zumindest Stabilisierung der Förderkosten bestand. Zwischen den Jahren 2017 und (prognostiziert) 2020 dürfte dies für Windenergie an Land durchaus gelingen, da nur ein Anstieg der EEG-Gesamtvergütungszahlungen von gut 8 Mrd. Euro auf etwa 8,7 Mrd. Euro erwartet wird. Bei Windenergie auf See wird zugleich ein Anstieg der EEG-Gesamtvergütungszahlungen von 3,3 Mrd. Euro in 2017 auf etwa 5,5 Mrd. Euro in 2020 erwartet. Allerdings geht bei Windenergie an Land damit einher, dass die Zahlungen pro kWh (bezogen auf die EEG-Strommengen) von 9,3 Eurocent (2017) auf 8,5 Eurocent (2020) sinken und bei Windenergie auf See zwischen 2017 (18,9 Eurocent) und 2020 (18,5 Eurocent) nahezu konstant bleiben.³

Damit ergeben sich die folgenden Erkenntnisse für den Aufbau von Erzeugungskapazitäten von grünem Wasserstoff:

- Hohe und über lange Zeiten garantierte Preise erzeugen große Investitionsanreize. Insbesondere die festgelegten Preise führen allerdings zu hohen Kosten, die bei zukünftigen Förderungen neuer Technologien vermieden werden sollten, um Akzeptanzprobleme zu vermeiden. Diesem Nachteil könnte zum Beispiel durch eine von Beginn direkt ausschreibungsbasierte Förderung begegnet werden.
- Mit dem Ausbau der Erzeugungskapazitäten kommt es zu erheblichen Lerneffekten, sodass die Erzeugungskosten deutlich fallen. Außerdem kommt es über den schnellen Kapazitätsaufbau zügig zu einer deutlichen Reduktion von CO₂-Emissionen.

³ Zu den Daten siehe BMWi (2020c).



3. Mögliche Ausbaupfade für die Wasserstoffnutzung

Szenarien zur Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff

Die Wasserstoffindustrie befindet sich noch im Aufbau und für das Erreichen der Marktreife der verschiedensten Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoffanwendungen bedarf es Investitionen entlang ihrer gesamten Wertschöpfungskette. Verschiedene Studien haben analysiert, welche Investitionsvolumina und Aktivitäten erforderlich sind, um ein Hochfahren der Wasserstoffindustrie in naher Zukunft erreichen zu können. Mit dieser Thematik hat sich aktuell auch das Hydrogen Council (2020) befasst. Dies ist eine globale Initiative von Industrie-, Transport- und Energieunternehmen mit dem langfristigen Ziel, Wasserstoff für den globalen Energieumbau zu nutzen. Insgesamt kommt die genannte Studie zu dem Ergebnis, dass Wasserstoff in naher Zukunft die wettbewerbsfähigste kohlenstoffarme Lösung für zahlreiche Anwendungen werden kann.⁴

In den Szenarien, die sich auf die Bereiche „Transport“, „Wärme und Energie für Gebäude“, „Wärme und Energie für die Industrie“ und „Grundstoffindustrien“ beziehen, ist Wasserstoff in 22 von 35 exemplarischen Anwendungsfällen wettbewerbsfähiger als andere kohlenstoffarme Lösungen. Beispiele für solche Anwendungen finden sich etwa im Transportbereich (gewerblich genutzte Autos, Zugverkehr und weiträumiger Transport), wo sinkende Anschaffungs- und Treibstoffkosten zur Kostensenkung für wasserstoffbetriebene Transportmittel führen. So zeigt etwa ein Szenario, dass bei einem Anstieg der jährlich produzierten Brennstoffzellenautos auf etwa 0,6 Million Fahrzeuge die Gesamtkosten für den Wagenbesitzer (Kapital, Betrieb, Finanzierung) bis zum Jahr 2030 um 45,0 Prozent sinken könnten. Dies ist insbesondere auf abnehmende Produktionskosten im Zuge der Realisierung von Skaleneffekten bei der Produktion von Brennstoffzellenautos zurückzuführen. Ein anderes Beispiel ist der Einsatz von Wasserstofftechnologien für die Erzeugung von Wärme. Wasserstoffbetriebene Heizkessel können aufgrund sinkender Kosten und Investitionen für Heizkessel zur wettbewerbsfähigsten kohlenstoffarmen Lösung werden. Die Kosten für das Heizen mit wasserstoffbetriebenen Heizkesseln könnten sich in eine Größenordnung von 900 bis 1.600 USD pro Haushalt im Jahr 2030 entwickeln.

Kostenwettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffanwendungen nimmt mit Größenwachstum zu

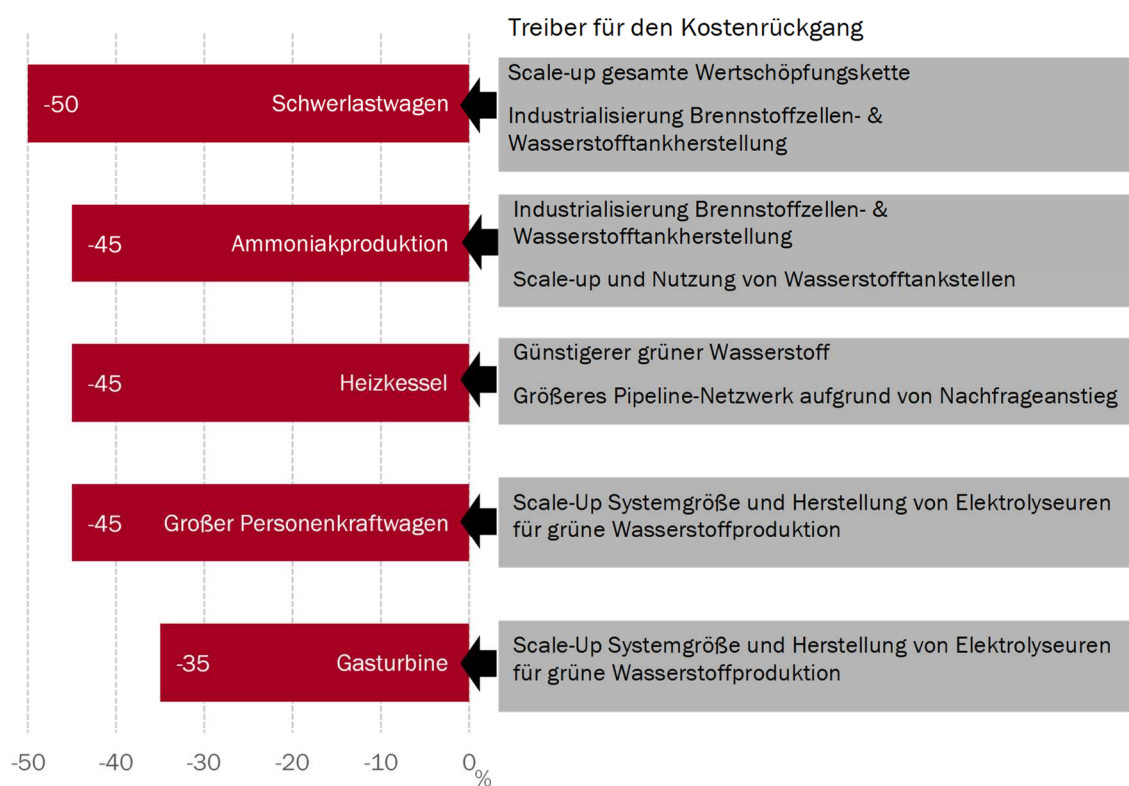
Insgesamt zeigen die Beispiele für den wettbewerbsfähigen Einsatz von Wasserstoff in den verschiedenen Anwendungsbereichen, dass das Größenwachstum in der Produktion („Scale up“) in den betrachteten Szenarien der zentrale Treiber für Kostenreduktionen ist. Dies betrifft die Produktion und Distribution von Wasserstoff sowie die Produktion von Systemkomponenten (vgl.

⁴ Wasserstoff kann entweder direkt oder in Form von synthetischen Folgeprodukten genutzt werden. Diese hätten kostenseitig den Vorteil, dass die vorhandene Infrastruktur ohne Zusatzkosten weitergenutzt werden kann. Die Potenziale von synthetischen Kraft- und Brennstoffen für eine CO₂-neutrale Energieversorgung werden in Perner et al. (2018) dargestellt.



Abbildung 4). Dabei zeigt die Studie des Hydrogen Council aus dem Jahr 2020, dass deutliche Kostenreduktionen durch das Größenwachstum der Wasserstoffindustrie auch ohne Technologiesprünge erreicht werden können. Dieses Ergebnis findet sich auch in einer Studie der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie aus dem Jahr 2018. Diese betont, dass die Realisierung von Skaleneffekten in der Elektrolyse eine deutliche Kostenreduktion für die Erzeugung von Wasserstoff erwarten lässt. Dies gilt insbesondere, weil Anbieter von Wasserelektrolyseanlagen häufig aufgrund der bisher geringen Nachfrage, sowohl nach kleinen als auch großen Anlagen, (noch) im Manufakturbetrieb arbeiten.⁵

Abbildung 4: Kostenrückgang* Wasserstoffanwendungen 2020-2030** (in %)



*TCO: Gesamtkosten für den Nutzer während der gesamten Nutzungszeit (Kapital, Betrieb, Finanzierung)

** Annahme: Kohlenstoffarmer und grüner Wasserstoff haben im Jahr 2050 zusammen einen Anteil am globalen Energieverbrauch von 18 Prozent

Quellen: Hydrogen Council (2020); Darstellung ETR.

Abbildung 5 zeigt verschiedene Investitionspfade und -bereiche, mit denen die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoffangebot und -anwendungen entsprechend der Szenarien des Hydrogen Council im Zeitraum von 2020 bis 2030 erreicht werden kann.

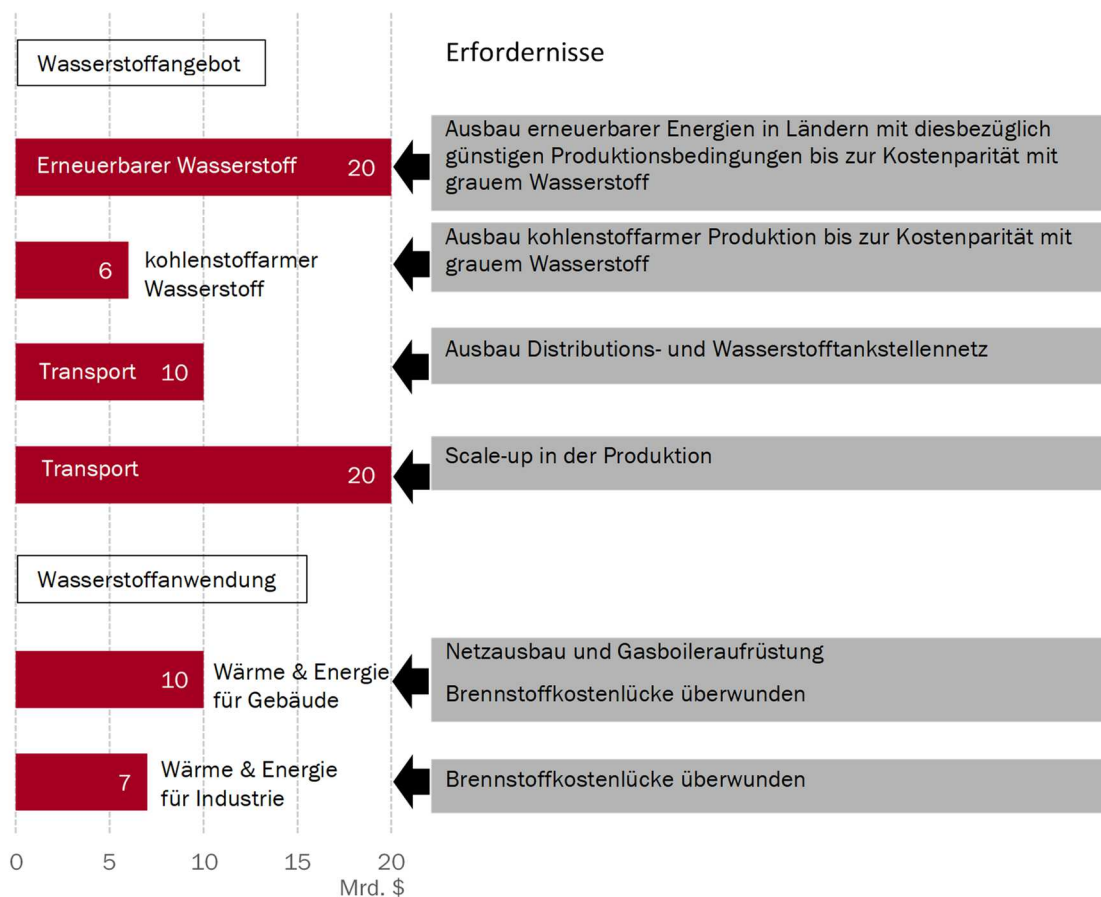
⁵ NOW GmbH (2018).



Investitionsbedarfe ergeben sich für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff etwa bezüglich des Ausbaus erneuerbarer Energien in Ländern, wo diese günstig erzeugt werden kann. Dies ermöglicht die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff im größeren Umfang. Potenziale für Kostenreduktionen in der Wasserstoffproduktion ergeben sich auch aus Investitionen im Bereich des Angebotes von kohlenstoffarmem Wasserstoff sowie in die Transportinfrastruktur für Wasserstoff (etwa Ausbau des Distributions- und Wasserstofftankstellennetzes).

Für die genannten Bereiche summieren sich die Investitionserfordernisse im Zeitraum von 2020 bis 2030 auf rund 56 Mrd. USD. Im gleichen Zeitraum würde eine Investitionssumme von 17 Mrd. USD in Wasserstoffanwendungen in Wärme und Energie für Gebäude/Industrie notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff zu erreichen.

Abbildung 5: Investitionsbedarf 2020-2030* (Mrd. USD)



*Annahme: Kohlenstoffarmer und grüner Wasserstoff haben im Jahr 2050 zusammen einen Anteil am globalen Energieverbrauch von 18 Prozent.

Quellen: Hydrogen Council (2020); Darstellung ETR.

Wichtig für die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff in verschiedenen Anwendungen sind kostengünstige Voraussetzungen für die Nutzung erneuerbarer Energien für seine Herstel-



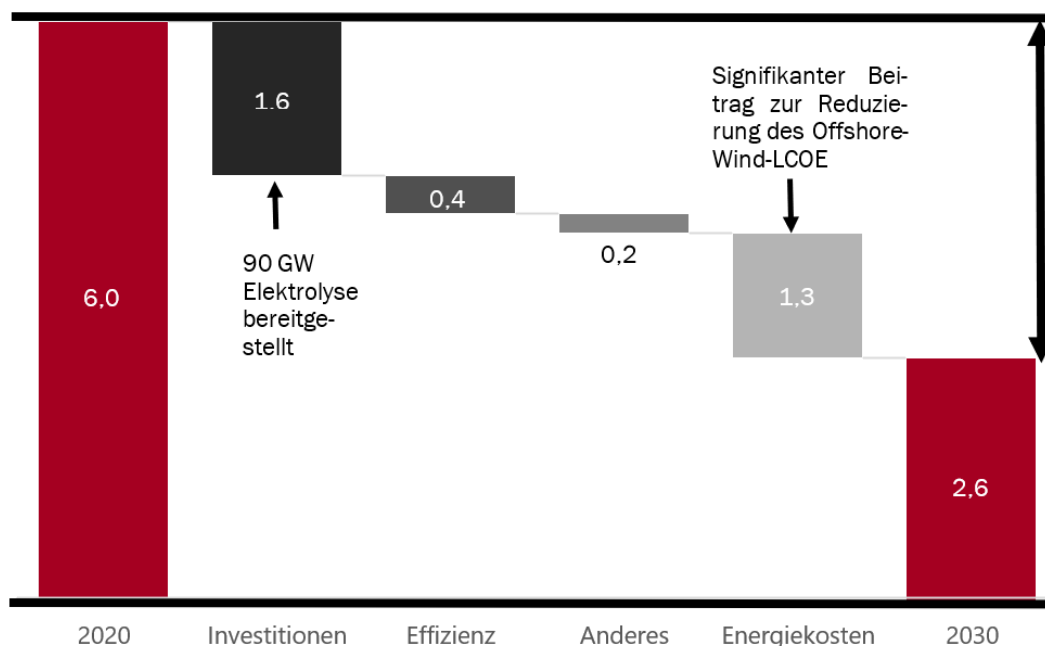
lung. Dabei gab es in den vergangenen Jahren einen deutlichen Kostenrückgang bei der Produktion von grünem Wasserstoff (vgl. Abbildung 6). Seit 2010 sind die Kosten der Elektrolyse um 60,0 Prozent gesunken: Von 10 bis 15 USD auf 4 bis 6 USD pro Kilogramm Wasserstoff im Jahr 2020. Der Kostenrückgang wird sich aller Voraussicht nach zukünftig weiter fortsetzen und der Preis für grünen Wasserstoff würde bei der Nutzung von Offshore-Windenergie für die Elektrolyse bis zum Jahr 2030 um 60,0 Prozent zurückgehen können (vgl. Hydrogen Council 2020). In diesem Szenario lägen die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff dann im Jahr 2030 bei 2,60 USD.

Rückläufige Kosten für die Produktion von grünem Wasserstoff

Investitionen, Effizienzgewinne und sinkende Energiekosten für die Elektrolyse sind die treibenden Faktoren für den Kostenrückgang (vgl. Abbildung 6): In dem Szenario sinken die Investitionen für Anlagegüter im gesamten System bis 2030 um 60,0 Prozent (höherer Produktionsumfang, Lerneffekte, technologischer Fortschritt). Dabei wird die Systemgröße für Elektrolyse von 2 MW auf 90 MW erhöht. Effizienzverbesserungen werden durch den Anstieg des Wirkungsgrads von 65,0 auf 70,0 Prozent in Jahr 2030 erreicht. Gleichzeitig sinken die Betriebs- und Wartungskosten für die Wasserstoffproduktion aufgrund günstigerer Systemteile und Nutzungserfahrungen.

Einen wichtigen Beitrag zur Kostenreduktion für die Produktion von grünem Wasserstoff leisten sinkende Kosten für erneuerbaren Strom. In dem betrachteten Szenario sinken die Kosten für Offshore-Wind-LCOE von 57 auf 33 USD/MWh und die Netzgebühren sinken von 15 auf 10 USD/MWh.

Abbildung 6: Kostenentwicklung der Produktion von grünem Wasserstoff 2020-2030 (Elektrolyse mit Offshore-Windenergie, USD pro kg Wasserstoff)



Quellen: Hydrogen Council (2020); Darstellung ETR



4. Investitionsentscheidungen

Im Folgenden wird ein stark stilisiertes Modell der Investitionsentscheidungen für erneuerbaren Wasserstoff dargestellt. Dieses erlaubt es, wesentliche Marktinterdependenzen bei dem Aufbau einer Wasserstofferzeugung aufzuzeigen und zu diskutieren.

Eine Investition ist rentabel, wenn der mit dem Zins i über den Lebenszyklus n abdiskontierte Strom der Gewinne R , die mit der Investition generiert werden, größer ist als die Investitionskosten I_0 :

$$PV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i_t)^t}$$

Die Gewinne sind abhängig von den Absatzmengen, dem Preis und den Produktionskosten:

$$R_t = p_t x_t - k_t x_t$$

Für die Investitionsentscheidung müssen Erwartungen über die zukünftige Entwicklung der Produktionsmenge (x_t), der Stückkosten (k_t) und der Preise (p_t) getroffen werden. Dabei sind die Produktionsmenge und die Produktionskosten abhängig von den verwendeten Technologien und können von dem Unternehmen direkt beeinflusst werden. Der Preis bildet sich am Markt und ist abhängig von Angebot und Nachfrage, wobei gegebenenfalls auch staatliche Interventionen zu berücksichtigen sind.

Determinanten von Produktion und Kosten

Die produzierten Mengen sind zum einen durch die Nachfrage, zum anderen durch die Produktionskapazitäten beschränkt. Die Nachfrage (N) ist abhängig von der Marktgröße (M) und vom Preis (p). Wir gehen davon aus, dass die Marktgröße aufgrund des immer fortschreitenden Wechsels zu erneuerbaren Energien kontinuierlich wächst. In den ersten Jahren ist das Wachstum noch langsam, da der Energieverbrauch zu wesentlichen Teilen noch auf anderen (fossilen) Energieträgern basiert. Zugleich nimmt die Nachfrage aber auch mit dem Preis ab: $x_N = M/p^\varepsilon$, wobei ε die Preiselastizität der Nachfrage beschreibt. Wenn für bestimmte Anwendungen die Verwendung von Wasserstoff vorgeschrieben ist, wäre die Preiselastizität hier sehr gering, d.h. Wasserstoff müsste zu jedem Preis verwendet werden. In der Regel wird es aber Alternativen zur Verwendung von Wasserstoff geben. Diese könnten fossile Energieträger sein oder auch andere Formen der erneuerbaren Energieversorgung. Je leichter und je günstiger die Alternativen zu Verfügung stehen, desto größer wird die Preiselastizität sein.

Die Marktgröße wird durch die Anwendungsgebiete von grünem Wasserstoff bestimmt. Sofern grüner Wasserstoff nur in einzelnen Bereichen eingesetzt wird, ist der Markt klein und wächst langsam. Wird Wasserstoff aber in verschiedenen Bereichen, zum Beispiel auch im Verkehrs- oder



im Wärmesektor eingesetzt, ist der Markt groß und wächst schnell. Im Folgenden werden Szenarien betrachtet, die sich bezüglich der Geschwindigkeit, mit der die Marktgröße wächst, unterscheiden.

Das Angebot an erneuerbarem Wasserstoff ist durch die Produktionskapazitäten K beschränkt. Daher gilt: $x_A = bK$, wobei b ein konstanter Parameter für die Produktivität der Anlage ist. Die Produktionskosten sind wesentlich durch die installierte Technologie bestimmt. Ein zentrales Ziel bei der Einführung von grünem Wasserstoff ist die Reduktion der CO₂-Emissionen. Dabei ist die Reduktion R proportional zur Erzeugung von Wasserstoff: $R = \delta x$.

Insofern wird in der stark stilisierten Modellversion von konstanten Produktionskosten (bei einmal installierten Technologien) ausgegangen. Tatsächlich werden die Produktionskosten im Zeitverlauf sinken, da Lerneffekte bei der Produktion erzielt werden (dies betrifft auch Transport und Distributionskosten). Die Effekte einer solchen Kostendegression werden später diskutiert.

Es ist durchaus möglich, dass – bei den gegebenen Kosten und den erzielbaren Marktpreisen – Investitionen in die Kapazitäten zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff grundsätzlich nicht rentabel sind: $PV < 0$. In diesem Fall würden keine Investitionen vorgenommen. Sofern dies dauerhaft der Fall ist, sind die Investitionen ökonomisch nicht sinnvoll. Es ist jedoch auch möglich, dass es durch die Installation von Kapazitäten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff zu Lerneffekten kommt, die die zukünftigen Produktionskosten senken und damit zukünftige Investitionen rentabel machen. Hier entsteht das Problem, dass die Lerneffekte ausbleiben, wenn die Anfangsinvestitionen nicht getätigt werden. Sofern es ein wirtschafts- oder energiepolitisches Interesse an diesen Investitionen gibt, sollte der Staat Maßnahmen ergreifen, um die Ausgangsinvestitionen rentabel zu machen. Diese könnten zum Beispiel sein:

- Der Staat kann Preise auf einem rentablen Niveau festlegen. Dazu muss der Preis oberhalb des Marktpreises festgelegt werden, wobei die Differenz zum Marktpreis durch staatliche Zuschüsse und/oder Umlagen ausgeglichen wird. In der Folge steigt die Rentabilität R_t .
- Der Staat kann die Investitionskosten (vollständig oder in Teilen) übernehmen oder ausreibungsbasierte Markteinführungsprogramme für PtX-Technologien einführen
- Durch regulatorische Maßnahmen – z.B. vorgeschriebene Quoten von erneuerbaren Energien – kann eine Nachfrage mit hoher Zahlungsbereitschaft geschaffen werden.

Das stilisierte Simulationsmodell

Für die weitere Untersuchung werden die oben dargestellten Zusammenhänge in einem stilisierten Modell aus fünf Gleichungen zusammengefasst. Gleichung 1 beschreibt die Nachfrage in Abhängigkeit von der Marktgröße und dem Preis. Gleichung 2 beschreibt das Angebot in Abhängigkeit von Erzeugungskapazität K . Gleichung 3 beschreibt die Entwicklung der Kapazität K . Die Kapazität in einem Jahr entspricht der Kapazität im Vorjahr, erhöht um die Investitionen I . Gleichung



4 beschreibt die Investitionen. Die Investitionen sind proportional zur Rentabilität, die wiederum abhängig vom Produktpreis ist. Gleichung 5 beschreibt die Produktionsmenge x über das Marktgleichgewicht ($A = N$):

$$(1) \quad N = M/p^\varepsilon$$

$$(2) \quad A = bK$$

$$(3) \quad K = K_{-1} + I$$

$$(4) \quad I = cp$$

$$(5) \quad x = bK = M/p^\varepsilon$$

$$(6) \quad R = \delta x$$

Mit dem Modell werden ein Regulierungsszenario und ein Marktszenario betrachtet:

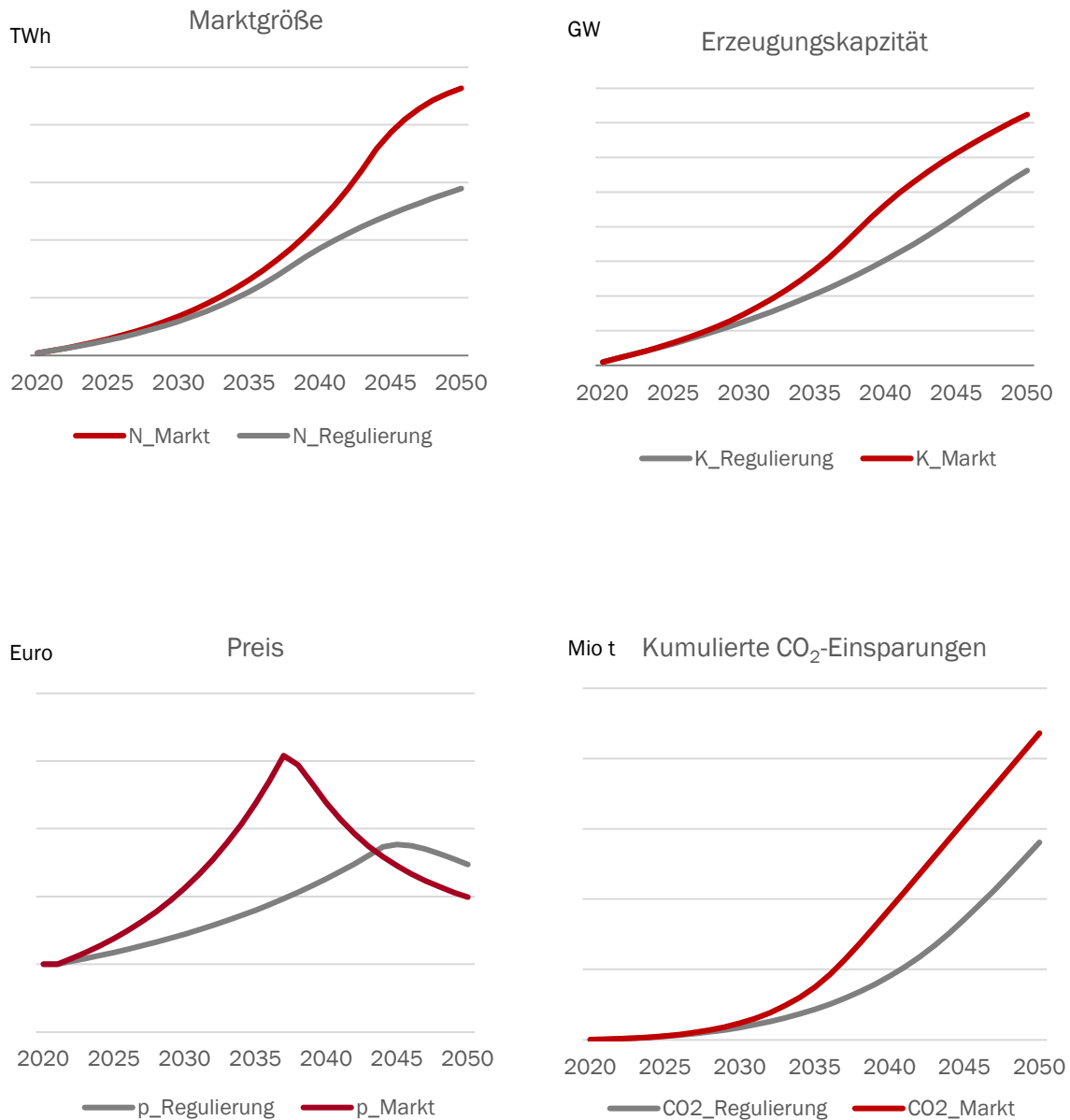
1. **Regulierungsszenario:** Grüner Wasserstoff wird nur für bestimmte Anwendungen über Quoten in den Markt gebracht. In diesen Bereichen findet eine Förderung für den Einsatz von grünem Wasserstoff statt. Andere Bereiche werden nicht gefördert oder ganz vom Einsatz abgeschottet. In der Folge entwickelt sich der Markt für Wasserstoff nur langsam.
2. **Marktszenario:** Es wird die Investition in den Aufbau von Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff gefördert, z.B. über ein ausschreibungs-basiertes Marktmodell kombiniert mit geeigneter nachfrageseitiger Regulierung in den Verbrauchssektoren. Der Preis für grünen Wasserstoff bildet sich am Markt, wobei es die Entscheidung der Marktteilnehmer ist, ob grüner Wasserstoff eingesetzt wird. In der Folge wird grüner Wasserstoff in vielen Anwendungen eingesetzt und der Markt entwickelt sich schnell.

In Abbildung 7 wird die Entwicklung von verschiedenen zentralen Variablen dargestellt. Dargestellt ist zum einen die Entwicklung der Marktgröße, die für die Szenarien von außen vorgegeben wird. Rechts daneben ist die Erzeugungskapazität abgebildet, welche die Produktionsmenge bestimmt. Im unteren Bereich finden sich der Preis die kumulierten CO₂-Einsparungen.

Betrachtet man den Kapazitätsaufbau bei Windenergie, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, in dieser stilisierten Form, so würde durch Abnahmegarantien für den über Wind erzeugten Strom sprunghaft eine quasi unendliche Marktgröße geschaffen, da jede produzierte Menge auch abgenommen würde. Der Preis für Strom aus Windenergie wurde zunächst auf einem hohen Niveau festgeschrieben, dann schrittweise abgesenkt. Die Erzeugungskapazitäten wurden zunächst langsam aufgebaut. Dann folgten Lerneffekte und ein sehr schneller Kapazitätsaufbau. Mit sinkenden Preisen gingen dann die Investitionen und damit die Geschwindigkeit des Kapazitätsaufbaus zurück. Insofern gleicht der Aufbau der Windkapazitäten eher dem schnellen Ausbauszenario, wobei die Entwicklung staatlich gesteuert und nicht im Marktprozess erfolgte.



Abbildung 7: Ergebnisse der Simulation



Zunächst sind die Kapazitäten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff gering. Im Regulierungsszenario wird der Markt langsam aufgebaut. Nun beginnt die Nachfrage nach Wasserstoff zu steigen, wobei der Anstieg langsam und staatlich gesteuert stattfindet. In der Folge steigt der Preis nur moderat und die ausgewählten Sektoren können zu günstigen Konditionen mit Wasserstoff versorgt werden. Damit liegen aber auch nur geringe Investitionsanreize vor, sodass nur ein langsamer Kapazitätsaufbau stattfindet. Der Vorteil dieser Strategie besteht darin, dass Sektoren mit grünem Wasserstoff versorgt werden können, für die keine anderen Möglichkeiten bestehen, die Energieversorgung auf erneuerbare Energieträger umzustellen.



Im Marktszenario wird der Markt schnell aufgebaut. In der Folge steigt der Preis an. Dies ist auf die in diesem Fall hohe Nachfrage bei begrenzten Erzeugungskapazitäten zurückzuführen.⁶ Dies bedingt wiederum hohe Investitionsanreize, sodass die Kapazitäten schnell ausgebaut werden. Infolgedessen nimmt die Produktion zu, wodurch dann auch die Preise wieder zurückgehen. Der Vorteil dieser Strategie liegt zum einen darin, dass die Kapazitäten schneller aufgebaut werden. Deshalb wird zügig eine größere Menge Wasserstoff erzeugt. Dies impliziert, dass auch über den betrachteten Zeitraum insgesamt mehr Wasserstoff erzeugt und in den Markt gebracht wird. Deshalb liegen die kumulierten CO₂-Einsparungen auch dauerhaft höher als im ersten Szenario.

Tatsächlich könnte es sein, dass einzelne Sektoren aufgrund der hohen Preise keinen Wasserstoff einsetzen würden. Dies gilt insbesondere für Industriebereiche, die im internationalen Wettbewerb stehen und deshalb höhere Produktionskosten nicht im Preis weitergeben können. Dies ist grundsätzlich kein energie- oder klimapolitisches Problem, da es letztlich irrelevant ist, in welchem Sektor es zu CO₂-Einsparungen kommt. Sofern aber politisch gewünschte Sektorziele erreicht werden sollen, kann auch eine direkte Förderung von Wasserstoff-Anwendungen in bestimmten Bereichen erfolgen. Dies ist einer Förderung durch künstlich niedrig gehaltene Preise für Wasserstoff vorzuziehen, da die direkte Förderung transparenter ist.

Die höheren CO₂-Einsparungen sprechen eindeutig für das Marktszenario. Es könnte jedoch eingewandt werden, dass in den Simulationen ausschließlich Wasserstoff als Option zur CO₂-Einsparung dargestellt wurde. Andere Optionen – wie die direkte Verwendung von erneuerbarem Strom – werden nicht betrachtet. Dabei hat die direkte Verwendung von Strom neben Kostenvorteilen auch energiepolitische Vorteile, da Umwandlungsverluste, die bei der Erstellung von Wasserstoff entstehen, entfallen. Bei dieser Argumentation wird aber angenommen, dass die direkten Stromanwendungen immer auch gleichwertige Alternativen zur Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Folgeprodukten seien. Dies ist aber, zumindest bisher, aus Sicht der Verbraucher nicht immer der Fall. In der Folge finden zum Beispiel batteriebetriebene Pkw trotz erheblicher Subventionen nicht immer Akzeptanz. Darüber hinaus ist unklar, ob die erneuerbare Stromproduktion in Deutschland ausreicht, um den derzeitigen Strombedarf zu decken (insgesamt und zu jedem Zeitpunkt) und zugleich neue Verbraucher über die Sektorkoppelung zu versorgen. Dies zeigt sich insbesondere in den immer geringeren Ausbaupotenzialen für Windräder. Hinzu kommt, dass die Erzeugung von grünem Wasserstoff und von PtX-Produkten an besonders wind- und sonnenreichen Standorten auf der Welt durch die bessere Auslastung der Stromerzeugungsanlagen die Effizienz Nachteile gegenüber einer direkten Stromnutzung von in Deutschland erzeugtem erneuerbarem Strom ausgleichen oder zumindest deutlich minimieren kann.

⁶ Eine aktuelle Studie von Aurora Energy Research kommt zu dem Schluss, dass in einem Pure Economies – high demand Szenario der Preisanstieg zwischen 5 und 38 Prozent liegen wird. In einem Green Push – kommt es hingegen kaum zu Preissteigerungen. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Preisen und Investitionen aber nicht thematisiert.



Tabelle 1 fasst die wesentlichen Pro und Contra Argumente für einen schnellen Marktaufbau von Wasserstoff zusammen. Es zeigt sich, dass die Argumente für einen schnellen Ausbau im Markt-szenario eindeutig überwiegen und das kein Argument dagegen ohne Erwiderung bleiben muss. Deshalb wird im nächsten Abschnitt geprüft, in welcher Form die nationale Wasserstoffstrategie den Marktaufbau adressiert.



Tabelle 1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile in den beiden Szenarien

Vorteile einer kontrollierten Marktausweitung Regulierungsszenario

- Es gibt Bereiche, in denen grüner Wasserstoff die einzige CO₂-freie Möglichkeit ist und andere Bereiche (Verkehr, Wärme), in denen andere Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion bestehen. Deshalb sollte Wasserstoff bestimmten Sektoren vorbehalten werden, andere Sektoren sollen andere Möglichkeiten nutzen.
- Hohe Preise führen dazu, dass bestimmte Sektoren (wie z.B. die Industrie) belastet werden und gegebenenfalls nicht mit grünem Wasserstoff versorgt werden. Wenn es für die Industrie keine CO₂-freien Alternativen zum grünen Wasserstoff gibt, können die CO₂-Emissionen in diesem Sektor nicht ausreichend abgesenkt werden.
- Die direkte Nutzung von Strom im Verkehrs- und Wärmesektor hat gegenüber den wasserstoffbasierten Technologien langfristig Vorteile, da Umwandlungsverluste entfallen (höhere Energieeffizienz). Deshalb ist die Infrastruktur für die strombasierten Technologien möglichst schnell aufzubauen.

Vorteile einer schnellen Marktausweitung Marktszenario

- Durch eine frühe Produktion großer Mengen von grünem Wasserstoff kann dieser in allen Sektoren früher fossile Energieträger in einem größeren Umfang ersetzen.
- Klimapolitisch ist es irrelevant, in welchem Sektor die Reduktion der CO₂-Emissionen stattfindet. Insgesamt werden bei einem schnellen Kapazitätsaufbau die höchsten Einsparungen erzielt.
- Es ist unklar, zu welchem Preis und in welchen Mengen CO₂-freier Wasserstoff von der Industrie abgenommen werden würde. Vor diesem Hintergrund sind Investitionen unsicher, der Ausbaupfad könnte sehr langsam sein. Ein schneller Ausbau führt zu höherer Planungssicherheit.
- Sofern grüner Wasserstoff für die Industrie „zu teuer“ ist, könnte der Preis über direkte Subventionen gesenkt werden: Dies macht auch deutlich, welche Industrie welche Förderung erhält und ist transparenter als den Preis durch eine Beschränkung der Nachfrage niedrig zu halten.
- Welche Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion bestehen, ist abhängig von Technologien und von Präferenzen der Nutzer: Bestimmte CO₂-arme Alternativen im Verkehrs- und Wärmesektor (insbesondere die Elektrifizierung) sind zwar möglich, finden aber trotz erheblicher Subventionierung nicht überall Akzeptanz. Insofern müssen auch hier weitere Technologien verfügbar gemacht werden.
- Es ist unklar, ob die erneuerbare Stromproduktion in Deutschland ausreichen wird, um den derzeitigen Strombedarf und zukünftige Stromanwendungen zu decken.
- Große Teile des Gesamt-Energiebedarfs werden langfristig über Importe von speicherbaren erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden müssen.
- Durch die Erzeugung von grünem Wasserstoff und von PtX-Produkten an wind- und sonnenreichen Standorten auf der Welt können Effizienz Nachteile gegenüber einer direkten Stromnutzung von in Deutschland erzeugtem erneuerbarem Strom aufgehoben oder zumindest deutlich minimiert werden.



5. Eine Bewertung der nationalen Wasserstoffstrategie

In der Nationalen Wasserstoffstrategie [NWS] vom Juni 2020 formuliert die Bundesregierung das Ziel, einen zügigen Markthochlauf von grünem Wasserstoff zu unterstützen und entsprechende Wertschöpfungsketten zu etablieren. Hierbei wird unterstellt, dass sich in den nächsten zehn Jahren ein globaler und europäischer Wasserstoffmarkt entwickeln und zugleich die Nachfrage nach Wasserstoff mittel- bis langfristig merklich steigen wird. Mithilfe der NWS soll ein Rahmen für private Investitionen in die wirtschaftliche und nachhaltige Erzeugung, den Transport und die Nutzung von (grünem) Wasserstoff geschaffen werden, um die entsprechenden volkswirtschaftlichen Potenziale zu heben.

Im Folgenden erfolgt eine kurze Bewertung der im Aktionsplan genannten Maßnahmen und es wird untersucht, ob diese einen schnellen oder einen regulierten Kapazitätsaufbau fördern. Die geplanten Maßnahmen lassen sich dabei den folgenden Feldern zuordnen:

1. Erzeugung von Wasserstoff
2. Anwendungsbereiche
 - a. Verkehr
 - b. Industrie
 - c. Wärme
3. Infrastruktur und Versorgung
4. Forschung, Bildung und Innovation
5. Europäischer Handlungsbedarf, Internationaler Wasserstoffmarkt und außenwirtschaftliche Partnerschaften

1 Erzeugung von Wasserstoff

Die geplanten Maßnahmen zur Förderung der Erzeugung von Wasserstoff zielen darauf ab, die Erzeugungskosten von Wasserstoff in Deutschland zu reduzieren. Konkret sollen die Rahmenbedingungen für den effizienten Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien verbessert und die staatlich induzierten Preisbestandteile reduziert werden, sodass grüner Wasserstoff zu geringeren Kosten erzeugt werden kann. Eine besondere Bedeutung hat dabei die Offshore-Produktion von erneuerbarem Strom zur Erzeugung von Wasserstoff. Ferner wird argumentiert, dass die Einführung der CO₂-Bepreisung für fossile Kraft- und Brennstoffe in den Bereichen Verkehr und Wärme einen wichtigen Anreiz zur Umstellung auf erneuerbare Energie bietet. In der Industrie wird unter anderem die Umstellung auf Wasserstoff durch die Förderung von Elektrolyse unterstützt.



Schlussfolgerungen für die Marktausweitung: Die geplanten Maßnahmen zur Förderung der Erzeugung von grünem Wasserstoff kommen allen Anwendungen zugute und sind grundsätzlich geeignet, einen schnellen Aufbau der Kapazitäten zu fördern.

2 Anwendungsbereiche

Grundsätzlich konstatiert die NWS, dass für die Weiterentwicklung des Wasserstoffmarktes eine verlässliche Nachfrage von Bedeutung ist. Es wird zudem argumentiert, dass der Markthochlauf von Wasserstoff und seiner synthetischen Folgeprodukte aus ökonomischen Gründen gezielt und schrittweise erfolgen soll, wobei die Nutzung von Wasserstoff als alternativer Kraftstoff in bestimmten Bereichen des Verkehrs oder als Grundstoff für die stoffliche Verwertung und Einsatz als Reduktionsmittel in der Industrie prioritär vorangebracht werden sollen. Dabei werden Bereiche priorisiert, in denen der Einsatz von Wasserstoff nahe an der Wirtschaftlichkeit ist und in denen keine größeren Pfadabhängigkeiten geschaffen werden oder in denen keine alternativen Defossilisierungsoptionen bestehen. Die einzelnen Maßnahmen sind grundsätzlich für alle Anwendungen geeignet. Sofern aber konkrete Bereiche genannt werden, werden im Verkehrsbereich vor allem Flugzeuge und große Fahrzeuge (Lkw, Busse) hervorgehoben.

Schlussfolgerungen für die Marktausweitung: Die geplanten Maßnahmen sind grundsätzlich für alle Anwendungsbereiche offen gestaltet. Bei konkreten Maßnahmen wird aber eine Priorisierung deutlich. Diese kann dazu führen, dass einzelne Anwendungen wie zum Beispiel der Pkw-Verkehr oder der Wärmemarkt keine Fördermittel erhalten, was bei der derzeitigen Kostensituation noch einem Ausschluss dieser Anwendungen von Wasserstofftechnologien und synthetischen Folgeprodukten gleichkommt. So können die unterschiedlichen Förderverfahren für verschiedene Anwendungsbereiche auf Beschränkungen hinauslaufen, die – im Vergleich zu einer allgemeinen und über alle Anwendungen gleichen Förderung – zu einer weniger verlässlichen Nachfrageentwicklung und zu einem langsameren Kapazitätsaufbau führen. Ökonomische Gründe für dieses Vorgehen sind nach unserer Einschätzung nicht ersichtlich. Vielmehr haben die Simulationen im vorherigen Kapitel gezeigt, dass eine nur punktuelle Förderung nur für bestimmte Anwendungen sowohl einem schnellen Markthochlauf als auch einer schnellen Substitution fossiler Energieträger entgegensteht. Ferner kann eine fehlende Offenheit in Bezug auf die Förderung der Anwendungsbereiche dazu führen, dass die ausgeschlossenen Bereiche technologisch zurückfallen, weil sich auf absehbare Zeit einzig privat finanzierte Investitionen kaum amortisieren dürften.

3 Infrastruktur und Versorgung

Die Maßnahmen im Bereich Infrastruktur/Versorgung zielen darauf ab, eine sichere und verlässliche, bedarfsgerechte und insgesamt effiziente Versorgung mit Wasserstoff herzustellen. Im Rah-



men dieser Maßnahmen wird auch ein Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes angestrebt. Dabei werden sowohl der Straßenverkehr als auch das Schienennetz und die Wasserstraßen adressiert, wobei sowohl individuelle Nutzerinnen und Nutzer als auch Betreiber von Flotten mit einer großen Anzahl von Fahrzeugen mit Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellenantrieb zu den Zielgruppen gehören.

Schlussfolgerungen für die Marktausweitung: Die geplanten Maßnahmen zur Förderung der Infrastruktur/Versorgung kommen allen Anwendungen zugute und sind grundsätzlich geeignet, einen schnellen Aufbau der Kapazitäten zu fördern.

4 Forschung, Bildung und Innovation

Mit den Maßnahmen der Forschungs- und Innovationsförderung soll entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff die Basis für künftige Markterfolge gelegt werden. Konkret genannt werden sowohl die Förderung von Demonstrationsprojekten als auch „Reallabore der Energiewende“, um marktnahe PtX-Technologien im industriellen Maßstab umzusetzen. Durch die Bündelung von zielgerichteten Fördermaßnahmen sollen Forschung und Innovation als strategisches Element der Energie- und Industriepolitik gestärkt werden.

Schlussfolgerungen für die Marktausweitung: Die geplanten Maßnahmen zur Förderung von Forschung, Bildung und Innovation kommen allen Anwendungen zugute und sind grundsätzlich geeignet, einen schnellen Aufbau der Kapazitäten zu fördern. Es ist dabei festzuhalten, dass ein schneller Kapazitätsaufbau und die breite Förderung von Wasserstoff in allen Anwendungsbereichen dem industriepolitischen Ziel der Stärkung der Wasserstoffwirtschaft förderlich ist.

5 Europäischer Handlungsbedarf, internationaler Wasserstoffmarkt und außenwirtschaftliche Partnerschaften

Damit sich ein Wasserstoffmarkt entwickeln kann, der zur Energiewende und Defossilisierung beiträgt und die deutschen und europäischen Exportchancen stärkt, müssen verlässliche Nachhaltigkeitsstandards sowohl für eine anspruchsvolle Qualitätsinfrastruktur, (Herkunfts-)Nachweise für Strom aus erneuerbaren Energien als auch für grünen Wasserstoff und seine Folgeprodukte geschaffen werden. Dies spricht für internationale Kooperationen und Standards bei der Anwendung von Wasserstoff. Noch bedeutsamer sind internationale Kooperationen bei der Erzeugung von Wasserstoff, da so die Produktionskosten schnell stark gesenkt werden können, was einem schnellen Kapazitätsaufbau entgegenkommt.

Schlussfolgerungen für die Marktausweitung: Die geplanten Maßnahmen zur Internationalisierung kommen allen Anwendungen zugute und sind grundsätzlich geeignet, einen schnellen Aufbau der Kapazitäten zu fördern.



Gesamtbewertung der geplanten Maßnahmen

Die geplanten Maßnahmen sind grundsätzlich für alle Anwendungsbereiche offen gestaltet. Viele Ziele und Maßnahmen lassen sich sehr gut mit der Strategie eines schnellen Kapazitätsaufbaus vereinbaren. Dies steht jedoch in einem gewissen Widerspruch zu den konkret genannten Priorisierungen einzelner Anwendungen in den Verbrauchssektoren und möglichen unterschiedlichen Förderverfahren für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Einschränkend ist ferner zu beachten, dass einige der sogenannten Maßnahmen eher Zielsetzungen oder Absichtsbekundungen darstellen, die in einem nächsten Schritt mithilfe von Instrumenten oder Programmen konkretisiert werden sollten.

Grundsätzlich sollte sowohl bei den geplanten als auch bei zu konkretisierenden Maßnahmen sichergestellt werden, dass Produktion und Einsatz von Wasserstoff anwendungsoffen gefördert werden. Priorisierungen stünden dabei dem angestrebten schnellen Markthochlauf entgegen.

6. Fazit

Die Analyse des Kapazitätsaufbaus in der Windenergie zeigt, dass hohe und langfristig garantierte Preise große Investitionsanreize generieren. Dabei sind sowohl der Preis als auch die Abnahmegarantie von Bedeutung. Die Entwicklungen im Bereich der Windenergie zeigen auch, dass es anfänglich bei geringen Erzeugungskapazitäten hohe Kosten der Stromerzeugung mit Wind gab. Mit dem Ausbau der Kapazitäten kam es zu Lerneffekten, die dann auch die Kosten der Stromerzeugung senkten.

Eine Analyse aktueller Studien über den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur zeigt, dass Wasserstoff und seine synthetischen Folgeprodukte in Zukunft für zahlreiche Anwendungen die wettbewerbsfähigsten kohlenstoffarmen Lösungen werden können. Wichtig für die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff sind kostengünstige Voraussetzungen für die Nutzung erneuerbaren Stroms zu seiner Herstellung. Außerdem ist auch bei der Wasserstoffinfrastruktur mit erheblichen Lerneffekten zu rechnen, die zukünftig eine Senkung der Produktionskosten erlauben. Um diese Lerneffekte möglichst schnell zu generieren, müssen beim Markthochlauf erhebliche Investitionsanreize gesetzt werden.

Die Mechanismen für den Marktaufbau von grünem Wasserstoff zeigen sich in einem stilisierten Marktmodell. In diesem werden zwei Szenarien simuliert: Im ersten wird grüner Wasserstoff nur für bestimmte Anwendungen in den Markt gebracht. Andere Sektoren werden ganz vom Wasserstoffeinsatz abgeschottet. In der Folge entwickelt sich der Markt für Wasserstoff nur langsam. Im zweiten Szenario werden Investitionen in den Aufbau von Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff gefördert und die nachfrageseitige Regulierung anwendungsoffen gestaltet. Der Preis



für grünen Wasserstoff bildet sich vorwiegend am Markt, wobei es die Entscheidung der Marktteilnehmer ist, ob grüner Wasserstoff eingesetzt wird. In der Folge wird grüner Wasserstoff in vielen Anwendungen eingesetzt und der Markt entwickelt sich schnell.

Im zweiten Szenario kommt es kurzfristig zu Preissteigerungen für grünen Wasserstoff. Die hohen Preise geben aber erhebliche Investitionsanreize. Es kommt schnell zu einem Ausbau der Kapazitäten, zu Produktionssteigerungen, zu Lerneffekten und dann auch zu einem Rückgang der Preise. Im Vergleich zum langsamen Markthochlauf wird Wasserstoff schneller in den Markt gebracht. Dies hat zur Folge, dass insgesamt mehr Wasserstoff genutzt wird und es deshalb auch mehr fossile Energieträger substituiert werden können. In einer Pro-und-Contra-Diskussion zu diesen Szenarien zeigt sich, dass die Argumente für einen schnellen Ausbau eindeutig überwiegen und dass kein Argument dagegen ohne Erwiderung bleiben muss.

In der Nationalen Wasserstoffstrategie vom Juni 2020 stellt die Bundesregierung Maßnahmen dar, mit denen ein Markthochlauf von Wasserstoff erreicht werden soll. Diese sind im Prinzip für alle Anwendungsbereiche offen gestaltet. Viele Ziele und Maßnahmen lassen sich sehr gut mit der Strategie eines schnellen Kapazitätsaufbaus vereinbaren. Dies steht jedoch in einem gewissen Widerspruch zu den konkret genannten Priorisierungen einzelner Anwendungen. Ein Ausschluss bestimmter Anwendungen von einer – für neue Technologien prinzipbedingt zum Hochlauf immer notwendigen Förderung aufgrund des noch höheren Preisniveaus – führt in der Praxis in der Regel zu einem Nichteinsatz dieser Technologie. Für den angestrebten schnellen Markthochlauf mit signifikanten CO₂-Einsparungen ist es daher von herausragender Bedeutung, die Produktion und den Einsatz von Wasserstoff konsequent anwendungsoffen zu fördern. Dazu sollte beispielsweise der Einsatz von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten auch als eine Erfüllungsoption für ordnungsrechtliche Vorgaben in den großen Verbrauchssektoren Wärme und Verkehr anerkannt werden. Richtig ausgestaltet würde dies die preisliche Attraktivität von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten gegenüber fossilen Kraft- und Brennstoffen deutlich erhöhen und damit dem Hochlauf von Wasserstofftechnologien einen enormen Schub verleihen.



Quellenverzeichnis

- Aurora Energy Research (2020): Hydrogen in the Northwest European energy system,
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi] (2020a): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2019, https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland.html.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi] (2020b): Die Nationale Wasserstoffstrategie, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi] (2020c): EEG in Zahlen: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2020, <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/eeg-in-zahlen-pdf.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi] (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen, <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf>.
- Bundesnetzagentur (2020): Statistiken – Windenergieanlagen an Öand-Ausschreibungen, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Hintergrundpapiere/Statistik_Onshore.xlsx.
- Deutscher Bundestag (2020): Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan, Drucksache 10/20364
- Next-Kraftwerke (2020): Wissensdatenbank, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen>.
- Hydrogen Council (2020): Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective, Brüssel, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness-Full-Study-1.pdf>, zuletzt abgerufen am 31.08.2020.
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH (2018): Studie IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme, Berlin, https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf, zuletzt abgerufen am 31.08.2020.
- Perner, J.; Bothe, D.; Lövenich, A.; Fritsch, M.; Schaefer, T. (2018): Synthetische Energieträger – Perspektiven für die deutsche Wirtschaft und den internationalen Handel, Eine Untersuchung der Marktpotentiale, Investitions- und Beschäftigungseffekte, Köln.