

The **Making Mission Possible** Series

Der Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft:

Ausbau von nachhaltigem Wasserstoff in einer elektrifizierten Weltwirtschaft

April 2021

Version 1.1

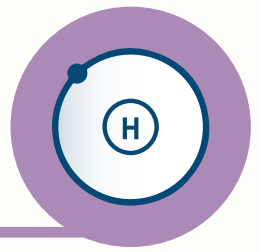


Zusammenfassung



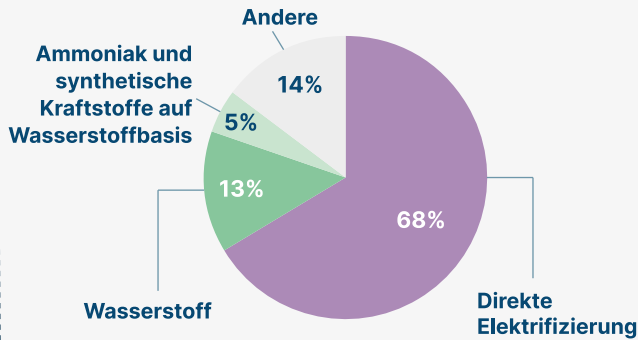
Energy
Transitions
Commission

DER WEG ZUR NACHHALTIGEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT



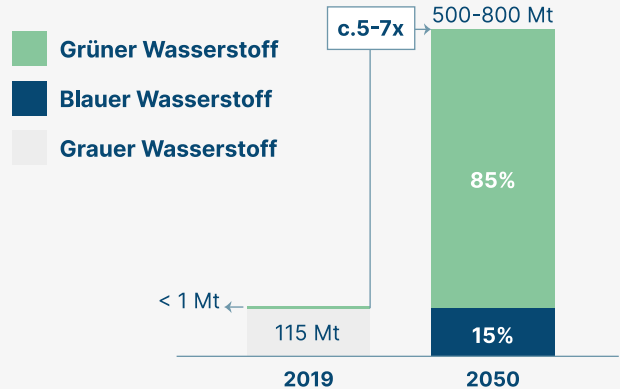
WASSERSTOFF: DER ZWEITE SCHLÜSSEL ZUR DEKARBONISIERUNG

Endenergiebedarf, ETC 2050 Indikatives Szenario



EINE 5 BIS 7-FACHE STEIGERUNG DER WASSERSTOFFPRODUKTION ZUR VOLLSTÄNDIGEN DEKARBONISIERUNG

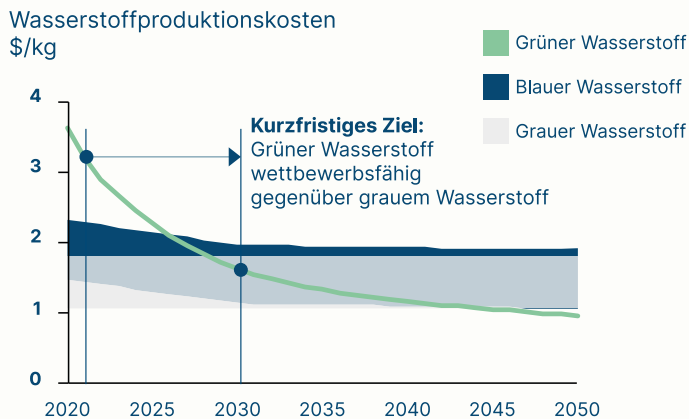
Wasserstoffproduktion 2050
Mt Wasserstoff/Jahr



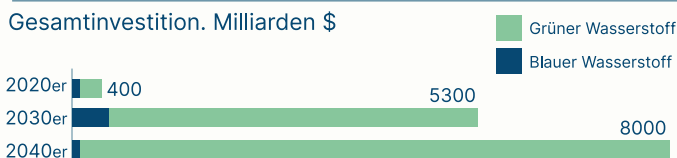
Was ist notwendig?

GLEICHZEITIG

STEIGERUNG DER PRODUKTIONSMENGEN, UM GRÜNEN WASSERSTOFF WETTBEWERBSFÄHIG ZU MACHEN



UM UMFANGREICHE INVESTITIONEN IN DIE WASSERSTOFFVERSORUNG ZU ERMÖGLICHEN



DIE NACHFRAGE NACH SAUBEREM WASSERSTOFF ZÜGIG BESCHLEUNIGEN



WO ES NÖTIG IST, TRANSPORT- UND SPEICHERINFRASTRUKTUR AUSBAUEN



Cluster

Frühe Anwendungsfälle werden sich rund um industrielle Cluster mit gemeinsamer Wasserstoffproduktion, Verteilungs- und -Speicherinfrastruktur entwickeln.

Interregional

Der begrenzte internationale Handel wird hauptsächlich durch interregionale Pipelines und manchmal durch Ammoniakschiffe (bei Ammoniakendnutzung) durchgeführt.





Zusammenfassung

Mit dem Pariser Klimaabkommen hat sich die Welt verpflichtet, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, während sie gleichzeitig anstrebt, sie auf 1,5°C zu begrenzen. Um diese Verpflichtung zu erfüllen, muss die Welt die Netto-CO₂-Emissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts neutralisieren. Die Energy Transitions Commission (ETC) hat in einer Reihe von Berichten beschrieben, wie dies erreicht werden kann¹. Saubere Elektrifizierung muss das Herzstück der globalen Dekarbonisierungsstrategie sein - so viel wie möglich zu elektrifizieren und gleichzeitig die Stromversorgung vollständig zu dekarbonisieren. Der Bericht der ETC über massive grüne Elektrifizierung, der parallel zu diesem Bericht veröffentlicht wurde, beschreibt, wie man diese Herausforderung meistern kann².

Es gibt allerdings einige Sektoren, in denen eine direkte Elektrifizierung unmöglich oder unerschwinglich sein dürfte, sodass Wasserstoff eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung dieser Sektoren spielen wird. In der Stahlproduktion kann es Koks- und Kohle als Energieträger und Reduktionsmittel ersetzen, in Form von Ammoniak könnte es die Schifffahrt dekarbonisieren, und im Stromsektor dürfte es eine große Rolle als Speicher spielen. In diesen und vielen anderen Sektoren könnte der Gesamtverbrauch von Wasserstoff von heute 115 Mio. t pro Jahr bis Mitte des Jahrhunderts auf etwa 500 bis 800 Mio. t ansteigen, wobei Wasserstoff (und dessen Kraftstoff-Derivate) bis dahin etwa 15-20% des gesamten Endenergiebedarfs ausmachen würde, zusätzlich zu den fast 70%, die durch die direkte Stromnutzung abgedeckt werden (Abbildung A).

Der gesamte Wasserstoff muss durch Elektrolyse mit kohlenstofffreiem Strom („grüner Wasserstoff“) oder kohlenstoffarm durch Erdgasreformierung in Kombination mit CCS („blauer Wasserstoff“) erzeugt werden, wenn die Technologie so eingesetzt wird, dass eine nahezu vollständige CO₂-Abscheidung und ein sehr geringer Methanaustritt sichergestellt wird. Blauer Wasserstoff wird in der Anfangsphase der Umstellung oft kostengünstig sein, insbesondere wenn die bestehende „graue Wasserstoff“-Produktion angepasst und mit CCS nachgerüstet werden kann. Langfristig wird grüner Wasserstoff aber höchstwahrscheinlich an den meisten Orten die günstigere Alternative sein, mit einer dramatischen Kostenreduzierung auf unter 2\$/kg in den 2020er Jahren. Diese Produktion von grünem Wasserstoff führt wiederum zu einem stark erhöhten Strombedarf, der die gesamte erforderliche Versorgung mit CO₂-neutralem Strom um bis zu 30.000 TWh erhöht.

Strategien für neutrale CO₂-Emissionen bis 2050 müssen daher die wichtige Rolle sauberen Wasserstoffs und die erforderlichen Maßnahmen zur Versorgung mit sauberem Strom berücksichtigen. Zudem muss ein schneller Start in den 2020er Jahren gewährleistet sein, damit der Übergang bis 2050 realisierbar ist. Dies erfordert politische Unterstützung, da die Verwendung von Wasserstoff in Endanwendungen oft einen „grünen Kostenaufschlag“ im Vergleich zu den heutigen kohlenstoffintensiven Technologien bedeuten wird, selbst wenn die Kosten für die Wasserstoffproduktion drastisch sinken. Die Politik muss breit gefächerte Maßnahmen wie Kohlenstoffbepreisung, gezielte Unterstützung in bestimmten Endverbrauchssektoren und die Entwicklung von geografischen Clustern für die Produktion und Nutzung von sauberem Wasserstoff kombinieren.

¹ Dazu gehören (nicht abschließend): ETC (2020): *Making Mission Possible: Eine CO₂-neutrale Wirtschaft erreichen*; ETC (2017), *Mission Possible: Wie wir CO₂-Neutralität in Sektoren, die schwer zu dekarbonisieren sind, bis Mitte des Jahrhunderts erreichen*

² ETC (2021), *Der Weg zur nachhaltigen Elektrifizierung: 30 Jahre für die Elektrifizierung der Weltwirtschaft*

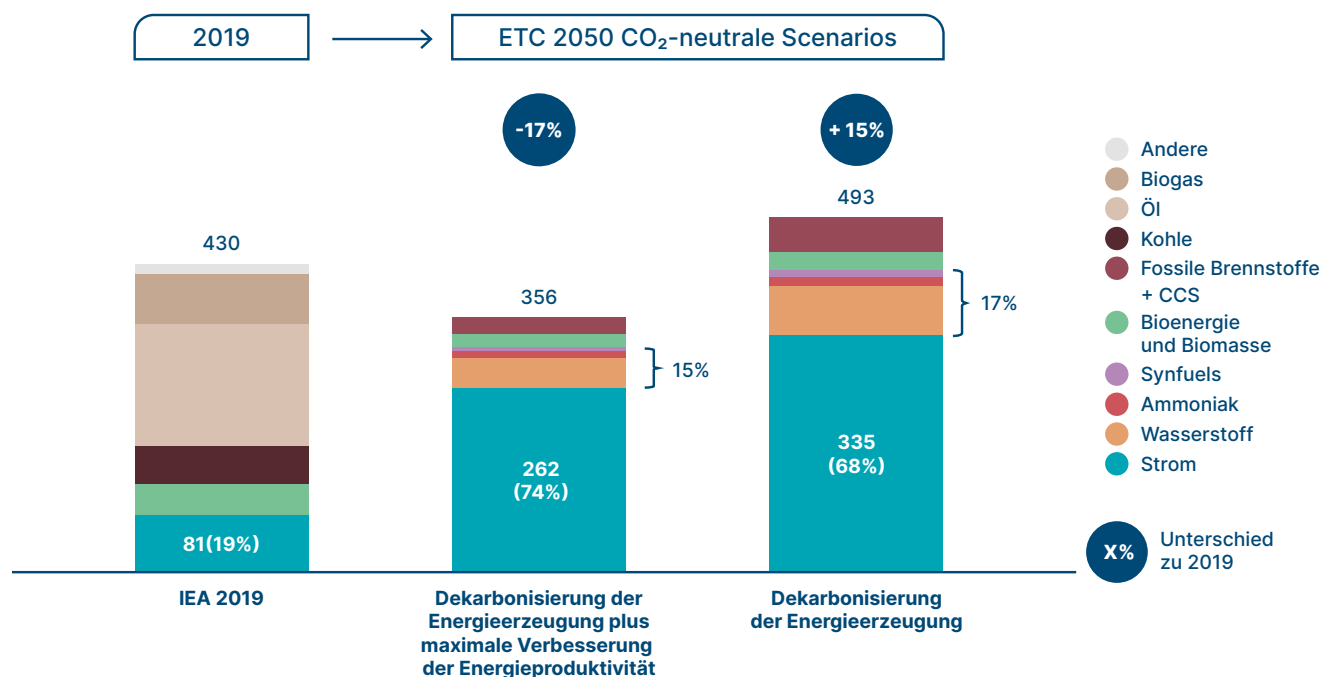
Dieser Bericht legt folgendes dar:

- Die Rolle von sauberem Wasserstoff in einer CO₂-neutralen, stark elektrifizierten Wirtschaft;
- Wie man den Übergang zu einer groß angelegten sauberen Wasserstoffversorgung und -nachfrage vorantreibt;
- Entscheidende industrielle und politische Maßnahmen, die in den 2020er Jahren erforderlich sind.

Der Endenergiebedarf in einer CO₂-neutralen Wirtschaft: Elektrizität wird der dominierende Energievektor werden, ergänzt durch Wasserstoff und daraus abgeleitete Kraftstoffe

Endenergiebedarf
EJ/Jahr

ILLUSTRATIVES SZENARIO



QUELLE: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2020); IEA (2019), *World Energy Outlook*

I. Eine Vision für 2050: Die Rolle des Wasserstoffs in einer CO₂-neutralen, stark elektrifizierten Wirtschaft

Im Jahr 2018 wurden weltweit etwa 115 Mio. t Wasserstoff verbraucht, wovon 70 Mio. t durch eigene Produktion überwiegend aus Erdgas (71%) und Kohle (27%)³ hergestellt wurden. Diese Produktion führte zu etwa 830 Mio. t CO₂-Emissionen, was etwa 2,2 % der weltweiten energiebezogenen Gesamtemissionen entspricht. In den nächsten 30 Jahren wird der Wasserstoffverbrauch dramatisch ansteigen, und die Wasserstoffproduktion muss CO₂-neutral werden, damit sauberer Wasserstoff als Dekarbonisierungslösung sowohl in bestehenden als auch in zahlreichen neuen Anwendungen eingesetzt werden kann.

³ Die Differenz von 45 Mio. t resultiert aus Wasserstoff, der als Nebenprodukt in vielen industriellen Prozessen wie der katalytischen Naphtha-Reformierung, der Chlor-Alkali-Elektrolyse und dem Dampfspalten von Propan anfällt. Quelle: IEA (2019), *The future of hydrogen*

Potenzielles Nachfragewachstum

Mögliche Anwendungen nach Sektor

Die möglichen Anwendungen von Wasserstoff in einer CO₂-neutralen Wirtschaft können in vier hilfreiche Gruppen eingeteilt werden:

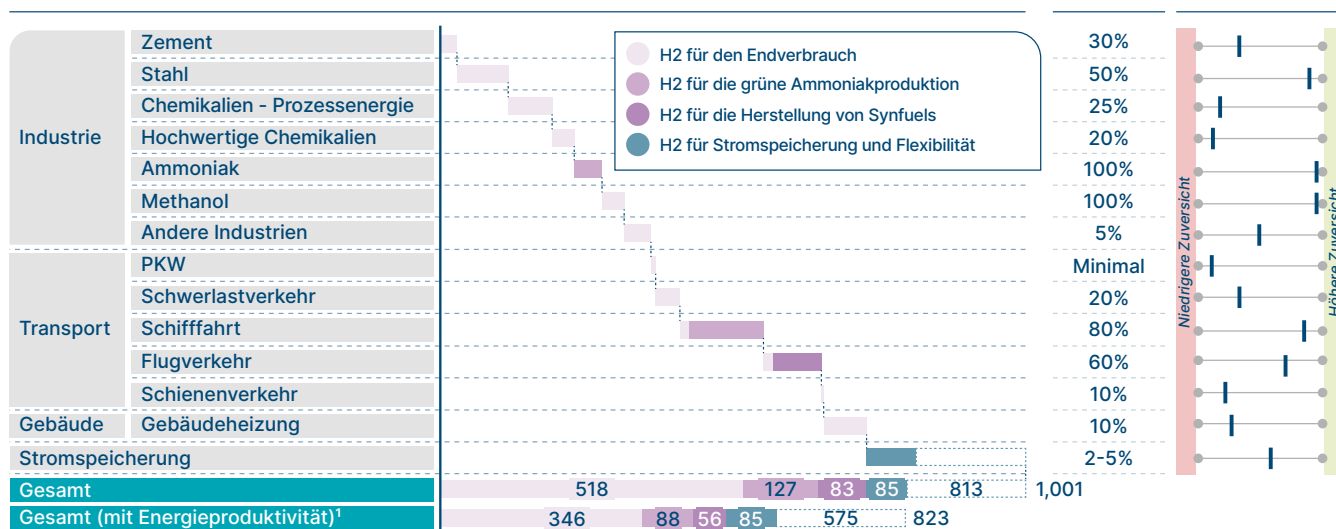
- Bestehende Anwendungen von Wasserstoff, bei denen die Produktion von sauberem Wasserstoff die „graue“ Produktion so schnell wie möglich ersetzen sollte (Rohölraffination, Ammoniak- und Methanolproduktion).
- Sehr wahrscheinliche und große langfristige Anwendungen, bei denen der Wasserstoffverbrauch langsam zunehmen wird, sobald sich die entsprechenden Anwendungstechnologien entwickeln und die Investitionsgüter ersetzt werden. Dazu gehören die Stahlproduktion, die Langstreckenschifffahrt und möglicherweise die Luftfahrt. Sehr wahrscheinlich ist auch eine bedeutende Nutzung von Wasserstoff als saisonaler Speicher in Stromnetzen.
- Potenziell kurzfristige, aber übergangsweise Möglichkeiten, die eine teilweise Emissionsreduzierung bestehender kohlenstoffintensiver Anlagen ermöglichen, die schließlich auslaufen müssen (z. B. die Mitverbrennung von Wasserstoff mit Erdgas bei der Stromerzeugung).
- Einsatzmöglichkeiten, bei denen die relativen Vorteile von Wasserstoff gegenüber anderen Dekarbonisierungsoptionen noch unklar sind. Dazu gehören der Schwerlastverkehr, die Gebäudeheizung, Wasserstoff zur Notstromerzeugung an bestimmten energieintensiven Standorten (z.B. Rechenzentren) und die Kunststoffproduktion.

Ein Beispielszenario

Wenn alle potenziellen Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff eintreten, könnte die Gesamtnachfrage bis 2050 bis zu 1.000 Mio. t erreichen, aber eine vernünftige Abschätzung nach Sektoren ergibt einen Bereich von etwa 500-800 Mio. t (Abbildung B). Dies würde bedeuten, dass Wasserstoff (und dessen Derivate) etwa 15% bis 20% des Gesamtenergiebedarfs ausmachen könnten, zusätzlich zu den etwa 70%, die durch direkte Elektrifizierung zu decken sind. Unsere Schätzungen bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie die kürzlich vom Hydrogen Council und BloombergNEF erstellten Szenarien, allerdings mit einer anderen Mischung sektoraler Anwendungen. Staatliche und nationale Strategien für Wasserstoff sollten daher davon ausgehen, dass dieser eine wichtige Rolle in einer CO₂-neutralen Wirtschaft spielen wird, auch wenn die genaue Zusammensetzung der Dekarbonisierungstechnologien nach Sektoren ungewiss ist.

Sauberer Wasserstoff wird eine wachsende Rolle in der gesamten CO₂-neutralen Wirtschaft spielen

Nachfrage nach sauberem Wasserstoff in einer CO₂-neutralen Wirtschaft (2050, illustratives Szenario)
Millionen Tonnen pro Jahr, ETC „Dekarbonisierung der Energieerzeugung“-Szenario



Zuversicht in die Rolle von H₂ in einer CO₂-neutralen Wirtschaft

Niedriger Mehrere Dekarbonisierungsrouten verfügbar, wobei die Rolle von H₂ je nach Region unterschiedlich sein kann, abhängig von den lokalen Kosten und Verfügbarkeiten

Höher H₂-basierte Wege werden wahrscheinlich eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung spielen, z.B. aufgrund mangelnder alternativer Wege, der wahrscheinlichen Kostenentwicklung und der Maßnahmen der Industrie

HINWEISE: ¹ ETC-Szenario mit maximaler Verbesserung der Energieproduktivität. Hochwertige Chemikalien, die überwiegend zur Herstellung von Kunststoffen verwendet werden, die in Zukunft potenziell über H₂ und CO₂ hergestellt werden könnten (über Methanol und MTO-Verfahren); ca. 80% des Ammoniaks (exkl. Schifffahrt) wird zur Herstellung von Düngemitteln verwendet; Methanol wird als Zwischenprodukt in zahlreichen chemischen Prozessen, u.a. in der Kunststoffherstellung, eingesetzt.

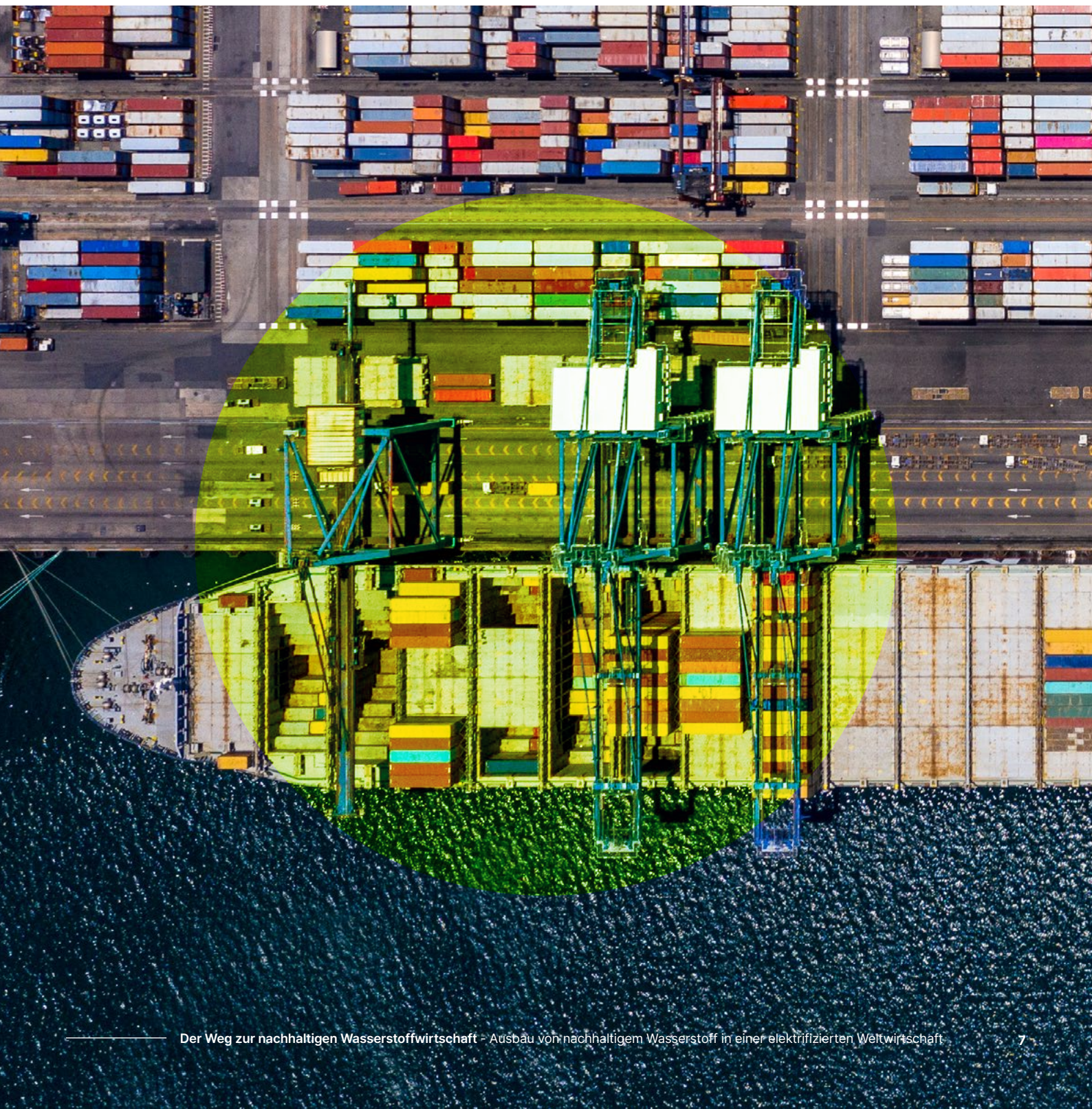
QUELLE: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2021)

Rückläufige Produktionskosten für grünen und blauen Wasserstoff: Auswirkungen auf den Strombedarf

Jeder Wasserstoff, der im Jahr 2050 verwendet wird, muss nahezu CO₂-neutral produziert werden. Dies kann erreicht werden durch⁴:

- Grüne Wasserstoffproduktion durch die Elektrolyse von Wasser. Diese kann komplett CO₂-neutralen Wasserstoff liefern, wenn der gesamte verwendete Strom aus CO₂-neutralen Energiequellen stammt.
- Blaue Wasserstoffproduktion, bei der Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, unter Anwendung von CO₂-Abscheidung und -speicherung (CCS). Dies kann zu CO₂-armen, aber nicht CO₂-neutralem Wasserstoff führen, wobei der Umfang der Restemissionen von der Vollständigkeit des CO₂-Abscheidungsprozesses (mind. 90% erforderlich) und dem Ausmaß der Methanleckage bei der Erdgasförderung, dem Transport und der Nutzung bestimmt wird.

⁴ Wasserstoff kann auch aus Kohle hergestellt werden, indem man mit einem Vergasungsprozess beginnt, oder durch andere Technologien wie zum Beispiel Pyrolyse (manchmal als "türkiser Wasserstoff" bezeichnet). Diese werden im vollständigen Bericht und im Anhang erörtert.

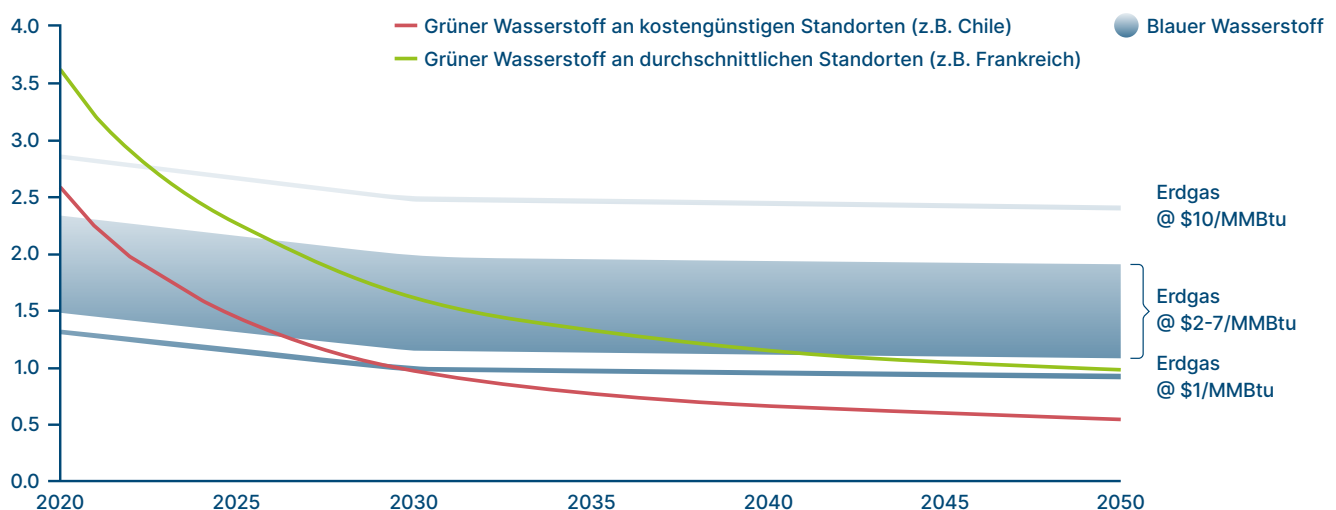


Realisierbare Produktionskosten für blauen Wasserstoff (\$1,3-2,9/kg) liegen derzeit unter denen für grünen Wasserstoff (\$2,6-4,5/kg) und die Produktion von grauem Wasserstoff (Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen ohne CCS) ist noch günstiger (\$0,7-2,2/kg).⁵ Sieht man von den Auswirkungen einer CO₂-Steuer ab wird der „blaue“ Weg aufgrund der zusätzlichen Kosten für CCS immer teurer sein als die Herstellung von grauem Wasserstoff. Im Gegensatz dazu hängen die Kosten für grünen Wasserstoff von zwei Faktoren ab – den Kosten für CO₂-neutralen Strom und den Kapitalkosten für Elektrolyseure – die beide wahrscheinlich schnell fallen werden.⁶ Als Ergebnis werden die Kosten für grünen Wasserstoff wahrscheinlich an einigen Standorten vor 2030 und an den meisten bis 2050 unter die Kosten für blauen Wasserstoff fallen (Abbildung C).

Es ist daher wahrscheinlich, dass der „grüne“ Produktionsweg langfristig der Hauptproduktionsweg sein wird, wenn auch mit einer bedeutenden Rolle für „blau“ in der Übergangsphase und an bestimmten Standorten, wo die Gaskosten sehr niedrig sind. Unser Basisszenario geht davon aus, dass bis zum Jahr 2050 85% der jährlichen Produktion von 500-800 Mio. t über den „grünen“ Weg produziert werden könnten. Dies würde eine Stromeinspeisung von etwa 30.000 TWh zusätzlich⁷ zu den 90.000 TWh erfordern, die potenziell für die direkte Elektrifizierung benötigt werden.

Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse wird wahrscheinlich langfristig der günstigere, nachhaltige Produktionsweg werden; an günstigen Standorten könnte er in den 2020er mit blauem konkurrenzfähig sein

Kosten der H₂-Produktion aus verschiedenen Produktionswegen (ohne Transport- und Lagerkosten)
\$/kg H₂



HINWEISE: Produktion von blauem Wasserstoff: i) Prognose basiert auf SMR+CCS-Kosten (90% Abscheidungsrate) im Jahr 2020, Übergang zur günstigeren ATR+CCS-Technologie in den 2020er Jahren; Produktion von grünem Wasserstoff: i) günstiges Szenario geht von den durchschnittlichen LCOE von Photovoltaik und Windkraft der niedrigsten 33% Standorte aus (LCOE fällt von \$22/MWh in 2020 auf \$10/MWh in 2050) und das durchschnittliche Szenario geht von den mittleren LCOE der niedrigsten 75% Standorte aus der BloombergNEF-Prognosen aus (LCOE fällt von \$39/MWh in 2020 auf \$17/MWh in 2050), ii) zusätzliche 20% (günstig) und 10% (durchschnittlich) Erniedrigung der LCOE aufgrund der direkten Verbindung dedizierter erneuerbarer Energien mit dem Elektrolyseur enthalten, iii) 18% Lernrate für das günstige & 13% für das durchschnittliche Szenario. Auslastungsfaktor des Elektrolyseurs: 45%. Vergleich zu anderen Prognosen: BloombergNEF kostengünstigster (\$0.55/kg) und durchschnittlicher (\$0.86/kg) und Hydrogen Council kostengünstiger (ca. \$0.85/kg) und durchschnittlicher (ca. \$1.45/kg) Preis in 2050.

QUELLE: BloombergNEF (2021), Erdgaspreisdatenbank (online, abgerufen 01/2021), BloombergNEF (2020), 2H 2020 LCOE Data Viewer

Abbildung C

Der grüne Kostenaufschlag auf Zwischen- und Endverbraucherebene

Die Produktion von CO₂-neutralem Wasserstoff wird die Wirtschaft langfristig nicht mit hohen Kosten belasten. In manchen Fällen wird die Verwendung von Wasserstoff jedoch im Vergleich zur Verwendung einer auf fossilen Brennstoffen basierenden Technologie mit höheren Kosten verbunden sein. Dies liegt an der verbleibenden Kostendifferenz zwischen Wasserstoff und fossilen Brennstoffen (ohne CO₂-Preis) und an den Investitionsausgaben, durch die Umstellung auf wasserstoffbasierte Technologien. Es wird also einen „grünen Kostenaufschlag“ geben, wenn Wasserstoff zur Dekarbonisierung eingesetzt wird.

Mit Ausnahme im Flugverkehr wird der „grüne Kostenaufschlag“ (d.h. wie viel mehr die Verbraucher für die Produkte und Dienstleistungen, die sie direkt kaufen, bezahlen müssen) jedoch immer noch gering sein, da die Zwischenprodukte oder -dienstleistungen typischerweise nur einen sehr kleinen Teil der gesamten Endproduktkosten ausmachen.

⁵ Niedriger und hoher Fall für grauen/blauen Wasserstoff beziehen sich auf einen Erdgaspreisbereich von \$1-10/MMBtu. Die Kosten für grünen Wasserstoff basieren auf einem Strompreis von \$25-60/MWh und Elektrolyseur CAPEX von \$850/kW. Quellen: BloombergNEF (2019), *Hydrogen – the economics of production from renewables*; Experteninterviews.

⁶ Der Auslastungsfaktor (d.h. wie viele Stunden der Elektrolyseur läuft) bei den gegebenen Stromkosten und der Wirkungsgrad sind weitere wichtige Faktoren.

⁷ Angenommen 45 kWh pro kg, gegenüber den heute üblichen 50-53 kWh pro kg

In diesem Rahmen wird sich die Nachfrage nach CO₂-neutralem Wasserstoff ohne eine starke politische Unterstützung auf Ebene der Zwischenprodukte und die Weitergabe der Kosten an die Endverbraucher nicht entwickeln.

Transport, Speicherung und internationaler Handel

Stark erhöhter Bedarf nach mehr Anwendungen erfordert umfangreiche Systeme für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff. Dies wird zusätzliche Kosten verursachen, kann aber auch Möglichkeiten schaffen, Wasserstoff an kostengünstigen Standorten für die Verwendung an anderer Stelle zu produzieren.

Technische Möglichkeiten und Kosten

Wasserstoff kann in verschiedenen Formen transportiert werden: komprimiert, verflüssigt oder als Ammoniak. Geringe Transportkosten hängen von den erforderlichen Mengen und Entfernungen ab. Bei einigen umfangreichen Anwendungen wird eine erhebliche Speicherkapazität benötigt. Der Bedarf wird am größten sein, wenn Wasserstoff für den saisonalen Versorgungsausgleich innerhalb des Stromnetzes eingesetzt wird. Bei dezentralen Anlagen, z. B. beim Straßentransport, könnten die Kosten für Verteilung und Lagerung ca. 1,3 \$ pro kg betragen, bei Produktionskosten unter 2 \$ pro kg.

Chancen für den internationalen Handel

Der Umfang des internationalen Wasserstoffhandels wird durch drei Faktoren begrenzt: i) die potenzielle Nutzung der Stromfernübertragung als Alternative zum Transport von grünem Wasserstoff; ii) die potenzielle Nutzung von Erdgaspipelines als Alternative zum Transport von blauem Wasserstoff; und iii) die Wahrscheinlichkeit, dass sinkende Kosten für erneuerbaren Strom in den verschiedenen Regionen den Kostenunterschied zwischen den Regionen stärker verringern werden als sinkende Transportkosten.

Infolgedessen können sich langfristige Möglichkeiten für einen profitablen internationalen Handel mit Wasserstoff auf die Bereiche beschränken, in denen günstige Pipelines mit hoher Kapazität wirtschaftlich sind (bis zu 1.000 km, insbesondere dort, wo bestehende Gaspipelines nachgerüstet werden können), oder auf den Transport von Ammoniak für die direkte Endnutzung (wodurch eine kostspielige, energieintensive Rückumwandlung in Wasserstoff vermieden wird). Darüber hinaus kann eine begrenzte Anzahl von Ländern ein Energiedefizit aufweisen (z.B. aufgrund mangelnder Flächen für die Erzeugung erneuerbarer Energien vor Ort), das sie dazu zwingt Energie zu importieren, selbst bei relativ hohen Kosten. Darüber hinaus ist es wahrscheinlich, dass die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft im Laufe der Zeit zu Veränderungen des optimalen Standorts wasserstoffintensiver Industrien, wie z. B. der Stahlindustrie, führen wird.

II. Den Übergang zu einer groß angelegten Versorgung und Nutzung von sauberem Wasserstoff vorantreiben

Es ist klar, dass Wasserstoff eine wichtige Rolle in der zukünftigen CO₂-neutralen Wirtschaft spielen kann und muss. Die Herausforderung besteht darin, sicherzustellen, dass der Übergang schnell genug erfolgt, um zunächst eine kostengünstige Produktion zu ermöglichen, um anschließend den Sektor auf einen Wachstumspfad zu bringen und damit die Ziele für 2050 zu erreichen.

Senkung der Produktionskosten für grünen Wasserstoff

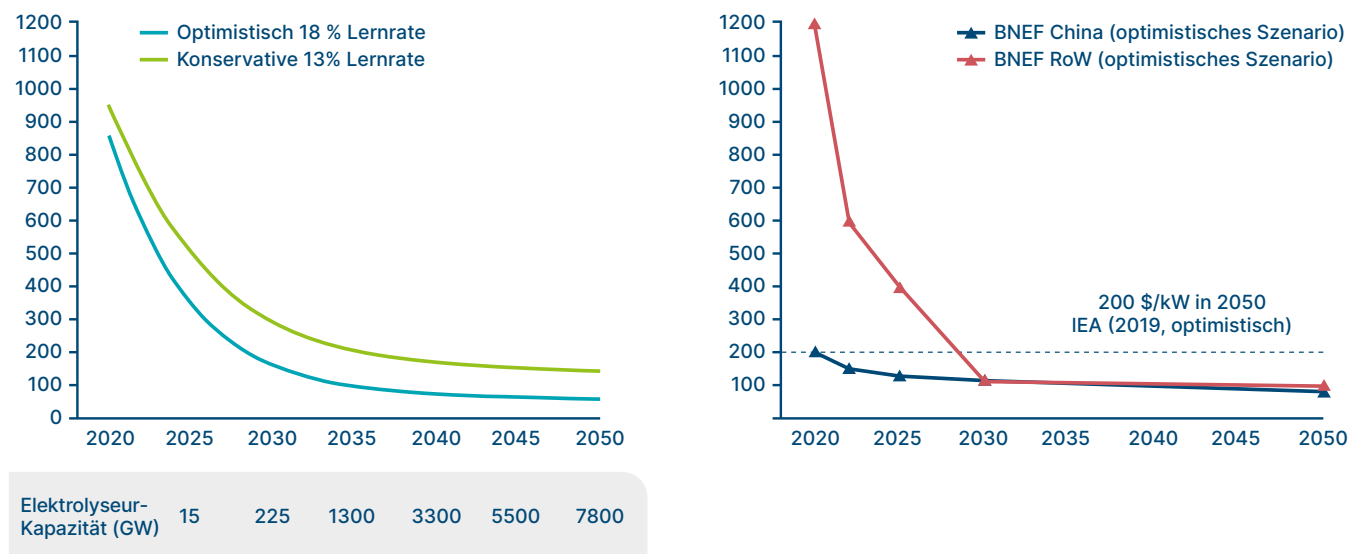
Während grüner Wasserstoff heute noch nicht wettbewerbsfähig ist, würden die bereits angekündigten öffentlichen Maßnahmen und privaten Vorhaben ausreichen, um in den 2020er Jahren starke Kostensenkungen herbeizuführen, die diesen an einigen Standorten wettbewerbsfähig mit blauem und grauem Wasserstoff machen.

Die Kosten der beiden wichtigsten Einflussfaktoren – Elektrolyseur-Ausrüstung (Abbildung D) und erneuerbarer Strom – werden in den 2020er Jahren wahrscheinlich schnell sinken.⁸ Die Kosten für die Produktion von grünem Wasserstoff werden daher in den 2020er Jahren voraussichtlich unter 2\$ pro kg und an einigen Standorten unter 1,5\$ pro kg fallen. Mehrere private Investitionsprojekte zielen bereits auf eine Produktion zu solchen Kosten ab.

⁸ Die Kosten für Elektrolyseure werden voraussichtlich von heute ca. 850 \$/kW im Jahr 2030 auf unter 300 \$/kW fallen. Stromkosten aus dedizierter erneuerbarer Energieerzeugung für die Wasserstoffproduktion fallen voraussichtlich bis 2030 an durchschnittlichen Standorten unter \$25/MWh.

Es wird erwartet, dass die Kosten für die Produktion von grünem H₂ sowohl durch sinkende Kosten für Elektrolyseure als auch durch den anhaltenden Rückgang der Preise für erneuerbaren Strom sinken werden

System Capex-Prognose für große alkalische Elektrolyseprojekte
US\$/kW



HINWEIS: Die CAPEX-Zahlen beinhalten die vollständigen Installationskosten für einen alkalischen Elektrolyseur in großem Maßstab (> 20 MW), einschließlich Stack, Anlagenbau (Leistungselektronik für die Spannungsumwandlung, Wasserstoffreinigung und Komprimierung), Bau und Mobilisierung sowie weitere Kosten (Projektdesign, Management, Gemeinkosten, Eventualverbindlichkeiten und Eigentümerkosten). Es gibt signifikante Unterschiede in den Investitionsprognosen des Elektrolyseur-CAPEX, welche wahrscheinlich auf Unterschiede in der Definition zurückzuführen ist: was in den angegebenen Zahlen enthalten / ausgeschlossen ist, und auf Unterschiede in der Systemgröße (die Kosten sinken erheblich mit der Bestellung und Modulgröße). Hydrogen Council schlägt vor, dass die Investitionskosten des Elektrolyseurs bis 2030 auf Systemebene auf etwa 200 bis 250 USD / kW (IRENA: 360 USD / kW im Transforming Energy Szenario) sinken könnten, dies jedoch nicht Installation und Montage, Bau, und indirekte Kosten beinhaltet.

QUELLE: BloombergNEF (2019), *Hydrogen: The Economics of Production From Renewables*

Nachfragewachstum beschleunigen

In den späten 2020er Jahren wird sauberer Wasserstoff wahrscheinlich an einigen Standorten kostenmäßig mit grauem Wasserstoff konkurrieren können. Allerdings könnten die Endverbrauchsanwendungen von Wasserstoff und damit die Gesamtnachfrage in den 2020er Jahren nicht schnell genug wachsen, um einen glaubwürdigen Kurs auf die erforderlichen 500-800 Mio. t zu ermöglichen. Die Politik sollte daher in den 2020er Jahren ein schnelleres Nachfragewachstum unterstützen, als es erforderlich wäre, um einen Rückgang der Kosten für grünen Wasserstoff sicherzustellen.

Wesentliche Prioritäten sind die rasche Dekarbonisierung der gesamten bestehenden Wasserstoffproduktion sowie die beschleunigte Entwicklung von Technologien und die frühzeitige Etablierung von Wasserstoff in anderen Schlüsselsektoren – insbesondere in solchen mit niedrigerem technologischem Reifegrad, aber großer potenzieller Nachfrage, wie z.B. Stahlproduktion und Ammoniak in der Schifffahrt – um einen raschen Start in den 2030er Jahren zu ermöglichen.

Schnelles Kapazitätswachstum ermöglichen

Strategien für die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft sollten auch den Umfang des erforderlichen Investitionsanstiegs vorwegnehmen und alle Hindernisse identifizieren und beseitigen.

- Für grünen Wasserstoff reichen die natürlichen Ressourcen eindeutig aus, um ein massives Wachstum zu unterstützen, aber die Pläne für die Entwicklung des Energiesystems müssen den enormen Strombedarf für die Produktion von grünem Wasserstoff berücksichtigen⁹.
- Die Entwicklung von blauem Wasserstoff könnte durch lange Projektvorlaufzeiten, die Schwierigkeit, gemeinsame Leitungsnetze zu entwickeln, und den öffentlichen Widerstand gegen CCS gebremst werden, weshalb klare nationale Strategien zur Unterstützung einer angemessenen Entwicklung von blauem Wasserstoff erforderlich sind.

Das tatsächliche Gleichgewicht zwischen grünem und blauem Wasserstoff wird künftige Technologie- und Kostentrends widerspiegeln und je nach spezifischen nationalen und regionalen Gegebenheiten variieren. Abbildung E zeigt anschaulich, wie sich die Nachfrage nach Sektoren und die Bezugsquellen in den nächsten 30 Jahren entwickeln könnte.

⁹ ETC (2021), *Eine CO₂-neutrale Wirtschaft erreichen: 30 Jahre für die Elektrifizierung der Weltwirtschaft*

Wie könnte in einem Massenelektrifizierungsszenario das Scale-up der Wasserstoffwirtschaft aussehen?

Szenario 2: ~85% 2050 Versorgung grün, ~15% blau

Wasserstoffversorgung
Mio. t Wasserstoff / Jahr

Wasserstoffbedarf
Mio. t Wasserstoff / Jahr

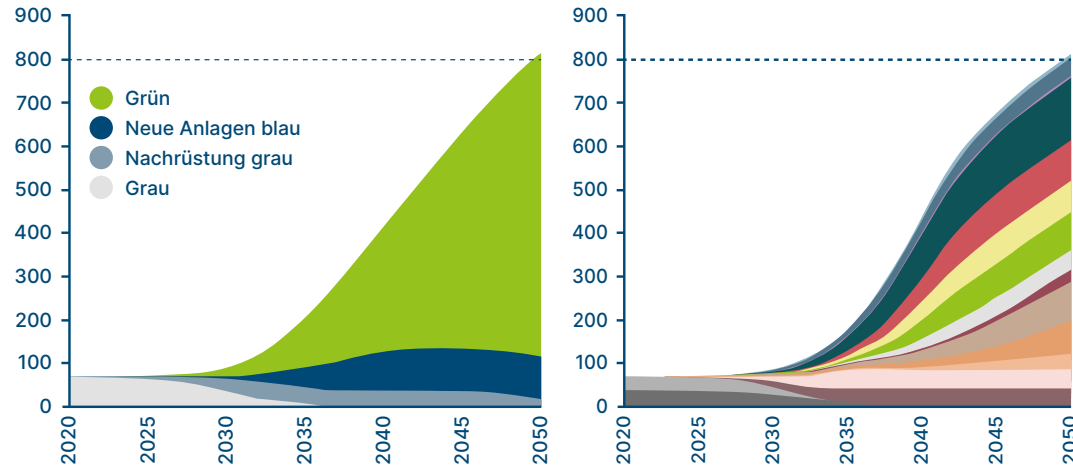
ILLUSTRATIVES SZENARIO

Sauberer Wasserstoff

- PKW
- Schwerlastverkehr
- Schieneverkehr
- Schifffahrt
- Flugverkehr
- Gebäudeheizung
- Strom-Flexibilität
- Andere Industrien
- Zement
- Eisen und Stahl
- Chemikalien
- Prozess-Energie
- Hochwertige Chemikalien
- Ammoniak
- Methanol

Fossiler Wasserstoff

- Ammoniak (grau)
- Veredelung (grau)



QUELLE: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2021)

Abbildung E

Wasserstoff-Cluster entwickeln

Strategien zur gleichzeitigen Entwicklung von günstiger Wasserstoffproduktion und Nachfragesteigerung sind oft am effektivsten, wenn sie sich zunächst auf „Wasserstoff-Cluster“ konzentrieren, in denen sich Wasserstoffproduktion, -speicherung, -transport und -endnutzung gleichzeitig entwickeln können. Cluster können den Wasserstoffproduzenten eine größere Gewissheit über die Wasserstoffnachfrage vor Ort geben, verschiedenen Nutzern eine Kostenteilung ermöglichen und den anfänglichen Bedarf an Investitionen in den Großtransport minimieren.

Details potenzieller Cluster-Entwicklungen werden von spezifischen Geografien und Ausgangspunkten abhängen, jedoch können vier Varianten wichtig sein:

- Bestehende Raffinerie-, Petrochemie- und Düngemittel-Cluster, in denen die Produktion dekarbonisiert werden sollte und neue industrielle Anlagen hinzukommen könnten;
- Häfen, die die zukünftige Dekarbonisierung der Schifffahrt unterstützen müssen und auch Verkehrsknotenpunkte sind, liegen oft in der Nähe von Standorten der Schwerindustrie;
- Nicht küstennahe Transport- und Logistikknotenpunkte, mit gemeinsamer Ansiedlung verschiedener verkehrsbezogener Nutzungen;
- Stahlwerke, die an sich schon groß genug sind, um den Ausgangspunkt für die Clusterentwicklung zu bilden.

Sicherheit, Qualität und niedrige THG-Standards

Die wichtige Rolle von Wasserstoff innerhalb einer CO₂-neutralen Wirtschaft könnte durch internationale Regeln und Standards für Sicherheit und Reinheit erleichtert werden. Klare Standards für die Messung von Treibhausgasemissionen sind ebenfalls unerlässlich.

Gesamtinvestitionsbedarf - dominiert vom Wachstum des Stromsektors

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, die 15-20% des gesamten Endenergiebedarfs ausmacht, wobei der Wasserstoffverbrauch im Vergleich zu den heutigen 115 Mio. t¹⁰ um das fünf- bis siebenfache ansteigt, erfordert sehr umfangreiche Investitionen.

¹⁰ IEA (2019), *The future of hydrogen*

Insgesamt könnten sich die Investitionen bis 2050 auf fast 15 Billionen US-Dollar belaufen – mit einem Spitzenwert in den späten 2030er Jahren von rund 800 Milliarden US-Dollar pro Jahr¹¹. Davon entfallen etwa 12,5 Billionen US-Dollar (85%) auf die erforderliche Erhöhung der Stromerzeugung¹². Diese wären zusätzlich zu den Investitionen, die für eine massive Direktelektrifizierung – wie in unserem Parallelbericht beschrieben – erforderlich sind.¹³ Klare langfristige Strategien für eine massiv ausgebaut saubere Stromversorgung sind daher unerlässlich, um eine CO₂-neutrale Wirtschaft zu erreichen, in der Direktstrom und Wasserstoff zusammen mit den daraus abgeleiteten Brennstoffen über 85% des gesamten Endenergieverbrauchs ausmachen werden.

III. Entscheidende politische und industrielle Maßnahmen in den 2020er Jahren

Ein realistischer Weg zu einer CO₂-neutralen Wirtschaft in der Mitte des Jahrhunderts erfordert einen deutlich beschleunigten Anstieg der Versorgung mit sauberem Wasserstoff und dessen Nutzung bis 2030. Der Fortschritt muss entsprechend zweier kritischer Dimensionen erfolgen:

- Die Produktion von sauberem Wasserstoff sollte bis 2030 50 Mio. t erreichen, wodurch die durchschnittlichen Produktionskosten für sauberen Wasserstoff in allen Regionen deutlich unter 2 \$/kg liegen und der Kapazitätsausbau auf einen Kurs gebracht wird, der die Ziele für 2050 erreicht.
- Der Großteil (60%+) der entsprechenden Nachfrage sollte aus der Dekarbonisierung bestehender Wasserstoffanwendungen, kombiniert mit einem frühzeitigen Ausbau der wichtigsten neuen Wasserstoffanwendungen, stammen.

Folglich müssen öffentliche und private Maßnahmen zur Förderung der Wasserstoffnutzung umfassende politische Hebel mit sektorspezifischen Eingriffen kombinieren. Schlüsselprioritäten sollten folgendes beinhalten:

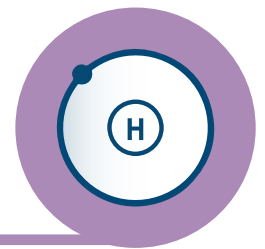
1. **CO₂-Bepreisung**, die idealerweise in allen Ländern Teil politischer Maßnahmen sein sollte, um breite Anreize für die Dekarbonisierung der Wasserstoffversorgung und potenzieller Anwendungsfälle zu schaffen und gleiche Wettbewerbsbedingungen für saubere Wasserstofftechnologien (und andere Dekarbonisierungsoptionen) im Vergleich zu fossilen Brennstofftechnologien zu gewährleisten.
2. **Sektorspezifische Maßnahmen zur Unterstützung des Nachfragewachstums und zur Kompensation des „grünen Kostenaufschlags“** in bestimmten Anlagen durch eine Kombination aus:
 - Vorgaben und Regeln, die einen prozentualen Einsatz von CO₂-armer Energie vorschreiben (z.B. Treibstoff-Vorgaben in der Schifffahrt oder im Flugverkehr) oder Lebenszyklus-Emissionsstandards festlegen;
 - Freiwillige Selbstverpflichtungen des Privatsektors zum Kauf von CO₂-armen Produkten und Dienstleistungen (z. B. Logistikunternehmen, die sich zum CO₂-armen Schwerlastverkehr und Versand verpflichten);
 - Umweltfreundliche öffentliche Beschaffungspolitik (z.B. „grüner Stahl“ im öffentlichen Bau);
 - Finanzielle Anreize für die Einführung von Wasserstoff durch Mechanismen wie Differenzverträge zur Überbrückung des „grünen Kostenaufschlags“ von CO₂-armen Produkten.
3. **Ziele** für die Entwicklung der großtechnischen Elektrolyseurfertigung und -inbetriebnahme und öffentliche Investitionsförderung für die ersten Projekte dieser Art.
4. **Öffentliche Unterstützung und gemeinsames Handeln des privaten Sektors, um Schlüsseltechnologien und -fertigkeiten** in den Bereichen Produktion (z.B. Elektrolyseure mit dynamischerem Anlauf- und Abschaltverhalten), Transport und Speicherung (z.B. neue Formen der Speicherung von Wasserstoff in großen Mengen, wie z.B. in Kavernen) und Nutzung (z.B. wasserstoffbasierte Direktreduktion von Eisen) auf den Markt zu bringen.
5. **Die Entwicklung von industriellen Clustern für sauberen Wasserstoff** durch koordinierte Maßnahmen des privaten Sektors, unterstützt von der nationalen und lokalen Politik.
6. **Internationale Regeln und Normen** für Sicherheit, Reinheit und Zertifizierung von sauberem Wasserstoff.

11 Der durchschnittliche Investitionsbedarf über 30 Jahre hinweg liegt bei ca. 500 Mrd. \$ pro Jahr, somit in der gleichen Größenordnung wie die Upstream-Ausgaben für Öl und Gas in den letzten 10 Jahren (400-600 Mrd. \$ pro Jahr). Quelle: IEA (2020), World Energy Investment 2020.

12 In einigen Fällen kann auch eine zusätzliche Übertragungsinfrastruktur erforderlich sein, z.B. im Fall von dedizierter erneuerbarer Energie aus Offshore-Windkraft.

13 ETC (2021), *Der Weg zur nachhaltigen Elektrifizierung: 30 Jahre für die Elektrifizierung der Weltwirtschaft*

SAUBEREN WASSERSTOFF IN DEN 2020ER JAHREN BESCHLEUNIGEN



ZIELE FÜR 2030:

PRODUKTION



Nachhaltige Wasserstoffproduktion



Durchschnittliche Produktionskosten für sauberen Wasserstoff

NACHFRAGE



Bedarf an sauberem Wasserstoff durch bestehende Wasserstoffnutzung



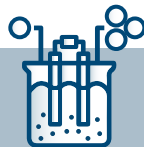
Durch neue Mobilitäts- und Industrieanwendungsfälle

VERWENDUNG VON WASSERSTOFF



TOP 5 MASSNAHMEN IN DER GESAMTEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE

VERSORGUNG



1

Direkte Investitionsunterstützung und Zugang zu kostengünstigem Kapital für saubere Wasserstoff-Industriecluster

2

Zugang zu günstiger Elektrizität, unter anderem durch Kaufverträge von Unternehmen, Verzicht auf Netztarife und gezielter Gestaltung des Strommarktes

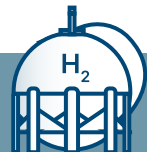
3

Verbot neue grauer Wasserstoffproduktionsanlagen

4

Beschleunigung des Genehmigungsverfahrens für die Erzeugung von erneuerbarer Energie und CCS für die Produktion von sauberem Wasserstoff

TRANSPORT UND SPEICHERUNG



1

Bestehende regulatorische und sicherheitstechnische Rahmenbedingungen für Wasserstoff und Ammoniak anpassen und erweitern

2

Geologische Standortbestimmung potenzieller Wasserstoffspeicherstandorte (z. B. Salzkavernen)

3

Nationale Infrastrukturplanung, um bei Bedarf (inter-)nationale Wasserstoffnetze zu entwerfen

4

Staatliche Unterstützung (z. B. gemischte Finanzmittel) für den Ausbau von Speicher- und Übertragungsnetzen

NACHFRAGE



1

CO₂ Steuern von 100 US-Dollar pro Tonne bis 2030 mit weiterer Erhöhung bis Mitte des Jahrhunderts

2

Sektorspezifische Richtlinien, um frühzeitig für Nachfrage zu sorgen (z. B. Mandate, öffentliches Auftragswesen, freiwillige Umweltprämie)

3

Sektorspezifische finanzielle Unterstützungsmechanismen für Investitionen, um die Kostenprämie zu bewältigen (z. B. Differenzverträge)

4

Ein System zur Zertifizierung von nachhaltigem Wasserstoff und Produkten einrichten

INNOVATION

5

Verbesserungen der Elektrolysetechnologie (z.B. schnelleres Anlaufen bei alkalischen und neue Katalysatoren für PEM)

5

Erschließung von Felskavernen und erschöpften Gasfeldern für die Speicherung von Wasserstoff im großen Maßstab

5

Technologien weiterentwickeln, um Wasserstoff für die Schwerindustrie und für flüssige Transportkraftstoffe (Ammoniak, Synfuels) zu ermöglichen

The **Making Mission Possible** Series

Der Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft:

Ausbau von nachhaltigem Wasserstoff in einer elektrifizierten Weltwirtschaft

April 2021

Version 1.1

Zusammenfassung



Energy
Transitions
Commission