

Wasserstoffwirtschaft: den Einstieg schaffen

Bestehende Herausforderungen und Lösungsansätze

Ein Ergebnis des Themenfeldes 4 – Rahmenbedingungen
des Forschungsprojektes SCI4climate.NRW

SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes Forschungsprojekt zur Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie im Jahr 2050. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und (infra)-strukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Ein transdisziplinärer Prozess mit den Partnerinnen und Partnern aus der Industrie und Wissenschaft erarbeitet gemeinsam mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie.



Bibliographische Angaben

Herausgeber: SCI4climate.NRW
Veröffentlicht: 7. Juli 2021
Kontakt: Malte Küper (Kueper@iwkoeln.de), Roland Kube (Kube@iwkoeln.de)
Autorenschaft: Thomas Adisorn**, Andreas Fischer*, Dagmar Kiyar**, Roland Kube*, Malte Küper*, Anna Leipprand**, Thilo Schaefer*, Lena Tholen**
* *Institut der deutschen Wirtschaft* ** *Wuppertal Institut*
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2020: *Wasserstoffwirtschaft: den Einstieg schaffen, Bestehende Herausforderungen und Lösungsansätze, Gelsenkirchen*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
Zusammenfassung.....	4
1 Welche Rolle spielt emissionsfreier Wasserstoff zukünftig?	5
2 Herausforderungen des Einstiegs in eine Wasserstoffwirtschaft	6
2.1 Wasserstoffbedarf.....	7
2.2 Kostendegression	8
2.3 Infrastruktur	9
2.4 Markteinführung CO ₂ -neutraler Technologien	10
3 Den Einstieg bewältigen: Lösungsansätze.....	11
3.1 Internationale Kooperationen zur Produktion und Import von grünem Wasserstoff.....	12
3.2 Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote	13
3.3 Befreiung von Strompreisbestandteilen für grünen Wasserstoff.....	14
3.4 Mindestquote für das Inverkehrbringen strombasierter Flugturbinenkraftstoffe	15
3.5 IPCEI: Important Project of Common European Interest.....	16
3.6 Klimaschutzverträge.....	17
3.7 Anpassung EU ETS	18
4 Politikoptionen für weiteren Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft.....	19
Literaturverzeichnis.....	20
Anhang	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abschätzungen zum Wasserstoffbedarf in Deutschland, der EU und weltweit (obere Szenarien).....	5
Abbildung 2: Herausforderungen auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft.....	6
Abbildung 3: Lösungsansätze auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft	11
Abbildung 4: Weitere mögliche Ansätze für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschlossene Maßnahmen.....	11
Tabelle 2: Politikoptionen für weiteren Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft	19

Zusammenfassung

Zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaschutzziele ist der großskalige Einsatz von CO₂-neutralem Wasserstoff unumgänglich. Der angestrebte Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft unterstützt die klimaneutrale Transformation vor allem in Sektoren wie der Industrie und dem Schwerlastverkehr, in denen eine Direktelektrifizierung absehbar nicht zu einer vollständigen Defossilisierung beitragen kann. Derzeit stehen einer skalierten und wirtschaftlichen Nutzung von grünem Wasserstoff jedoch noch zahlreiche Hemmnisse wie hohe Herstellungskosten, fehlende Infrastruktur, Regulierung und notwendiger Nachfrage in Endabnehmersektoren entgegen.

Ziel dieser Studie ist die Analyse der bestehenden Hemmnisse und eine Zusammenfassung vorhandener Fortschritte bei politischen Lösungsansätzen. Letztere werden jeweils auf Basis einer Kriterienmatrix untersucht. Abschließend werden derzeit noch nicht anvisierte Probleme und mögliche weiterreichende politische Maßnahmen vorgestellt.

1 Welche Rolle spielt emissionsfreier Wasserstoff zukünftig?

Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Industrie wird Wasserstoff zukünftig eine entscheidende Rolle einnehmen, denn nicht alle energieintensiven Produkte und Prozesse lassen sich durch erneuerbare Energien und Effizienzmaßnahmen defossilisieren. Verschiedene Studien prognostizierten bereits den erwarteten Wasserstoffbedarf in Deutschland für das Jahr 2030 (Abbildung 1). Der Mittelwert liegt bei knapp 70 TWh, und die Spannweite geht von 2 bis 208 TWh. Die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (2020) rechnet mit 90 bis 110 TWh, wobei 14 TWh durch nationale Erzeugung gedeckt werden sollen. Der spezielle für den Industriesektor geschätzte Bedarf liegt – insofern in Studien ausgewiesen – relativ hoch: im Mittel beträgt der Bedarf etwa 50 TWh. In der Berechnung aus SCI4climate.NRW (2020) werden sogar 33 von 34 TWh im Industriesektor verwendet. Der für die EU geschätzte Bedarf liegt im Bereich um 150 TWh – die globale Nachfrage schätzt die IEA (2020) auf mehr als das 10-fache dessen ein. Eine Übersicht zu Schätzungen des Wasserstoffbedarf auch im Jahr 2050 ist im Anhang in Tabelle A1 enthalten.

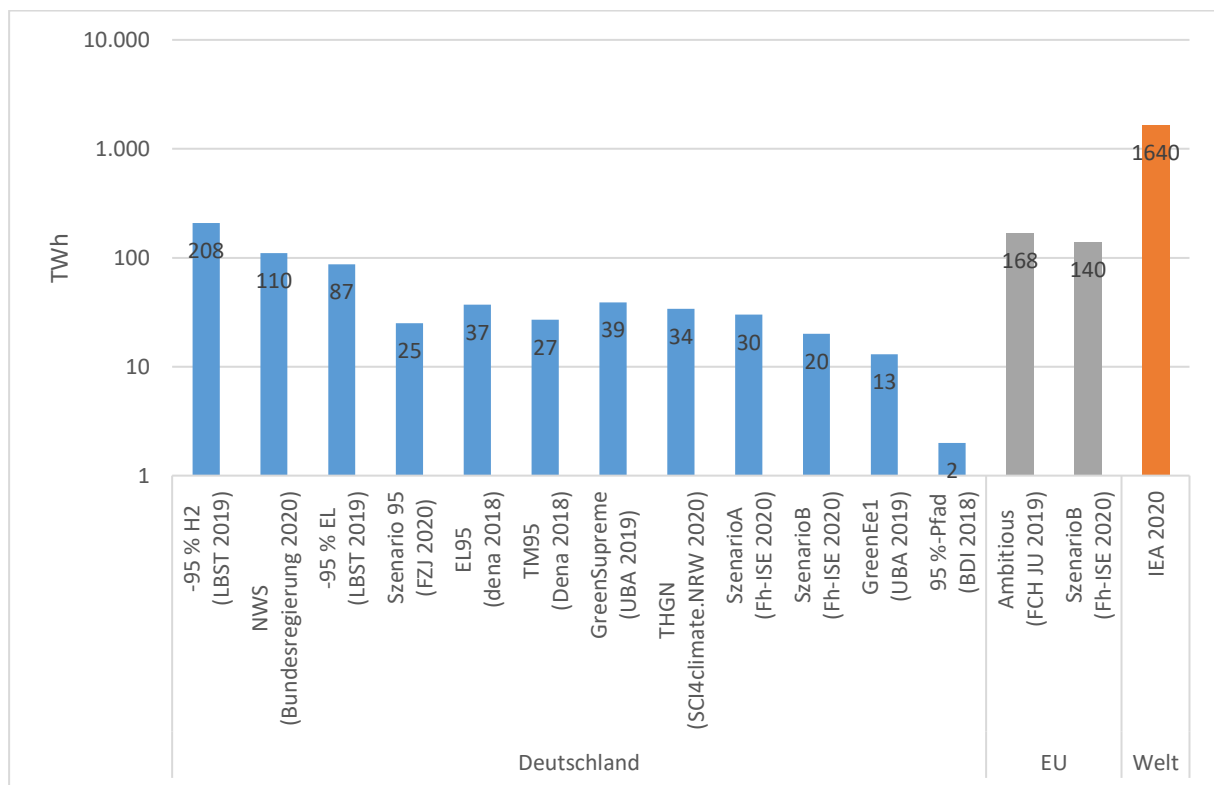


Abbildung 1: Abschätzungen zum Wasserstoffbedarf in Deutschland, der EU und weltweit (obere Szenarien)

Analog zu den Bedarfen bestehen Prognosen zu den benötigten Elektrolysekapazitäten. Damit soll der geschätzte Bedarf zumindest anteilig aus inländischer Produktion gedeckt werden. Die Bundesregierung plant 5 GW bis 2030, um einen Teil der Nachfrage durch inländische Produktion zu bedienen. Die EU Hydrogen Strategy (2020) sieht bis 2030 eine Kapazität von 40 GW vor. Weitere Schätzungen auch für das Jahr 2050 sind im Anhang in Tabelle A2 enthalten.

2 Herausforderungen des Einstiegs in eine Wasserstoffwirtschaft

Eine Analyse des regulatorischen und politischen Status quo in Deutschland und der EU (Leipprand et al., 2021) deutet darauf hin, dass der Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft vor allem 4 zentrale Herausforderungen adressieren muss:

1. Der Aufbau von Kapazitäten für eine ausreichende Wasserstoffversorgung.
2. Eine notwendige Kostendegression zur wirtschaftlichen Anwendung von grünem Wasserstoff, sowohl bei den Kapitalkosten für die Elektrolyse als auch bei den Betriebskosten
3. Der Aufbau von entsprechender Transportinfrastruktur im Inland sowie die Möglichkeit zum umfangreichen Import aus globalen Erzeugungsstandorten (mit hohen Solar- und Windressourcen).
4. Für den Einsatz von grünem Wasserstoff sind außerdem entsprechende Technologieinvestitionen in der Grundstoffindustrie notwendig. Entsprechende Anreize zur Investition sowie eine Technologieförderung sind zu verstärken. Hierzu gehören auch Rahmenbedingungen für die Nachfrage nach (mittels grünem Wasserstoff hergestellten) klimaneutralen Grundstoffen.

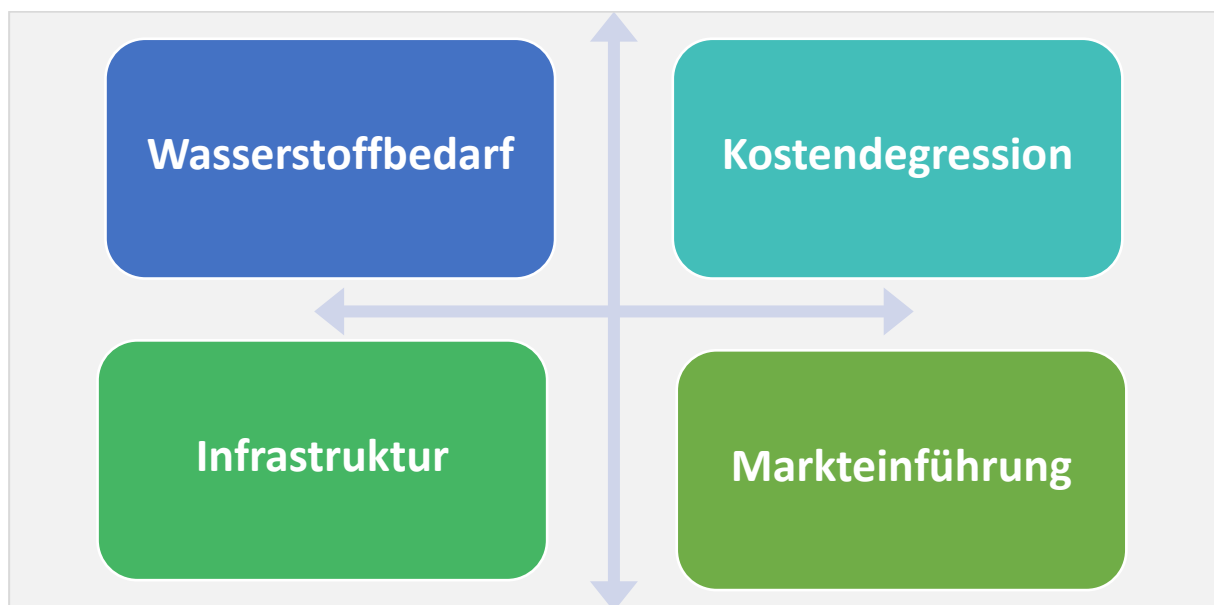


Abbildung 2: Herausforderungen auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft

Im Folgenden wird auf diese vier Herausforderungen näher eingegangen.

2.1 Wasserstoffbedarf

Kurzbeschreibung

Der Aufbau von Wasserstofferzeugungskapazitäten ist eine Grundvoraussetzung, um emissionsintensiven Branchen wie der Stahl- und Chemieindustrie die Umstellung auf wasserstoffbasierte Prozesse zu ermöglichen und ein klares Startsignal für den Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft zu senden. Dabei gilt es nicht nur die Elektrolysekapazitäten in kurzer Zeit hochzufahren, sondern auch die Nachhaltigkeit der Wasserstoffproduktion zu gewährleisten.

Status Quo

Etwa 55 TWh Wasserstoff pro Jahr werden derzeit vor allem für die Anwendung in der Stahl- und Chemieindustrie sowie in Raffinerieprozessen eingesetzt (BMW 2020). Um die Emissionen in diesen Branchen zu senken, wird der gegenwärtig eingesetzte fossile Wasserstoff sukzessive durch klimaneutralen Wasserstoff ersetzt werden müssen. Gleichzeitig wird Wasserstoff auch überall dort Anwendung finden, wo eine Elektrifizierung allein nicht oder nur unter sehr großem Mehraufwand möglich wäre. Wasserstoff aus der Elektrolyse ist dabei nur dann klimafreundlich, wenn er mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird. Beim Betrieb mit dem aktuellen deutschen Strommix, in dem erneuerbare Energien 46 % zum Bruttostromverbrauch (2020) beitragen (UBA, 2020), verursacht die Elektrolyse sogar höhere Emissionen als die konventionelle Wasserstofferzeugung mittels Methandampfreformierung (Bukold, 2020). Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass der zusätzliche Stromverbrauch durch die Elektrolyse zu einem Anstieg fossiler Stromerzeugung führt, wenn der Zubau erneuerbarer Energien nicht an die Mehrbedarfe angepasst wird.

Ziele

Die Schätzungen des zukünftigen Wasserstoffbedarfs in Deutschland reichen von 2 bis 348 TWh für das Jahr 2030, wovon bis zu 140 TWh auf die Industrie entfallen (Tabelle 1)¹. Bis zum Jahr 2050 steigt der nationale Wasserstoffbedarf auf 49 bis 800 TWh an. Die geschätzte Elektrolysekapazität liegt dann bei bis zu 80 GW. Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) geht bis 2030 von einem maximalen Bedarf von 110 TWh Wasserstoff sowie einer inländischen Erzeugungskapazität von 5 GW aus. Mit dieser könnten jedoch gerade einmal 14 TWh inländisch erzeugt werden. Zur Deckung des restlichen Bedarfs setzt die Bundesregierung maßgeblich auf Importe, insbesondere aus den europäischen Mitgliedsstaaten (BMW 2020). Analysen des Forschungszentrum Jülich zeigen jedoch, dass eine weitaus höhere Erzeugungsleistung in Deutschland möglich wäre, unter der Voraussetzung, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien stärker forciert wird (Robinius et al. 2020).

Die europäische Wasserstoffstrategie sieht bis 2030 eine innereuropäische Erzeugung von knapp 330 TWh grünem Wasserstoff, bereitgestellt durch 40 GW Elektrolyseleistung und 5 Mio. t CO₂-armen Wasserstoff. Andere Studien (Tabelle 2) erwarten auf europäischer Ebene einen Gesamtwasserstoffbedarf von bis zu 665 TWh im Jahr 2030 und knapp 2.200 TWh im Jahr 2050.

¹ Um die für 2030 und 2050 maximal benötigte Wasserstoffmenge abzubilden, wird aus jeder referierten Studie das Szenario mit dem höchsten Bedarf verwendet.

2.2 Kostendegression

Kurzbeschreibung

Damit grüner Wasserstoff zukünftig an Stelle von fossilen Energieträgern wie Kohle oder Erdgas eingesetzt werden kann, muss es zu einer deutlichen Reduktion der Herstellungskosten kommen. Die bisher noch erheblichen Mehrkosten verhindern einen wirtschaftlichen Einsatz. Neben Lern- und Skaleneffekten, die sich positiv auf die Investitionskosten auswirken können, können niedrige Strombeschaffungskosten und eine hohe Auslastung der Elektrolyseure zu sinkenden Kosten führen.

Status Quo

In Deutschland kann grüner Wasserstoff aus Elektrolyse zu Preisen von 6€/kg_{H2} erzeugt werden (Energy Brainpool 2018) und ist damit noch um ein Vielfaches teurer als blauer oder grauer Wasserstoff, welche im europäischen Durchschnitt 2,1 €/kg_{H2} bzw. 1,5 €/kg_{H2} kosten (Bukold 2020). Die weltweiten Produktionskosten von grünem Wasserstoff liegen derzeit zwischen 2,5 USD/kg_{H2} (IRENA 2019) und 6,5 USD/kg_{H2} (Gigler und Weeda 2018). Maßgebliche Faktoren für die Produktionskosten sind:

- *Investitionskosten (CAPEX) der Elektrolyseure:* derzeit zwischen 1.000 – 2.300 €/kW² Elektrolyse). Es wird erwartet, dass der PEM-CAPEX innerhalb der nächsten 20 bis 30 Jahre durch Skaleneffekte auf einen Bruchteil der heutigen Ausgaben sinken wird.
- *Strombeschaffungskosten:* Laut Gigler und Weeda (2018) erhöht jede Zunahme des Strompreises um 10 €/MWh die Produktionskosten von grünem Wasserstoff um circa 0,5 €/kg. Strom, der bei der Herstellung von grünem Wasserstoff im industriellen Maßstab eingesetzt wird, soll daher in D bereits fast vollständig von Steuern und Abgaben befreit werden.

Neben langfristigen Kostensenkungen dieser beiden Faktoren kann sich auch eine Steigerung des Elektrolyse-Wirkungsgrads (derzeit 67 – 75 Prozent) sowie eine höhere Auslastung der Elektrolyseure (Volllaststunden) positiv auf die Kostenentwicklung von grünem Wasserstoff auswirken.

Ziele

Studie gehen davon aus, dass sich die Gesamtkosten der Wasserstoffproduktion im Jahr 2030 zwischen 3 bis 5,7 EUR/kg_{H2} (Energy Brainpool, 2018; Gigler und Weeda, 2018; Schneider et al., 2019) und von 1 bis 2,9 EUR/kg_{H2} im Jahr 2050 bewegen (Navigant 2019, Schneider et al. 2019). Zwischen 2030 und 2040 wird erwartet, dass die durchschnittlichen internationalen Produktionskosten von grünem Wasserstoff in allen Fällen, mit denen von blauem Wasserstoff mit CCS konkurrieren können (IRENA, 2019). Die Investitionskosten der PEM-Elektrolyse werden sich (Merten, 2020) zu folge zwischen 650 – 1.500 EUR/kW (2030) und 200 – 900 EUR/kW (2050) bewegen.

² Für die derzeit favorisierte PEM-Elektrolyse

2.3 Infrastruktur

Kurzbeschreibung

Der Aufbau einer entsprechenden Transport- und Verteilnetzinfrastruktur im Inland sowie die Möglichkeit zum hochgradigem Import aus geeigneteren Erzeugungsstandorten (mit höherer Sonnen- und Windauslastung) ist eine wichtige Voraussetzung, um die zukünftigen Wasserstoffverbrauchszentren mit den Produktionsstandorten zu verbinden.

Status Quo

Stand heute werden nur circa 5 Prozent des weltweit erzeugten Wasserstoffs gehandelt. Da der Großteil des benötigten Wasserstoffs stationär am Einsatzort erzeugt wird, gibt es bisher keine nennenswerte Transport- und Handelsinfrastruktur (Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE 2019). Um zukünftig eine bedarfsgerechte Versorgung mit Wasserstoff zu ermöglichen, werden daher sowohl bestehende Gasnetze umgerüstet als auch neue dezidierte Wasserstofftransportinfrastrukturen errichtet werden müssen. Insbesondere in den Anfangsjahren kann ein Markthochlauf von Wasserstoff durch die Beimischung in bestehende Erdgasleitungen angereizt werden. Da viele industrielle Verbraucher jedoch reinen Wasserstoff für ihre Anlagen und Prozesse benötigen, wird es notwendig sein, ein eigenes Wasserstoffnetz aufzubauen, das die Wasserstoffproduktionsstätten mit den Nachfragezentren verbindet.

In Europa und in Deutschland schlagen die Gasnetzbetreiber vor, ein großflächiges Wasserstoffnetz aufzubauen, das in erster Linie auf der Umrüstung bestehender Gasleitungen und teilweise auch auf neuen Leitungen aufbaut (Enagás et al., 2020). Es laufen bereits erste Projekte mit dem Ziel, Erfahrungen zu sammeln und erste infrastrukturelle Knotenpunkte zu bilden (GETH2 Nukleus, n.d.).

Ziele

Ein Großteil des zukünftig in Deutschland benötigten Wasserstoffs wird durch Importe gedeckt werden müssen, laut NWS rund 85 Prozent in 2030 (BMW i 2020). Somit ist es unerlässlich, neben dem inländischen Infrastrukturaufbau auch Importrouten in den Blick zu nehmen. Die Bundesregierung setzt dabei vorrangig auf die Zusammenarbeit mit europäischen Mitgliedsstaaten, insbesondere im Bereich der Nord- und Ostsee, wo ein großes Potenzial für die Offshore-Windenergienutzung besteht, aber auch mit Ländern in Südeuropa. Darüber hinaus werden auch Kooperationen im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit angestrebt (BMW i 2020). Letztere umfassen vor allem Regionen in Afrika (BMZ n.d.).

Eine Studie im Auftrag europäischer Netzbetreiber zum Aufbau einer EU-weiten Wasserstoffinfrastruktur erwartet ab Mitte des laufenden Jahrzehnts den schrittweisen Aufbau eines bis 2030 6.800 km umfassenden europäischen Wasserstoffnetzes („European Hydrogen Backbone“), ausgehend von heutigen Verbrauchsschwerpunkten und den geplanten niederländischen und deutschen Wasserstoffnetzen (Wang et al. 2020). Gemäß Hydrogen Council (2020), schränkt die begrenzte Infrastrukturverfügbarkeit insbesondere in den Anfangsjahren (2020-25) die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff-basierten Technologien gegenüber den noch dominierenden fossilen Alternativen jedoch stark ein.

2.4 Markteinführung CO₂-neutraler Technologien

Kurzbeschreibung

Für die Verwendbarkeit von grünem Wasserstoff sind vor allem entsprechende Technologieinvestitionen in der Grundstoffindustrie notwendig. Entsprechende Anreize zur Investition sowie eine Technologieförderung sind zu verstärken. Hierzu gehören auch Rahmenbedingungen für die Nachfrage nach klimaneutralen Grundstoffen.

Status Quo

In der Chemieindustrie wird 63% des deutschen Wasserstoffbedarfs verbraucht ((Wuppertal Institut et al, 2018). Dieser wird auch weiterhin als Rohstoff benötigt. Hier kann grüner Wasserstoff die Erdgas-Dampfreformierung zur Gewinnung von grauem Wasserstoff ersetzen. Der Wasserstoff wird dabei für eine Vielzahl von Grundchemikalien benötigt, beispielsweise Ammoniak zur Düngemittelproduktion. Zurzeit werden mithilfe von Steamcrackern derartige Grundchemikalien, vornehmlich Kohlenwasserstoffe, erzeugt. Die Dampfspaltung per Steamcracking stellt dabei den energieintensivsten Prozess der Branche dar. Bis 2030 müssen knapp 60% der Steamcracker-Kapazitäten erneuert oder durch alternative Prozesse ersetzt werden (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Raffinerien nutzen bisher 31% des deutschen Wasserstoffbedarfs zur Produktion konventioneller Kraftstoffe (WI, 2018). Dies könnte bei ausreichender Verfügbarkeit kurzfristig von grauem auf grünen Wasserstoff umgestellt werden. Für eine Energiewende im Verkehrssektor werden bereits mittelfristig Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe für Schwerlasttransport und Flugverkehr benötigt, da eine Direktelektrifizierung aufgrund der gravimetrischen Energiedichte der Batteriespeicher nur begrenzt umsetzbar ist.

Die Metallverarbeitung verzeichnet zurzeit nur 6% des Wasserstoffbedarfs (Wuppertal Institut et al, 2018). Allerdings entsteht vor allem in der Stahlbranche dauerhaft eine signifikante Nachfrage, da die bisher genutzte Produktionsroute zur Primärstahlherstellung mithilfe von Koks Kohle dauerhaft auf die Anwendung von Wasserstoff in Direktreduktionsanlagen umgestellt werden kann. Der Umstieg bei der Primärstahlerzeugung bedeutet allerdings einen Ersatz der bisherigen Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen. Über 50% der bisher genutzten Hochofenkapazität erreicht bis 2030 die vorgesehene Lebensdauer, wodurch umfangreiche Neuinvestitionen für einen Umstieg zur Direktreduktion nötig werden (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Nach Berechnungen des Wuppertal Instituts entstehen hier Investitionskosten von knapp 12 Mrd. Euro, um eine Umstellung der Primärstahlroute jener Anlagen zu finanzieren, die bis 2030 das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.

Ziele

Wasserstoff ist aufgrund der umfassenden Anwendungsmöglichkeiten in vielen Sektoren einsetzbar. In Anbetracht der erwartbar begrenzten verfügbaren Mengen ist es allerdings notwendig jene Anwendungen priorisiert mit Wasserstoff zu versorgen, wo alternative Defossilisierungsmaßnahmen aus technischen Gründen nicht oder kaum umsetzbar sind (oder wo limitierte Ausweichmöglichkeit wie beispielsweise die Direktnutzung von grünem Strom zu deutlich höheren betriebswirtschaftlichen als auch volkswirtschaftlichen Kosten führen). Um die Anwendung in den Sektoren sicherstellen zu können, gilt es allerdings auch eine ausreichende Anpassung der

Rahmenbedingungen zu schaffen, sodass in anderen Branchen und Sektoren eine kosteneffiziente Dekarbonisierung ohne den zusätzlichen Einsatz von Wasserstoff möglich ist.

3 Den Einstieg bewältigen: Lösungsansätze

Zum Stand März 2021 wurden auf EU-Ebene und in Deutschland bereits verschiedene Instrumente beschlossen oder sind in der Planungsphase, die Wirkung in den vier Handlungsfeldern entfalten.

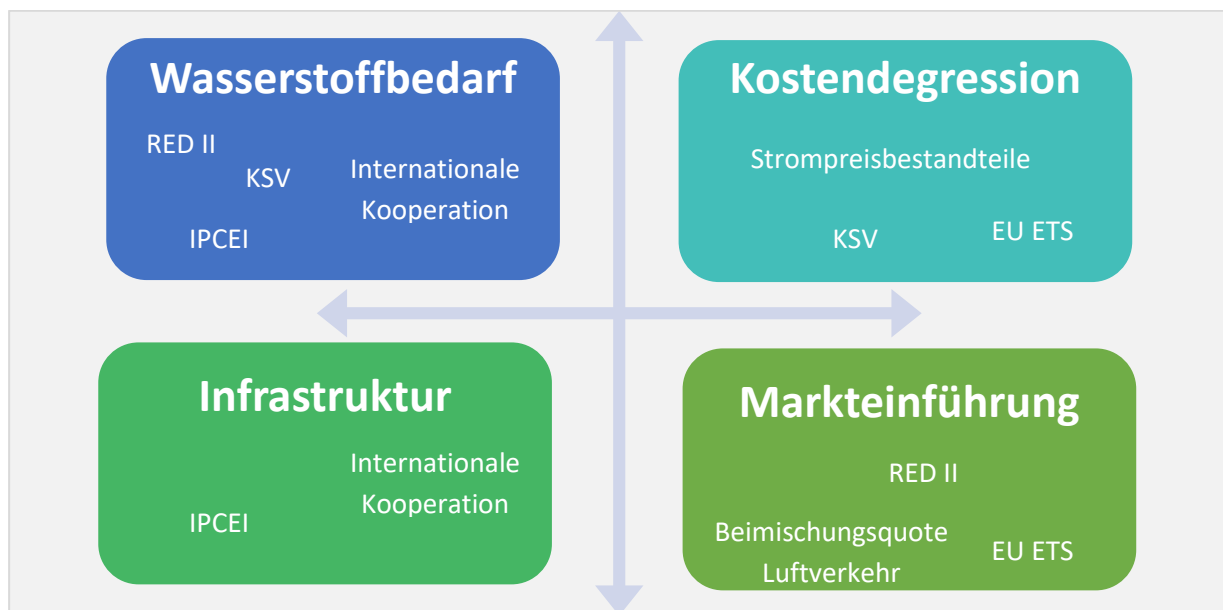













Abbildung 3: Lösungsansätze auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft

Tabelle 1: Beschlossene Maßnahmen

Maßnahme	Ebene	Hemmnis	Stufe
Befreiung von EEG-Umlage, Stromsteuer und Netzentgelten		Kostendegression	Erzeugung
RED II	 	Markteinführung, Wasserstoffbedarf	Erzeugung, Anwendung
IPCEI	 	Infrastruktur, Wasserstoffbedarf	Erzeugung
Internationale H2-Kooperationen	 	Wasserstoffbedarf, Transport	Erzeugung, Transport
Beimischungsquote Turbinenkraftstoff		Markteinführung	Anwendung
Klimaschutzverträge (KSV)	 	Kostendegression, Wasserstoffbedarf	Erzeugung, Anwendung
Anpassung EU ETS		Kostendegression	Erzeugung

In den folgenden Steckbriefen werden die bisherigen Maßnahmen näher vorgestellt und schematisch analysiert.

3.1 Internationale Kooperationen zur Produktion und Import von grünem Wasserstoff

Kurzbeschreibung

Die internationale Kooperation der Bundesregierung ist vielfältig. Sie reicht vom Wissensaufbau (z.B. mit Niger) über den Aufbau von Referenzanlagen mit ersten Abschätzungen zur lokalen Wertschöpfung (z.B. mit Marokko) hin zu Diskussionen zur Umwidmung von Erdgasnetzen in der EU und Abschätzungen internationaler Wertschöpfungseffekte (z.B. mit Australien). Durch die unterschiedlichen Aus-gestaltungsformen internationaler Kooperation, erscheint der Zielkatalog divers. Neben klimapolitischen Zielen möchte Deutschland langfristig die heimische Nachfrage nach Wasserstoff durch Importe zu wettbewerbsfähigen Preisen decken und dabei geeignete Transportlogistik und Wertschöpfungsketten aufbauen.

Obwohl die EU plant, 40 GW bis 2030 in der europäischen Nachbarschaft zu realisieren, ist bisher keine entsprechende Strategie für diese Region(en) ausgearbeitet.

Ansatzpunkte Hemmnisse	Stufe	Stand
<input checked="" type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf	<input checked="" type="checkbox"/> Erzeugung	<input type="checkbox"/> Diskussion
<input type="checkbox"/> Kostendegression	<input type="checkbox"/> Transport	<input checked="" type="checkbox"/> Planung
<input type="checkbox"/> Infrastruktur	<input type="checkbox"/> Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/> Implementiert
<input checked="" type="checkbox"/> Markteinführung		

Hebelwirkung

Laut Wasserstoffstrategie sieht die Bundesregierung bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von 90-110 TWh; wobei lediglich 14 TWh durch nationale Erzeugung eingeplant sind. Die Nationale Wasserstoffstrategie stellt EUR 2 Mrd. für die Förderung internationaler Wasserstoffpartnerschaften in Aussicht. Betont werden mögliche gemeinsame Projekte mit Nordsee-Anrainern und Südeuropa aufgrund des Potenzials für erneuerbare Energien und geteilter Infrastrukturen (Strom, Gas) genauso wie mit Ländern der deutschen Entwicklungszusammenarbeit, die in den internationalen Handel mit Wasserstoff und Folgeprodukten eingebunden werden sollen (inkl. Wasserstoffproduktion und Weiterverarbeitung).

Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030

Konkret können Forschergruppen aus neun bis zwölf Wasserstoffexperten jeweils bis zu fünf Millionen Euro erhalten, wenn sie zudem mit mindestens zwei Partnerländern kooperieren. Insgesamt stehen für die nächsten drei Jahre 45 Millionen Euro bereit. Im Zentrum sollen Partnerschaften mit EU-Ländern, Nordamerika und Afrika sowie Israel, Russland und Australien stehen. Die Projekte sollen sich der gesamten Wertschöpfungskette widmen: von der Erzeugung über die Veredlung und den Transport und die Nutzung

Vorteile	Nachteile / Wechselwirkungen
<ul style="list-style-type: none"> - Aufbau essenzieller Infrastruktur und Produktionskapazitäten mit höherer Volllaststundenzahl - Lernkurveneffekte 	<ul style="list-style-type: none"> - Nachhaltigkeits-Kriterien - Ethische Kriterien - Staatlicher Förderbedarf – unklare Höhe und Dauer

3.2 Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote

Kurzbeschreibung

Die europäische Renewable Energy Directive 2018/2001/EU (REDII) ermöglicht die Anrechnung des Einsatzes von grünem Wasserstoff bei der Produktion von Kraftstoffen auf die Treibhausgasminderungsquote. Artikel 25 verpflichtet die Kraftstofflieferanten, im Jahr 2030 einen Mindestanteil von 14 % an erneuerbaren Energien in ihren Endprodukten zu liefern. Bei der nationalen Umsetzung ist es möglich über diese 14 % hinauszugehen. Damit werden Anreize gesetzt, dass grüner Wasserstoff bei der Produktion von Kraftstoffen zum Einsatz kommt. Mit der Umsetzung wird das Ziel verfolgt, schnellstmöglich und kostengünstig einen Markthochlauf von Wasserstoff zu erreichen.

In Artikel 27 der Richtlinie wird die Berechnungsmethode des erneuerbaren Anteils beim Strombezug aus dem Netz zur Anrechenbarkeit von Wasserstoff zum Ziel (14 % Einsparungen) beschrieben (BDI 2019). In den nächsten Jahren (und spätestens bis Dezember 2021) werden delegierte Rechtsakte zur Berechnungsmethode erlassen.

Ansatzpunkte Hemmnisse	Stufe	Stand
<input checked="" type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf <input type="checkbox"/> Kostendegression <input type="checkbox"/> Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> Markteinführung	<input type="checkbox"/> Erzeugung <input type="checkbox"/> Transport <input checked="" type="checkbox"/> Anwendung	<input type="checkbox"/> Diskussion <input checked="" type="checkbox"/> Planung <input checked="" type="checkbox"/> Implementiert

Hebelwirkung

Laut nationaler Wasserstoff-Strategie sollen mit der Umsetzung der REDII eine Elektrolyseleistung von 2 GW aufgebaut werden, um den grauen Wasserstoff zu ersetzen. Das entspricht bis 2030 einer in Deutschland vorgesehenen Elektrolyseleistung von 40 % (NPM 2020).

Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030

Ende 2020 wurde von der Bundesregierung entschieden, die REDII mit einer Mindestanforderung von 28% an erneuerbaren Energien im Verkehrssektor bis 2030 umzusetzen (Hanke 2020). Darüber hinaus soll der Einsatz von Wasserstoff durch eine Doppelanrechnung zusätzlich stimuliert werden, um eine größere Chancengleichheit gegenüber anderen Kraftstoffen zu schaffen, die bereits einen Vorteil durch Multiplikatoren haben (Crone et al., 2020).

Pro	Contra
<ul style="list-style-type: none"> - Unmittelbar nutzbares Potenzial zur Schaffung eines Absatzmarktes - Nutzung vorhandener Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Fokus auf den Verkehrssektor (und konventionelle Energieträger) - Geringere Effizienz von Brennstoffzellen (gegenüber Elektroantrieben)

3.3 Befreiung von Strompreisbestandteilen für grünen Wasserstoff

Kurzbeschreibung

Die Bundesregierung hat beschlossen, dass für die Erzeugung von (grünem) Wasserstoff nicht mehr die volle EEG-Umlage anfällt. Für den Einsatz von Strom bei der Wasserelektrolyse wird unter bestimmten Voraussetzungen die EEG-Umlage auf 15% begrenzt. Die Herstellung von grünem Wasserstoff soll vollständig befreit werden. Dadurch verbessert sich die Preisrelation zusätzlich gegenüber grauem Wasserstoff beziehungsweise anderen fossilen Energieträgern. Im Stromsteuergesetz ist bereits der Einsatz von Strom für die Elektrolyse ausgenommen.

Ansatzpunkte Hemmnisse

- Wasserstoffbedarf
- Kostendegression
- Infrastruktur
- Markteinführung

Stufe

- Erzeugung
- Transport
- Anwendung

Stand

- Diskussion
- Planung
- Implementiert

Hebelwirkung

Die gesenkte EEG-Umlage vergünstigt den eingesetzten Strom in 2021 um 5,5-6,5 Cent, in 2022 um 5,1-6 Cent je kWh Strom. Die bestehende Ausnahme bei der Stromsteuer bedeutet ebenfalls 2 Cent je kWh Einsparung.

Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030

Mit dem EEG2021 wurden die wichtigen Ausnahmeregelungen bei der EEG-Umlage beschlossen.

Vorteile

- Einfache und unkomplizierte Verbesserung der Kostenparameter beim Stromeinsatz

Nachteile / Wechselwirkungen

- Mehr EEG-Umlage für nicht befreite Prozesse und Akteure

3.4 Mindestquote für das Inverkehrbringen strombasierter Flugturbinenkraftstoffe

Kurzbeschreibung		
<p>Für Flugturbinenkraftstoffe sollen ab 2026 die synthetischen Kraftstoffe (Synfuels) beigemischt werden die mittels Erneuerbarer Energiequellen emissionsfrei generiert wurden (über die grüne Wasserstoffherzeugung und Verbindung mit abgeschiedenem CO₂ [CCU]). Der Anteil der Beimischung liegt für 2026 bei 0,5 Prozent, 2028 bei 1 Prozent und bis 2030 bei 2 Prozent. Mögliche Ansatzpunkt – um Ausweichverhalten gering zu halten - wäre der innerdeutsche Luftverkehr oder sogar der Luftverkehr innerhalb der Mitgliedsstaaten der EU bzw. auch der EFTA. Gerade der Luftverkehr bietet sich für einen Hochlauf von H₂ und Synfuels an, da kaum technologische Alternativen zur Emissionsvermeidung bestehen – zudem zeichnen sich Kunden durch hohe und relativ unelastische Zahlungsbereitschaft aus.</p>		
Ansatzpunkte Hemmnisse	Stufe	Stand
<input type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf <input type="checkbox"/> Kostendegression <input checked="" type="checkbox"/> Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> Markteinführung	<input type="checkbox"/> Erzeugung <input type="checkbox"/> Transport <input checked="" type="checkbox"/> Anwendung	<input type="checkbox"/> Diskussion <input type="checkbox"/> Planung <input checked="" type="checkbox"/> Implementiert
Hebelwirkung		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Aufbau von Power-to-Liquid-Kapazität in einem Sektor mit kaum absehbarer Alternative. 2. Die mögliche Emissions-Reduktion beträgt entsprechend einer Beimischungs-Quote von 2% im Jahr 2030 etwa für: 		
Deutschen Flugverkehr Inland:	2 Mio. t CO ₂	→ 0,04 Mio. t CO ₂
Deutschen Flugverkehr im EU ETS:	9 Mio. t CO ₂	→ 0,18 Mio. t CO ₂
Deutschen Flugverkehr international:	27 Mio. t CO ₂	→ 0,54 Mio. t CO ₂
Innere EU+EFTA Flugverkehr:	68 Mio. t CO ₂	→ 1,36 Mio. t CO ₂
Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030		
<p>Die Bundesregierung hat die Einführung der Quote am 03.02.2021 für den gesamten deutschen Flugverkehr beschlossen. Auf den Bereich Luftverkehr entfallen 214 Mio. EUR zur Erfüllung der Verpflichtung zum Inverkehrbringen strombasierter Flugturbinenkraftstoffe (RED II).</p> <p>Als nächster Schritt ist eine Ausweitung auf eine EU-weite Lösung angedacht. Bei möglichen Skaleneffekten bei der Produktionskapazität ist eine frühere Anhebung der Quote denkbar. Eine Nutzung der Quote auch für den Schiffsverkehr ist in der Diskussion.</p>		
Pro	Contra	
<ul style="list-style-type: none"> • Kosteneffiziente Umsetzung • Innovationsanreiz: hoch • Ausweichoptionen in D oder EU/EFTA nur Bahn/Straße • Verteilungswirkung akzeptabel, da vor allem (Business-) Kundschaft mit hoher Zeitpräferenz / Zahlungsbereitschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselwirkungen mit EU ETS bzw. CORSIA (die allerdings geringe Preisanreize für Synfuels bieten) 	

3.5 IPCEI: Important Project of Common European Interest

Kurzbeschreibung

IPCEI steht für „Important Projects of Common European Interest (IPCEI)“. Es handelt sich um wichtige Vorhaben von gemeinsamem europäischen Interesse, das mittels staatlicher Förderung einen wichtigen Beitrag zu Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie und Wirtschaft leistet.

In diesem Rahmen sollen auch Wasserstofftechnologien und -systeme unterstützt werden. IPCEIs leisten einen wichtigen Impuls als gemeinsame Investitionsanstrengung kooperierender europäischer Unternehmen, flankiert auch durch staatliche Förderung.

im Rahmen der deutschen EU-Ratspräsidentschaft hat Bundeswirtschaftsminister Peter Altmaier gemeinsam mit seinen EU-Kolleginnen und -Kollegen am 17. Dezember 2020 das IPCEI Wasserstoff gestartet.

Vom 14. Januar 2021 bis 19. Februar 2021 konnten Unternehmen in einem Interessenbekundungsverfahren Projektskizzen für Investitionsvorhaben in den genannten Bereichen einreichen.

Ansatzpunkte Hemmnisse	Stufe	Stand
<input checked="" type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf	<input checked="" type="checkbox"/> Erzeugung	<input type="checkbox"/> Diskussion
<input checked="" type="checkbox"/> Kostendegression	<input checked="" type="checkbox"/> Transport	<input checked="" type="checkbox"/> Planung
<input checked="" type="checkbox"/> Infrastruktur	<input checked="" type="checkbox"/> Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/> Implementiert
<input type="checkbox"/> Markteinführung		

Hebelwirkung

Aufbau von H2-Kapazitäten...

Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030

Begutachtung der eingereichten Projekte durch dena, NOW und Projektträger Jülich.

Pro	Contra
<ul style="list-style-type: none"> • Förderung von weniger marktreifen Technologien • Absicherung von Innovationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwaltungsaufwand für Förderung • Auswahl von Projekten nicht marktwirtschaftlich, sondern staatlich

3.6 Klimaschutzverträge

Kurzbeschreibung

Klimaschutzverträge (KSV, englisch Carbon Contracts oder Carbon Contracts for Difference) können es Unternehmen ermöglichen, frühzeitig in Wasserstoff-Technologien zu investieren. Insbesondere können KSV langfristige transformationsbedingte Mehrkosten (OPEX und CAPEX) und Kostenrisiken solcher Technologien über die Lebensdauer absichern. Die KSV-Prämie sollte so gestaltet sein, dass die Mehrkosten der Low-Carbon Breakthrough Technologies (LCBT) im Vergleich zu einer wirtschaftlichen Referenztechnologie kompensiert werden. Dabei wird die Förderwirkung anderer Instrumente berücksichtigt.

Ansatzpunkte Hemmnisse	Stufe	Stand
<input checked="" type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf <input checked="" type="checkbox"/> Kostendegression <input checked="" type="checkbox"/> Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> Markteinführung	<input type="checkbox"/> Erzeugung <input type="checkbox"/> Transport <input checked="" type="checkbox"/> Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/> Diskussion <input checked="" type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/> Implementiert

Hebelwirkung

KSV können schnell eingeführt werden, sehr zielgenau wirken und dadurch die Transformation beschleunigen. Sie werden so lange gebraucht, bis Produktkostenparität zwischen neuer und alter Technologie bzw. ein internationales Level Playing Field für klimaneutrale Industrieproduktion besteht. Die Erprobung und Entwicklung von KSV sollten mit Priorität verfolgt werden.

Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030

Aufstellung möglicher Förderrahmen in Deutschland und der EU.

Pro	Contra
<ul style="list-style-type: none"> • Förderung von weniger marktreifen Technologien, Reduktion des (Finanzierungs-)Risikos • Absicherung von Innovationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwaltungsaufwand für Förderung • Auswahl von Projekten nicht marktwirtschaftlich, sondern staatlich

3.7 Anpassung EU ETS

Kurzbeschreibung		
<p>Im Zuge des geplanten neuen 2030-Klimaziels der EU (mindestens 55 anstatt 40 Prozent Minderung vs. 1990) muss auch das Cap im EU ETS verschärft werden. Der Preis für ein Zertifikate beträgt Stand April 2021 über 45 Euro. Das Impact Assessment der EU (EC, 2020) schätzt bis 2030 einen Preisanstieg auf etwa 60 Euro je Tonne CO₂ –weitere Schätzungen gehen von deutlich über 100 Euro aus (Pietzker et al., 2021). Somit wird die Kostenlücke zwischen grünem (bzw. blauem / türkisen) zu grauem Wasserstoff deutlich kleiner.</p>		
Ansatzpunkte Hemmnisse	Sektoren	Stand
<input type="checkbox"/> Wasserstoffbedarf <input checked="" type="checkbox"/> Kostendegression <input type="checkbox"/> Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> Markteinführung	<input checked="" type="checkbox"/> Erzeugung <input type="checkbox"/> Transport <input checked="" type="checkbox"/> Anwendung	<input type="checkbox"/> Diskussion <input checked="" type="checkbox"/> Planung <input type="checkbox"/> Implementiert
Hebelwirkung		
<p>Bei derzeitigem Zertifikatspreis von knapp 50 Euro je t CO₂ sinkt die Kostendifferenz von grünem Wasserstoff gegenüber fossilen Brennstoffen bzw. grauem Wasserstoff.</p>		
Stand und mögliche Weiterentwicklung bis 2030		
<p>Die Verkündung neuer Regelungen ist für Juni 2021 geplant. Entsprechende Effekte werden im Laufe der 4. Handelsperiode (2021-2030) erwartet. Bereits jetzt (auf über 40 Euro je t) gestiegene Zertifikatspreise deuten auf antizipatorisches Verhalten von Marktteilnehmer im EU ETS hin.</p>		
Vorteile	Nachteile / Wechselwirkungen	
<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Verbesserung der Kostenrelation von emissionsarmem Wasserstoff gegenüber fossilen Brennstoffen bzw. grauem Wasserstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Eine möglicherweise höhere Kostenbelastung im EU ETS kann die Finanzkraft der investierenden Unternehmen schmälern 	

4 Politikoptionen für weiteren Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft

Die in Kapitel 2 vorgestellten Instrumente sind bereits in der Planungs- und Umsetzungsphase. Darüber hinaus benötigt der Hochlauf einer stärkeren Wasserstoffwirtschaft jedoch absehbar weitere politische Regelungen und Unterstützung. Derzeit diskutierte Maßnahmen sind knapp im bekannten Schema in Abbildung 3 dargestellt. Die genauere Ausgestaltungsmöglichkeiten zeigt Tabelle 2.

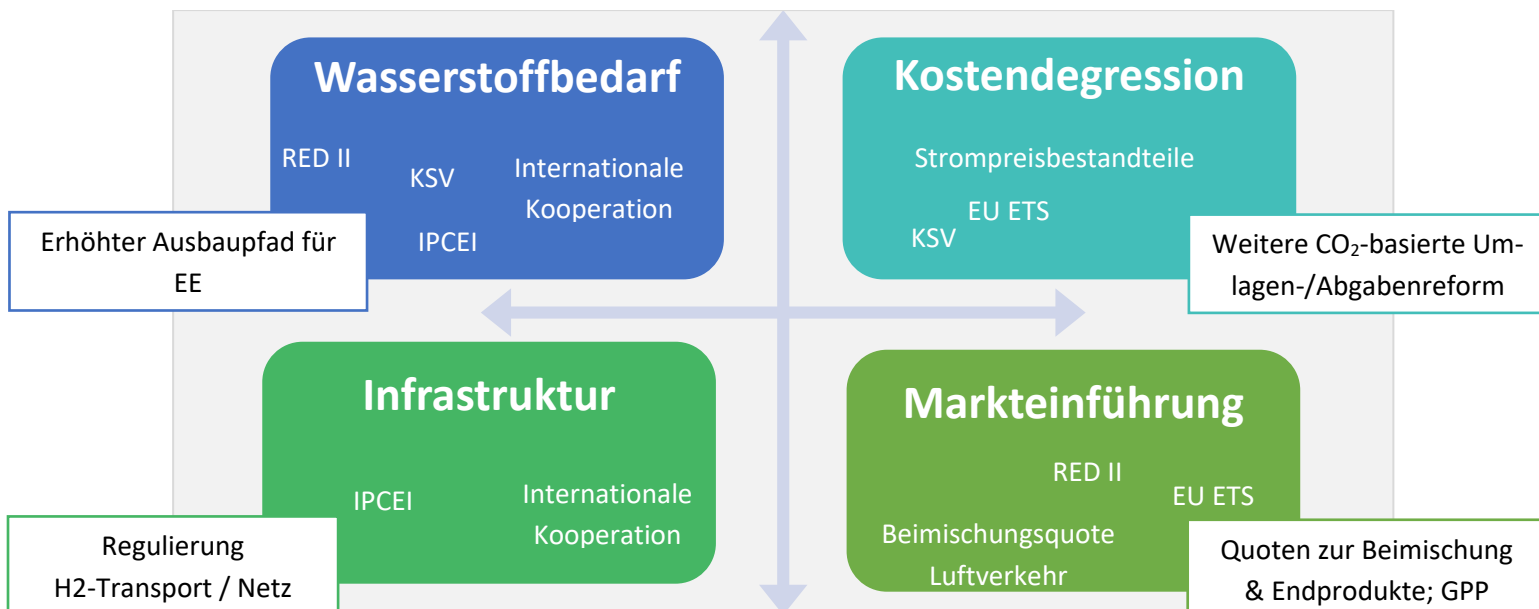


Abbildung 4: Weitere mögliche Ansätze für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft

Tabelle 2: Politikoptionen für weiteren Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft

Maßnahme	Ebene	Hemmnis	Stufe
Regulierung der H₂-Transporte / Netze Es fehlt noch an einem finalen Beschluss zur Regulierung des Transport von H ₂ und wie Entgelte erhoben werden dürfen. Derzeit verfolgt das BMWi eine eigene Regulierung von H ₂ -Netzen. Auf EU-Ebene wird das Thema voraussichtlich Ende 2021 angegangen.		Infrastruktur	Transport
Weitere Quoten für Beimischung und Endprodukte Eine Erhöhung der Beimischung im Flugverkehr wäre denkbar, ebenso Anreize zur Verwendung von „grünem“ Stahl im Fahrzeugbau.		Markteinführung	Anwendung
Öffentliche Beschaffung Schaffung eines Absatzmarktes durch eine nachhaltige öffentliche Beschaffung- etwa für grünen Stahl oder Kunststoff.		Markteinführung	Anwendung
Weitere CO₂-basierte Umlagen-/ Abgabenreform Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von (grünem) Strom gegenüber fossilen Brennstoffen.		Kostendegression	Erzeugung
Mehr Kooperationen bei H₂ und EE-Ausbau Deutschland benötigt deutlich mehr Kapazität für Erneuerbare Energien, und sollte für H ₂ -Importe rasch Lieferketten etablieren.		Wasserstoffbedarf	Erzeugung

Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019.
- BDI (2018): Klimapfade für Deutschland. Bundesverband der Deutschen Industrie, Berlin.
<https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>.
- BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16.
- BMZ (n.d.): Grüner Wasserstoff und Power-to-X. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Berlin. <http://www.bmz.de/de/themen/wasserstoff/index.html>.
- Dena (2018): dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende. Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- DVGW (2019): Wasserstoff - Schlüssel für das Gelingen der Energiewende in allen Sektoren. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn.
- FCH JU (2019): Hydrogen Roadmap Europe. A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Brussels. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf.
- Fh-ISE (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf.
- Fischedick, Manfred; Schneidewind, Uwe (2020): Folgen der Corona-Krise und Klimaschutz – Langfristige Zukunftsgestaltung im Blick behalten. Diskussionspapiers des Wuppertal Institut.
- FNB (2020): Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz (H₂-Netz). Pressemitteilung vom 28.01.2020. Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/fernleitungsnetzbetreiber-veroeffentlichen-karte-fuer-visionaeres-wasserstoffnetz-h2-netz/>.
- FZJ (2020): Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich. https://user.fz-juelich.de/record/877960/files/Energie_Umwelt_499.pdf.
- Hydrogen Council (2020): Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective.
- IEA (2020): Energy Technology Perspectives 2020. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- LBST (2019): Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Ludwig Bölkow Systemtechnik. <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/2019/bericht-wasserstoffstudie-nrw-2019-04-09-komp.pdf>.
- Pietzker, Robert; Osorio, Sebastian; Rodrigues, Renato (2021): Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector. Applied Energy, 293, 116914, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003962> [28.04.2021].

- Robinius, Martin; Markewitz, Peter; Cerniauskas, Simonas; Linßen, Jochen; Grube, Thomas; Stolten, Detlef (2020): Stellungnahme zur Wasserstoffstrategie der Bundesregierung. Forschungszentrum Jülich, Jülich. <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Meldungen/POR-TAL/DE/2020/2020-07-20-stellungnahme-wasserstoff.html>.
- Schneider, Clemens; Samadi, Sascha; Holtz, Georg; Kobiela, Georg; Lechtenböhmer, Stefan; Witecka, Wido (2019): Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Analyse im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin: 2019.
- Statistisches Bundesamt (2020): Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger.
- Tholen, Lena; Leipprand, Anna; Maier, Sarah; Kiyar, Dagmar; Küper, Malte; Adisorn, Thomas; Fischer, Andreas (mimeo): The green hydrogen puzzle: towards a German Policy Framework [auf Anfrage verfügbar].
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Umweltbundesamt, Dessau, Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.
- Wang, Anthony; van der Leun, Kees; Peters, Daan; Buseman, Maud (2020): European Hydrogen Backbone. Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Teréga; Guidehouse, Utrecht.
- Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.) (2018): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Anhang

Tabelle A1: Bedarf an Wasserstoff (in TWh) für die Jahre 2030 und 2050 (obere Bandbreite in allen Szenarien)

	2030		2050	
	H ₂ -Bedarf gesamt	davon Industrie	H ₂ -Bedarf ge- samt	davon Industrie
Deutschland				
95%-Pfad (BDI 2018)	2		49	
TM95 (Dena 2018)	46	19	169	64
GreenSupreme (UBA 2019)	39	39	76	76
-95% H ₂ (LBST 2019)	334	140	643	255
Szenario95 (FZJ 2020)	50	25	400	145
SzenarioB (Fh-ISE 2019)	20		800	
THGN (SCI4climate.NRW 2020)	34	33	220	117
NWS (BMWi 2020)	110		-	-
Europa				
Ambitious (FCH JU 2019)	665	497	2.251	885
SzenarioB (Fh-ISE 2020)	140		2.250	
Welt				
IEA (2020)	2.943	1.303	9.567	2.097

Tabelle A2: Bedarf an Elektrolysekapazität (obere Bandbreite in allen Szenarien)

	Bedarf an Elektrolysekapazität (in GW)	
	2030	2050
Deutschland		
TM95 (Dena 2018)	15	63
-95% H ₂ (LBST 2019)	160	230
Szenario95 (FZJ 2020)		62
SzenarioB (Fh-ISE 2019)	5	80
NWS (BMWi 2020)	5	-
Europa		
SzenarioB (Fh-ISE 2020)	35	511
Welt		
IEA (2020)		