

PROJEKT „WASSERSTOFF ALS ALLHEILMITTEL?“

Die deutsche Wasserstoffpolitik und ihre Auswirkungen auf die Wasserstoffwirtschaft und al- ternative Transformationspfade

Kurzfassung

Florian Kern, Frieder Schmelzle, Jens Clausen, Mervin Hummel,
Clara Anzengruber, Klaus Fichter, Johann Friedrich Tölle



IMPRESSUM

AUTORINNEN UND AUTOREN

Florian Kern, Frieder Schmelzle, Mervin Hummel, Clara Anzengruber (IÖW)

Jens Clausen, Klaus Fichter, Johann Friedrich Tölle (Borderstep Institut)

PROJEKTLEITUNG

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Dr. Klaus Fichter

Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)30 306 45 100-1 | www.borderstep.de

PROJEKTPARTNER

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) GmbH, gemeinnützig

Dr. Florian Kern

Potsdamer Str. 105 | 10785 Berlin | +49-30-884 594-0 | www.ioew.de

ZITIERVORSCHLAG

Kern, F., Schmelzle, F., Clausen, J., Hummel, M., Anzengruber, C., Fichter, K. & Tölle, J. F. (2023). Die deutsche Wasserstoffpolitik und ihre Auswirkungen auf die Wasserstoffwirtschaft und alternative Innovationspfade. Projektbericht „Wasserstoff als Allheilmittel?“ – Kurzfassung. Berlin: Borderstep Institut, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

Die Langfassung des Berichts ist verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/projekte/wasserstoff-als-allheilmittel/>

TITELBILD

© Jens Clausen

FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt *Wasserstoff als Allheilmittel?* wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Förderprogramm INSIGHT – interdisziplinäre Perspektiven des gesellschaftlichen und technologischen Wandels (16INS107).

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

EINLEITUNG

Wasserstoff wird als wichtiger Energieträger für die Umsetzung der Energiewende in Deutschland gesehen. Im Juni 2020 veröffentlichte die Bundesregierung die **Nationale Wasserstoffstrategie (NWS)**, die 38 Maßnahmen zur Erreichung verschiedener Ziele umfasst. Hierzu zählen die Etablierung von Wasserstofftechnologien als Kernelemente der Energiewende, die Schaffung eines regulativen Rahmens für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien in Deutschland, die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen durch gezielte Forschung, Entwicklung und Technologieexportförderung, die Etablierung internationaler Kooperationen sowie die zukünftige nationale Versorgung mit CO₂-freiem Wasserstoff und seinen Folgeprodukten (BMW, 2020).

Wasserstoff ist ein potenziell ein sehr vielseitig einsetzbarer Energieträger. Zahlreiche Strategiepapiere staatlicher, aber auch zivilgesellschaftlicher Akteure bringen erheblichen Technologieoptimismus zum Ausdruck, demzufolge grüner Wasserstoff einen zentralen Beitrag zur Lösung der vielfältigen Herausforderungen der Klimaschutz- und Energiepolitik der kommenden Jahrzehnte leisten kann. Wasserstoff hat dabei für zahlreiche Akteure fast den **Status eines ‚Allheilmittels‘ für die Dekarbonisierung** verschiedenster Sektoren erlangt. Politische Diskurse und Dokumente deuten darauf hin, dass die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in potenziellen Nutzungssektoren noch zu wenig mit Blick auf die Folgen für andere Energieoptionen und die breitere Innovationsdynamik reflektiert werden. Vor diesem Hintergrund untersucht das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Wasserstoff als Allheilmittel? (H2A?)“, ob aktuell eine ‚Überbuchung‘ grünen Wasserstoffs stattfindet, die zu Fehlannahmen bei Entscheidungen über alternative Transformationspfade in der Klima-, Energie- und Innovationspolitik und bei unternehmerischen Investitionsentscheidungen führen und damit negative Auswirkungen auf andere Transformationspfade haben könnte. Auf Basis der Transformationsforschung sehen wir potenzielle Risiken im Sinne einer Verdrängung (‚Crowding-outs‘) effizienterer Technologien sowie des ‚Lock-ins‘ (Unruh, 2000; Seto et al., 2016) in fossile Pfade.

In der im Rahmen des H2A?-Projektes erarbeiteten Studie „Die deutsche Wasserstoffpolitik und ihre Auswirkungen auf die Wasserstoffwirtschaft und alternative Transformationspfade“ arbeiten wir heraus, welche **Auswirkungen bestehende Politiken (Policy-Mix) zur Unterstützung des Hochlaufs** einer deutschen Wasserstoffwirtschaft sowie alternativer Transformationspfade auf die Strategien relevanter Akteure für den Markthochlauf haben und umgekehrt. Hieraus lassen sich wiederum verschiedene Konsequenzen für Wasserstoff- sowie alternative Transformationspfade ableiten. Die Analyse erfolgt sowohl für Wasserstoff als auch mit Blick auf zwei ausgewählte Wettbewerbstechnologien für den Wärme- und Individualverkehrssektor. Beide Bereiche sind potenzielle Anwendungsfelder für Wasserstoff, die jedoch hinsichtlich der Nachhaltigkeit einer Wasserstoffnutzung (insbesondere hinsichtlich Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit) umstritten sind (Clausen, 2022) und aktuell öffentlich heiß diskutiert werden. Mit Wärmepumpen und Elektroautos stehen jeweils alternative Technologien bereit.

Wir sprechen von einem „**Policy-Mix**“, weil die NWS (sowie die politische Unterstützung für Elektroautos und Wärmepumpen) eine ganze Reihe von Zielen und Instrumenten enthält, die sich potenziell auf die Entwicklung von Wasserstoff in Deutschland auswirken. Diese breitere Perspektive interessiert sich nicht nur für die Wechselwirkungen zwischen Instrumenten (*Sind die Instrumente passend und widerspruchsfrei, also konsistent, oder gibt es negative Interaktionen?*), sondern auch für Ziele (*Kohärenz: Passen die gesetzten Ziele zusammen oder gibt es Zielkonflikte?*). Darüber hinaus nutzen wir das Konzept der Glaubwürdigkeit des Policy-Mix (*Ist der Mix für die Zielgruppen glaubwürdig und*

erscheint er ihnen als zuverlässig?). Das als Grundlage für die Beantwortung dieser Fragen herangezogene Konzept der „Transformationspfade“ hebt darauf ab, dass Nachhaltigkeitsziele prinzipiell auf verschiedenen Wegen erreicht werden können. Solche Pfade entstehen durch zahlreiche Einzelentscheidungen von Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, indem z. B. bestimmte Investitionsentscheidungen getroffen werden, bestimmte politische Förderprogramme aufgesetzt werden oder bestimmte Konsumententscheidungen getroffen werden. Als Beispielfelder betrachten wir den Einbau einer neuen Heizung oder den Kauf eines neuen Autos. Diese vielen Einzelentscheidungen führen schließlich dazu, dass sich bestimmte Pfade herausbilden und damit möglicherweise auch gegen Alternativen durchsetzen.

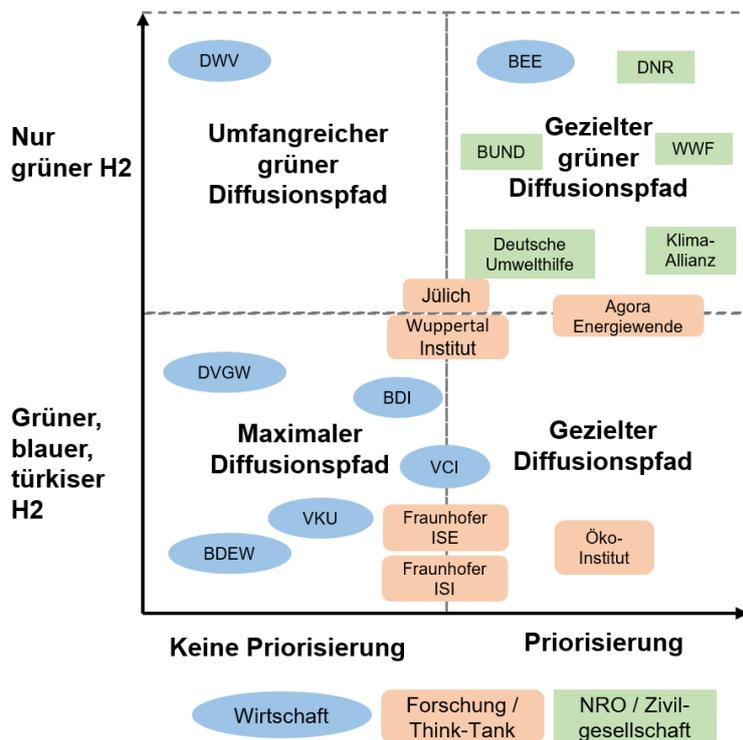
Die Studie orientiert sich an **vier forschungsleitenden Fragen**:

- (1.) Welcher Policy-Mix wird verwendet, um Wasserstoff- sowie alternative Transformationspfade (E-Mobilität und Wärmepumpen) zu fördern?
- (2.) Wie beeinflusst der Policy-Mix die Strategien seiner Zielgruppen?
- (3.) Welche Veränderungsvorschläge machen Akteure, um den Policy-Mix zu beeinflussen?
- (4.) Welche Konsequenzen dieses Wechselspiels lassen sich im Sinne der Entwicklung von Wasserstoff- und alternativen Transformationspfaden beobachten?

Grundlage der im Folgenden präsentierten Forschungsergebnisse sind **Interviews mit Stakeholdern** aus dem Bereich Wasserstoff, Verkehr und Wärmeversorgung sowie vorangehende **Analysen von Positionspapieren und Strategiedokumenten** zentraler Akteure und eine **Analyse und Kartierung des Policy-Mix**.

In Anbetracht unterschiedlicher Perspektiven auf das Potenzial von Wasserstoff als Transformationspfad, haben wir eine Kartierung der Position verschiedener relevanter Akteure vorgenommen. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis dieses Mappings von 18 Akteuren entlang ihrer Präferenzen auf Basis öffentlich zugänglicher Dokumente. Es zeigen sich zwei Bruchlinien, entlang derer sich zentrale Akteure uneins sind. Die erste betrifft die Art der Produktion von Wasserstoff (grüner, blauer, türkiser Wasserstoff), die zweite die Vorstellungen zur Priorisierung von Anwendungsbereichen für Wasserstoff (Priorisierung oder keine Priorisierung). Aus diesen beiden Dimensionen sind vier grundlegende Pfade der Verbreitung (Diffusion) von Wasserstoffproduktion und -nutzung, sogenannte „Transformationspfade“ ableitbar. Sie bilden die Grundlage für unsere Analysen des Policy-Mix und seiner Auswirkungen. Politische Ziele wurden bundespolitischen Programmen und Strategien entnommen. Staatliche Förderinstrumente wurden für diese Bereiche systematisch erfasst, z. B. aus der NWS der Bundesregierung und anderen politischen Dokumenten, jeweils für die Politikfelder Wasserstoff, Verkehr und Wärmeversorgung.

Abbildung 1: Mapping von Akteurspositionen zu möglichen Wasserstoff-Transformationspfaden



Quelle: Eigene Darstellung, IÖW. BDEW = Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft; BDI = Bundesverband der Deutschen Industrie; BEE = Bundesverband Erneuerbare Energie; BUND = Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; DNR = Deutscher Naturschutzring; DVGW = Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches; DWV = Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband; Jülich = Projektträger Jülich; VCI = Verband der Chemischen Industrie; VKU = Verband kommunaler Unternehmen; WWF = World Wide Fund For Nature Deutschland.

DER DEUTSCHE POLICY-MIX FÜR WASSERSTOFF

Der deutsche Policy-Mix für Wasserstoff ist komplex und verfolgt **eine Reihe von unterschiedlichen Zielen**. Die Dekarbonisierung aller Wirtschaftssektoren gilt als übergeordnetes Ziel und begründet auch den Markthochlauf für Wasserstoff an sich. Das Finden einer Balance mit anderen Zielsetzungen, die sich kohärent in eine Gesamtstrategie einfügen, ist eine herausfordernde Aufgabe für die Bundesregierung. Insbesondere im Lichte der hochdynamischen energiepolitischen Entwicklungen seit 2022 könnte der Klimaschutz Gefahr laufen, gegenüber dem Ziel der Energiesicherheit an Bedeutung zu verlieren. Vom Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2016) bis zum letzten Koalitionsvertrag (2021) wurden zudem wiederholt energiewirtschaftliche und technologiepolitische Ziele, auch mit Blick auf den internationalen Wettbewerb, formuliert. Die bislang verfolgten Ziele der Bundesregierung sind relativ stabil, ihre Priorisierung hat sich in den letzten fünf Jahren jedoch deutlich verlagert. Der Entwurf eines kohärenten Zielbildes bleibt herausfordernd, beinhaltet aus Sicht der interviewten Stakeholder jedoch keine grundlegenden Zielkonflikte.

Bisher implementierte politische Instrumente dienen zunehmend dem Klimaschutz und der Energiesicherheit in Deutschland. Unsere Analysen zeigen zudem, dass die Adressierung der gesamten

Wasserstoff-Wertschöpfungskette mit **regulatorischen, finanziellen und weichen¹ Politikinstrumenten** (Borrás & Edquist, 2013) recht ausgewogen ist. Bezüglich der vom Policy-Mix adressierten Anwendungsfelder fällt jedoch auf, dass es **relativ wenige gezielte Politikinstrumente gibt, die den Einsatz von Wasserstoff in der Industrie** anreizen. Gleichzeitig gibt bzw. gab es viele Politikinstrumente, die auf den Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ausgerichtet sind. Dieser ‚Überhang‘ steht im Widerspruch zum erklärten Ziel der NWS, dass Wasserstoff in verschiedenen Sektoren zur Dekarbonisierung beitragen kann (inkl. Verkehr, aber eben auch als Energiespeicher, in der Sektorenkopplung (Power-to-X) oder als Grundstoff in der Industrie). Auch sind im Hinblick auf den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur größere Lücken zu konstatieren. Sowohl national als auch auf EU-Ebene bestehen Verbesserungspotenziale bei der kooperativen Planung und Gestaltung von Transportinfrastrukturen. Dies wird von Unternehmen, die Wasserstoff abnehmen und einsetzen können, kritisiert. Aus deren Sicht führt dies zu Verzögerungen bei Investitionen. Ferner ist das Handeln jener Ministerien, die in der Verantwortung stehen, gemeinsame Positionierungen und Strategien zu entwickeln, offenbar nicht hinreichend aufeinander abgestimmt. Dies nehmen auch zentrale Wasserstoff-Stakeholder wahr. Der aktuelle Mix an Politikinstrumenten ist jedoch in sich konsistent.

Neben einer durch die aktuelle Politik bedingten Verzögerung bei den Investitionen können sich Lücken im Policy-Mix auch auf dessen **Glaubwürdigkeit** auswirken. Jüngst wurden fundamentale Definitionslücken, die Investitionsentscheidungen von Akteuren verzögert haben, teilweise behoben – beispielsweise durch die Verabschiedung zweier Delegierter Rechtsakte durch die Europäische Kommission, welche rechtlich festlegen, was genau unter grünem (erneuerbarem) Wasserstoff zu verstehen ist. Dennoch hängen weiterhin viele technische und rechtliche Detailfragen von ausstehenden Grundsatzentscheidungen ab.

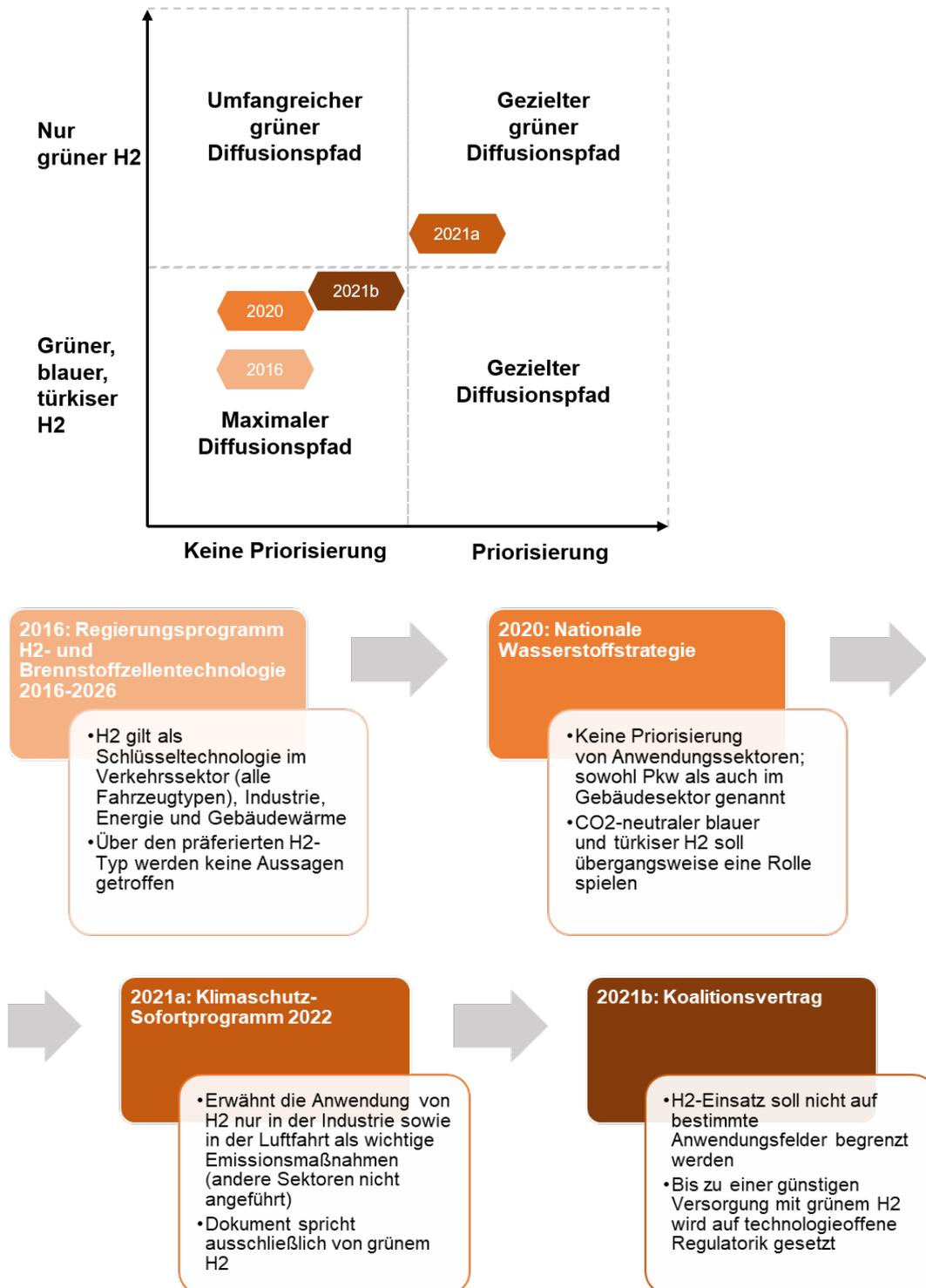
Die **Wasserstoffproduktion in Deutschland** soll von einer derzeit installierten Leistung von unter 100 MW auf 10.000 MW im Jahr 2030 ansteigen (SPD et al., 2021). Anhand der zur Verfügung stehenden Daten ist jedoch zu bezweifeln, dass der Aufbau von Elektrolyseuren in Deutschland diesem Ziel gerecht werden kann. Eine mögliche Lösung, die Lücke zwischen Bedarf und Angebot in Deutschland zu schließen, ist der Import eines bedeutenden Teils des Wasserstoffs aus Ländern mit höheren potenziellen Angebotsmengen (Öko-Institut, 2021). Der Aufbau von **Importbeziehungen** bringt jedoch trotz relativ großer weltweiter Potenziale zur Produktion von Wasserstoff Unsicherheiten mit sich (Clausen, 2022). Auch wenn langfristig bis zu 90 % des deutschen Wasserstoffbedarfs durch Importe gedeckt werden könnten, ist bis 2030 trotz bestehender Förderinstrumente wie H2Global keine ausreichende Bereitstellung zu erwarten (ebd.).

Insgesamt ist in Deutschland ein umfangreicher und relativ konsistenter und kohärenter Mix an Politikinstrumenten entstanden, der über die Jahre hinweg eine leichte Tendenz hin zu einem ‚gezielten grünen Diffusionspfad‘ für Wasserstoff zeigt. Diese Verschiebungen sind an politischen Strategiedokumenten ablesbar (siehe Abbildung 3), welche Weichenstellungen für unterstützte Pfade vor und nach der NWS abbilden. Momentan ist bundespolitisch jedoch **keine klare Richtung hin zu einem konsolidierten Transformationspfad** zu erkennen. Die zukünftige Nutzung blauen Wasserstoffs ist politisch nicht ausgeschlossen. Zwar wird langfristig lediglich grüner Wasserstoff als sinnvolle Option gesehen. Eine Übergangsphase, in der auch blauer Wasserstoff genutzt werden könnte, erscheint jedoch möglich. Hinsichtlich der Priorisierung von Anwendungen besteht mehr Sicherheit unter den

¹ Unter weichen Instrumenten verstehen wir Instrumente, die freiwilliger Natur sind, also keinen direkten Zwang beinhalten oder mit direkten finanziellen Anreizen verbunden sind. Dazu zählen typischerweise Kampagnen, freiwillige Selbstverpflichtungen, Partnerschaften oder die Bereitstellung von Informationen.

betreffenden Akteuren als bei der Produktion von Wasserstoff. Dennoch sind Bereiche im Verkehrs- und Wärmesektor weiterhin umstritten.

Abbildung 2: Bundespolitisch unterstützte Wasserstoffpfade im Zeitverlauf



Quelle: Eigene Darstellung, IÖW.

AUSWIRKUNGEN DES POLICY-MIX AUF AKTEURSSTRATEGIEN

In Stakeholder-Interviews wurden Gesprächspartnerinnen und -partner zu Auswirkungen des Wasserstoff-Policy-Mix auf Akteure befragt. Die Ergebnisse können die bisher eher schleppende Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland zumindest teilweise erklären. Wie sich der komplexe Policy-Mix für Wasserstoff auf einzelne Akteursstrategien in Deutschland auswirkt, lässt sich zwar nicht anhand einfacher Kausalbeziehungen aufzeigen, ein Wechselspiel zwischen dem Policy-Mix und seinen Zielgruppen ist empirisch jedoch klar beobachtbar. An vielen Stellen zeigen sich Auswirkungen des Policy-Mix auf Akteure im Markthochlauf bzw. seiner Vorbereitung weniger in fokussierten Strategien und aktivem Handeln, sondern in einem **Abwarten** („Wait and see“). Der zentrale Erklärungsansatz hierfür ist, dass fehlende regulative Rahmenbedingungen und ausstehende Förderentscheidungen Investitionen in Wasserstoffprojekte verhindern oder erschweren. Die Wirtschaft sieht sich in vielen Belangen als nicht handlungsfähig, solange kein klarer Plan auf dem Tisch liegt, der beispielsweise die zukünftige Ausgestaltung einer Kerninfrastruktur („Backbone“) für den Transport von Wasserstoff in Deutschland klar umreißt.

Die bisher realisierten Projekte zur Erzeugung von Wasserstoff in Deutschland bleiben weit unterhalb der ambitionierten Ziele der Bundesregierung. Von der anvisierten Gesamtleistung von 10 GW im Jahr 2030 ist der Status Quo heute sehr weit entfernt. Zentralen Akteuren ist weitgehend unklar, woher die angestrebten Mengen bezogen werden sollen. Dennoch stehen auch sie geschlossen hinter dem Bekenntnis der Politik zu grünem Wasserstoff. Auf längere Sicht wird er als alternativlos angesehen, um die Emissionsminderungsziele zu erreichen. Ob dennoch auch **blauer Wasserstoff** als Übergangslösung eine Rolle spielen sollte, ist zwischen unterschiedlichen Stakeholdergruppen umstritten. Einzelne Akteure sprechen sich für befristete Übergangsperioden aus, deren Realisierbarkeit bzw. Sinnhaftigkeit jedoch schwer vorstellbar ist, da die hierfür benötigten Infrastrukturen in Deutschland heute nicht zur Verfügung stehen. Sie müssten somit unter erheblichem Aufwand parallel zum Aufbau der Elektrolyseinfrastruktur aufgebaut werden, nur um sie nach wenigen Jahren wieder stillzulegen, da ihr Betrieb mit Restemissionen von Treibhausgasen verbunden ist. Zudem ist bereits die ausreichende Verfügbarkeit von Erdgas für die deutsche Wirtschaft fraglich. Die Risiken versunkener Kosten in Form von Fehlinvestitionen in eine Infrastruktur für blauen Wasserstoff sind erheblich.

Eine kollektive „Richtungssicherheit“ zentraler Akteure für einen bestimmten Transformationspfad kann bisher nicht konstatiert werden (Fichter, Tölle & Clausen 2023). Dieser Eindruck wird wiederum von einzelnen Stakeholder-Gruppen zum Anlass genommen, den Policy-Mix mit Versuchen der Einflussnahme (Lobbying) in ihrem Sinne zu beeinflussen. Die beiden Dimensionen möglicher Pfade („Farbenlehre“ und „Priorisierung von Anwendungen“) werden öffentlich intensiv diskutiert. Insbesondere die zweite Dimension polarisiert: Akteure mit Bezug zur Gaswirtschaft fürchten im Zuge einer etwaigen stark einschränkenden **Priorisierung von Anwendungsbereichen für Wasserstoff** scheinbar um Vermögenswerte („sunk investments“) und Geschäftsmodelle und stehen ihr ablehnend gegenüber, obwohl entsprechende Mechanismen eine effiziente Allokation knapper Wasserstoffmengen ermöglichen könnte. Daher werden öffentlich immer wieder Anwendungsbereiche stark gemacht (z.B. im Individualverkehr mit E-Fuels oder von Wasserstoff-Ready-Heizungen), die aus wissenschaftlicher Sicht nicht sinnvoll sind (Clausen 2022). Mancherorts verdecken interessengeleitete Positionen und kommunikative Zuspitzungen evidenzbasierte Argumente, die als handlungsleitend für eine zukunftssichere Weiterentwicklung des Policy-Mix werden sollten.

DER POLICY-MIX ZUR FÖRDERUNG VON INDIVIDUELER ELEKTROMOBILITÄT UND WÄRME-PUMPEN

Als Ersatz für die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas steht in erster Linie regenerativ erzeugter Strom zur Verfügung, aus dem auch grüner Wasserstoff hergestellt werden kann. Um die Wasserstoffpolitik auch mit Blick auf den Wettbewerb neuer klimaneutraler Lösungen untereinander beurteilen zu können, und die mögliche Herausbildung von alternativen *Transformationspfaden* zu beleuchten, wurden in der Studie auch die auf Alternativen gerichteten Politiken untersucht. Als beispielhafte Alternativen wurden die Elektromobilität mit dem Fokus auf PKWs als Alternative zum Wasserstoff-PKW sowie die Wärmepumpe als Alternative zur mit Wasserstoff betriebenen Gasheizung untersucht. Beide potenziellen Anwendungen werden zurzeit besonders kontrovers diskutiert und bieten sich daher für unsere Analyse möglicher alternativer Transformationspfade besonders an.

Die Politik hat den Rahmen für einen Neu-Neu-Wettbewerb (Nill, 2009) vorgegeben, der primär in der Wirtschaft **bereits eindeutig entschieden** ist. Ein Marktanteil von 99,9 % der batterieelektrischen Fahrzeuge im Markt der Fahrzeuge ohne CO₂-Emissionen im Fahrbetrieb spricht eine deutliche Sprache. Wesentliche Änderungen dieses Trends in den nächsten Jahren sind nicht absehbar. Drastische Anstiege der Marktanteile von Hybrid- und batterieelektrischen Antrieben zeigen eine rasche Wirksamkeit des seit 2016 bzw. 2020 auf klimaneutrale Fahrzeuge gerichteten Policy-Mix, der Wasserstoff- und Elektrofahrzeuge gleichermaßen fördert. Mit Blick auf eine Richtungssicherheit begünstigende Politik stellt sich aktuell die Frage, was 2023 nach der Absenkung der Staatsanteile der Fördersätze für batterieelektrische PKW von 6.000 EUR auf 4.500 EUR geschehen wird. Ferner wird eine Reihe weiterer Dynamiken wirken:

- ▶ Supercredits² für Zero and Low Emission Vehicles in der Errechnung von Flottengrenzwerten fallen in 2023 von 1,33 auf 1 und laufen damit aus. Das Erreichen der Flottenziele erfordert so deutlich mehr CO₂-arme Autos in der verkauften Flotte jedes Herstellers.
- ▶ Immer mehr Fabriken sind auf die Herstellung batterieelektrischer PKW umgerüstet und müssen ausgelastet werden.
- ▶ Die Förderung von Plug-In-Hybriden läuft aus, was bei ersten Dienstwagenflotten zu einem umsteuern auf batterieelektrische PKW führt (z.B. Knauer, 2023).

Wäre der in 2023 geltende Policy-Mix wirksam, richtungssicher und ausgewogen, müsste der Marktanteil von batterieelektrischen und Wasserstoff-PKW bis 2035 kontinuierlich weiter steigen. Der Erfolg des Policy-Mix wird sich somit jährlich anhand der Zulassungsstatistik beurteilen lassen. Es ist aufgrund unserer Analyse allerdings nicht absehbar, dass sich die Marktanteile zugunsten von mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen-PKW deutlich verschieben werden (Clausen 2022). Angesichts eines prinzipiell technologieoffenen Policy Mix zeigt der vom Elektroauto dominierte Markt, dass der PKW mit Wasserstoff-Brennstoffzelle weder für die Kundinnen und Kunden noch für die Herstellenden ein attraktives Produkt ist.

Wie bei batterieelektrischen PKW, wird aus Sicht der interviewten Akteure eine starke transformative Wirkung zur Veränderung des Marktes für Wärmepumpen von der Kombination eines attraktiv hohen Fördersatzes mit einer ordnungsrechtlich wirksamen Vorschrift zur Exnovation von reinen Öl-

² Die Supercredits bestehen darin, dass bei Beginn der Errechnung von Flottengrenzwerten in 2020 jeder produzierte klimaneutrale Wagen wie zwei nicht klimaneutrale Wagen gewichtet wird. Danach sank dieser Wert über 1,66 (in 2021) und 1,3 (in 2022) auf 1,0 (ab 2023).

und Gasheizungen verbunden. Obwohl die Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes die Gebäudebesitzenden vermutlich nicht wie geplant (BMWK & BMWWSB, 2022) dazu zwingt, zunächst die Möglichkeit eines Anschlusses ans Fernwärmenetz sowie die der Installation einer Wärmepumpe oder Hybridheizung zu prüfen, bevor auch die Optionen Biomethan, grüner Wasserstoff und dessen Folgeprodukte sowie andere grüne Gase und schließlich nachhaltige Biomasse gewählt werden können (Tagesspiegel, 2023), dürfte die **Position der Wärmepumpe im Wettbewerb deutlich gestärkt** werden. Weder Biomethan noch Wasserstoff oder andere grüne Gase sind in wesentlichen Mengen oder zu attraktiven Preisen kurzfristig auf dem Markt verfügbar und auch der Markt für Holz, Holzhackschnitzel und Pellets ist zumindest in Kombination mit der Forderung nach ‚nachhaltiger Biomasse‘ kaum lieferfähig (Scientists for Future, 2022).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Unsere Analysen zeigen, dass sich die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland bisher nur langsam entwickelt, auch wenn es einen breiten und relativ gut ausbalancierten Policy-Mix gibt. Dort, wo gangbare Alternativen zum Einsatz von Wasserstoff existieren, werden durch staatliche Politik auch entsprechende **alternative Transformationspfade gezielt unterstützt**, so dass derzeit kein ‚Crowding-out‘ effizienterer Technologien (am Beispiel von individueller Elektromobilität und Wärmepumpen) zu befürchten ist. Verschiedene Akteure sind sich weitgehend einig, dass Wärmepumpen und E-Mobilität gegenüber Wasserstoff die nachhaltigeren Optionen darstellen. Auch die Märkte entwickeln sich eindeutig in Richtung dieser beiden Pfade.

Gleichzeitig gibt es politische Kontroversen, was den Einsatz von E-Fuels oder ‚Wasserstoff-ready‘ Heizungen angeht. Empirisch zeigt sich jedoch keine Technologiediffusion in Richtung dieser Transformationspfade, so dass hier derzeit kein Risiko eines stärkeren Carbon Lock-ins gegeben ist. Dennoch wirken **Diskussionen um ‚Technologieoffenheit‘ und die Nutzung von Wasserstoff-ready Heizungen oder Wasserstoff-basierte E-Fuels als Störfaktoren**, was zu Verunsicherung bei relevanten Akteuren führt, und auch bei Haushalten teilweise verfängt und möglicherweise zur Ablehnung politischer Entscheidungen wie der ‚65%-Regel‘ im Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes beiträgt. Umfragen des Deutschlandtrends (Ehni, 2023) zeigen, dass Umwelt- und Klimaschutz in der Bevölkerung als wichtigstes Problem für die Politik gesehen wird. Auch wünschen sich 44 % der Befragten mehr Tempo beim Klimaschutz (ebd.). Gleichzeitig plädieren einzelne Akteure, wie z.B. Gasnetzbetreibende, dafür, andere Pfade wie ‚Wasserstoff-ready‘-Heizungen offenzulassen, und finden in der öffentlichen Diskussion mit ihren (interessengeleiteten) Positionen damit Anklang. Trotzdem sind jedoch bei Heizung und Automobilität die elektrischen Lösungen klar auf dem Vormarsch.

Größere **Risiken für einen verstärkten Carbon Lock-in** sehen wir in der Nutzung blauen Wasserstoffs, da für dessen Produktion langlebige und kapitalintensive Infrastrukturen aufgebaut werden müssten, die jedoch mittelfristig nicht mehr genutzt werden sollten, da die technischen Verfahren nicht klimaneutral sind. Das gleiche gilt für den Aufbau von ‚Wasserstoff-ready‘ LNG-Terminals. Mit dem Aufbau solcher Infrastrukturen werden wirtschaftliche Anreize für betreibende Unternehmen geschaffen, diese Infrastrukturen länger zu nutzen als es verbindlich beschlossene Treibhausgasminderungsziele zulassen. Hier besteht das Risiko, dass die Terminals auch mittel- bis langfristig mit flüssigem Erdgas betrieben werden, wenn Wasserstoff nicht ausreichend oder nicht zu kompetitiven Preisen verfügbar sein sollte (Clausen 2022). Gleichzeitig würde die Produktion blauen Wasserstoffs die Abhängigkeit von Erdgas verlängern, was auch negative Implikationen für die Energiesicherheit hätte.

Die bisherige Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland insgesamt wird **durch fehlende Richtungssicherheit gehemmt** (Fichter, Tölle & Clausen 2023). Dies bedeutet, dass für Wasserstoff momentan keine "kollektive Überzeugung der Richtigkeit eines sozio-technischen Transformationspfades" (Clausen & Fichter, 2020, S. 19 f) gegeben ist. Zudem konnten grundlegende Unsicherheiten unter Wasserstoff-Akteuren lange nicht ausgeräumt werden (insbesondere auf EU-Ebene der delegierten Rechtsakte zur rechtlichen Definition ‚grüner‘ Wasserstoffproduktion, Genehmigung von IPCEI-Großprojekten). Der bestehenden Policy-Mix konnte daher bisher keine ausreichende Dynamik für einen raschen Markthochlauf entwickeln, auch wenn der Policy-Mix gemeinhin als positiv wahrgenommen wird. Gemeinsame Überzeugungen unter den Hauptakteuren können einen Transformationsprozess fördern und beschleunigen; widersprüchliche Überzeugungen können den Prozess blockieren oder verlangsamen. Letzteres scheint im Moment (noch) der Fall bei der Entwicklung von Wasserstofftransformationspfaden in Deutschland zu sein.

REFERENZEN

- BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>
- BMWK & BMWSB (2022): 65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024 Konzeption zur Umsetzung. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/konzeptpapier-65-prozent-ee.pdf>
- Borrás, S. & Edquist, C. (2013): 'The choice of innovation policy instruments', *Technological forecasting and social change*, 80(8), S. 1513–1522. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.002>.
- Clausen, J. (2022): Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen. Borderstep Institut. Berlin. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/06/AP2-Wasserstoff-Potenziale-Bedarfe_27-6-2022.pdf
- Clausen, J. & Fichter, K. (2020): Governance radikaler Systemtransformationen. Wirkung politischer Strategien und Instrumente in der Transformation großer Versorgungssysteme. Auswertung der Fallstudien aus Arbeitspaket 1. Borderstep Institut. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/02/Go-Transformations-Governance-2020-02-22.pdf>.
- Ehni, E. (2023): ‚Klimawandel als wichtigstes Problem‘, tagesschau.de, 6. April. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/inland/deutschlandtrend/deutschlandtrend-3339.html>.
- Fichter, K., Tölle, J. & Clausen, J. (2023). Richtungssicherheit in der Wasserstoffpolitik: Eine explorative Untersuchung, Berlin: Borderstep Institut.
- Knauer, M. (2023): Telekom rangiert Diesel-Dienstwagen aus. Automobilwoche.de. Verfügbar unter: <https://www.automobilwoche.de/nachrichten/telekom-rangiert-diesel-dienstwagen-aus-kritik-preispolitik-der-autobauer>.
- Nil, J. (2009): Ökologische Innovationspolitik: eine evolutiv-ökonomische Perspektive. 1. Aufl. Marburg: Metropolis-Verl (Wirtschaftswissenschaftliche Nachhaltigkeitsforschung, 6).
- Öko-Institut (2021): 'Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland'. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Die-Wasserstoffstrategie-2-0-fuer-DE.pdf>.
- Scientists for Future (2022): Heizen mit Holz: knapp, teuer und unerwartet klimaschädlich. Berlin. Verfügbar unter: <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/> (Zugriff am 9. November 2022).
- Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G. and Ürge-Vorsatz, D. (2016): 'Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications', *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1), S. 425–452. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>.
- SPD, Bündnis 90/Die Grünen, & FDP (2021): 'Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit'. Koalitionsvertrag. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf>.
- Tagesspiegel (2023): 'Tagesspiegel Background Energie & Klima', 21 Februar. Verfügbar unter: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/newsletters>.
- Unruh, G.C. (2000): 'Understanding carbon lock-in', *Energy Policy*, 28(12), S. 817–830. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).