

Lukas Weymann, Nils Bittner, Julian Dörr, Sven Altvater,
Sophie Lohmann, Thomas Stahlecker, Henning Döscher

Hemmnisse beim Aufbau eines regionalen Wasserstoffökosystems

Whitepaper:
Analyse und Handlungsempfehlungen

Hrsg.: H2 Companion



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Baden-Württemberg

Impressum

Hemmende Faktoren für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg – Analyse und Handlungsempfehlungen

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Lukas Weymann, lukas.weymann@isi.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Lukas Weymann, lukas.weymann@isi.fraunhofer.de; Nils Bittner, nils.bittner@isi.fraunhofer.de; Julian Dörr, julian.doerr@iao.fraunhofer.de; Sven Altvater, sven.altvater@isi.fraunhofer.de; Sophie Lohmann, s.lohmann@irees.de; Thomas Stahlecker, thomas.stahlecker@isi.fraunhofer.de; Henning Döscher, henning.doescher@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement Universität Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Julian Dörr, julian.doerr@iat.uni-stuttgart.de

IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH

Durlacher Allee 77, 76131 Karlsruhe

Sophie Lohmann, s.lohmann@irees.de

Bildnachweis

Deckblatt:

© AA+W – Adobe Stock

Nummer 362995918

Zitierempfehlung

Weymann, L.; Altvater, S.; Bittner, N.; Dörr, J.; Lohmann, S.; Stahlecker, T.; Döscher, H.; (2025): Hemmende Faktoren für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg – Analyse und Handlungsempfehlungen. Karlsruhe, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, IREES Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement Universität Stuttgart

Veröffentlicht

September 2025

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Modellregionen Baden-Württemberg	4
1.2	Methoden und konzeptionelle Grundlage	6
2	Empirische Ergebnisse: Hemmnisfaktoren	9
2.1	Wissensfaktoren	10
2.1.1	Erfahrungen der Modellregionen.....	13
2.1.2	Abhängigkeiten und Handlungsspielräume	13
2.2	Kostenfaktoren.....	15
2.2.1	Erfahrungen der Modellregionen.....	20
2.2.2	Abhängigkeiten und Handlungsspielräume	22
2.3	Marktfaktoren	24
2.3.1	Erfahrungen der Modellregionen.....	28
2.3.2	Abhängigkeiten und Handlungsspielräume	29
2.4	Institutionelle Faktoren.....	32
2.4.1	Erfahrungen der Modellregionen.....	35
2.4.2	Abhängigkeiten und Handlungsspielräume	36
3	Handlungsempfehlungen	40
3.1	Perspektive der Modellregionen in Baden-Württemberg	40
3.2	Einordnung aus Perspektive der Begleitforschung	41
4	Schlussfolgerungen	47

1 Einleitung

Die Umsetzung der Energie-Transformation als Antwort auf den voranschreitenden menschengemachten Klimawandel ist – trotz aktuell wachsenden Widerstands (Sovacool et al. 2022) – als solche in Deutschland, Europa und den meisten Ländern nach wie vor ausgesprochenes Ziel. Die konkrete Ausgestaltung mag dabei international sehr unterschiedlich sein, aber als zentraler Baustein steht die Substitution fossiler Energieträger außer Frage. In vielen Fällen erscheint eine direkte Elektrifizierung sinnvoll und am effizientesten, aber auch alternative Energieträger, insbesondere Wasserstoff, sind notwendig, um eine Transformation in möglichst allen Sektoren, Anwendungen und Prozessen zu erreichen. Allerdings kann eine derartig weitreichende Transformation nicht allein durch die Logik des Marktes in den erforderlichen Zeiträumen vorangetrieben werden. Zur Erreichung dieser internationalen Anstrengung kommen unterschiedliche diplomatische Ansätze und internationale, nationale und regionale Policy-Instrumente zum Einsatz.

In Deutschland hat die Förderung von Modellregionen eine lange Geschichte und hat insbesondere in diesem Jahrhundert mit Blick auf die Erreichung der Klimaziele an Relevanz gewonnen (z. B. Deutscher Bundestag 2021b). Auch für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Deutschland wurden in vielen Regionen Wasserstoffmodellregionen gefördert, die als Keimzelle die Kommerzialisierung relevanter Technologien und den Aufbau relevanter Infrastrukturen demonstrieren sollen. In den Regionen sind vielfältige Akteure aus Wissenschaft (z. B. Technologieentwicklung), Wirtschaft (Technologie-Angebot und -Nachfrage) und Politik (strategische Ausrichtung und Rahmensezung), Behörden (Regulierungen und Genehmigungen) bzw. Gesellschaft eingebunden. Aus den Erfahrungen der Modellregionen können wichtige Schlussfolgerungen für typische Hindernisse gezogen werden, die für den Aufbau eines nationalen und internationalen Wasserstoffökosystems adressiert und berücksichtigt werden sollten.

In diesem White Paper wurde daher aus der Begleitforschung zu zwei Modellregionen in Baden-Württemberg (Kapitel 1.1) eine qualitative und quantitative Beschreibung der relevantesten Hemmnisse für den Aufbau eines innovativen Wasserstoffökosystems vorgenommen (Kapitel 2). Das Konzept (Kapitel 1.2) basiert auf den Hemmnisfaktoren für Innovationsaktivitäten der OECD (OECD/Eurostat 2018). Auf dieser Basis werden bereits bestehende Diskussionen zu Handlungsoptionen auf unterschiedlichen Ebenen reflektiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet (Kapitel 3). Die Analyse hat das Ziel einerseits ein Verständnis dafür zu schaffen, welche Einflüsse und Abhängigkeiten den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft hemmen können und andererseits Handlungsspielräume aufzuzeigen, wie diesen Hemmnissen entgegengewirkt werden kann.

1.1 Modellregionen Baden-Württemberg

Baden-Württemberg verfolgt das ambitionierte Ziel, bis 2040 und damit fünf Jahre vor dem Bund und zehn Jahre vor der Europäischen Union klimaneutral zu sein. Bis zum Jahr 2030 strebt das Land eine Reduzierung seiner Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber 1990 an (Baden-Württemberg). Vor dem Hintergrund dieser anspruchsvollen Klimaschutzziele hat das Kabinett des Landes am 15. Dezember 2020 die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg verabschiedet, um den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft für den Industrie- und Technologiestandort Baden-Württemberg anzustoßen (Baden-Württemberg 2024). Dafür initiierte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft das Förderprogramm „Modellregion Grüner Wasserstoff“ mit über 48 Millionen Euro aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und Landesmitteln. Für diese Förderung wurden die beiden Modellregionen „H2-Wandel“ und „H2-GeNeSiS“ ausgewählt, nebst wissenschaftlicher Begleitung durch das „H2-Companion“ Projekt. Die Modellregionen dienen als Demonstrationsprojekte für den Aufbau einer Wasserstoff-Wertschöpfungskette von der

Erzeugung bis zur Nutzung und sollen den Weg für den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft vor Ort ebnen. Die beiden Modellregionen zeichnen sich dabei durch unterschiedliche Schwerpunkte aus.

Die Modellregion „H2-Wandel“ erstreckt sich über die Region Mittlere Alb-Donau-Ostwürttemberg und umfasst den Landkreis Tübingen, Landkreis Reutlingen, Alb-Donau-Kreis, Landkreis Heidenheim, den Ostalbkreis und die Städte Ulm und Schwäbisch Gmünd. Darüber hinaus gehört ein Konsortium mit zahlreichen weiteren Projektpartnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Kammern dazu. Die Modellregion ist durch eine heterogene Struktur aus urbanen und ländlichen Räumen geprägt und die insgesamt vier geförderten Leuchtturmprojekte bilden die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette ab. Mit der H2-Factory ist in Ulm eine 3-MW-Elektrolyseanlage geplant, die regionale Verbraucher mit grünem Wasserstoff versorgen soll. Dieser wird auf Basis von Wasserkraft und anderen regionalen erneuerbaren Energien produziert. Im Rahmen des Projekts H2-ToGo wird die Nutzung von Wasserstoff in Nutzfahrzeugen für Logistik und Handwerk getestet. Zudem wird in Ulm eine Wasserstofftankstelle errichtet. Im Projekt H2-Grid wird in der Region Reutlingen-Tübingen eine dezentrale Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut, um Erzeugung und Verbrauch lokal zu vernetzen. In Schwäbisch Gmünd entsteht mit H2-Aspen ein Technologiepark rund um einen 10-MW-Elektrolyseur, der auf innovative Start-ups und Forschungseinrichtungen ausgerichtet ist (H2-Wandel). Zusätzlich zu den vier Hauptprojekten gibt es H2-ToKnow, das alle Aus-, Weiter- und Fortbildungsangebote der Partner bündelt.

In der Modellregion „H2 GeNeSiS“ liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung eines umfassenden Verteilnetzwerks für grünen Wasserstoff. Herzstück der Modellregion ist der Bau des ersten Abschnitts einer Wasserstoffpipeline zwischen dem Hafen Stuttgart und Esslingen. Die Pipeline verbindet verschiedene Einzelprojekte miteinander. So können Erzeuger, wie beispielsweise Elektrolyseure im Stuttgarter Hafen und in Esslingen, grünen Wasserstoff direkt in die Pipeline einspeisen. Entlang der Pipeline können zudem verschiedene Verbraucher aus Industrie oder Mobilitätsanbieter gezielt angebunden werden, um eine direkte Versorgung mit Wasserstoff sicherzustellen. Zusätzlich zur Neckar-Pipeline entsteht mit dem Green Hydrogen Hub am Stuttgarter Hafen ein ganzheitliches Konzept zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, dass die Erprobung sektorenübergreifender Anwendungen in Wärmeversorgung und Mobilität umfasst. Alle Aktivitäten der Modellregion werden über einen „H2-Marktplatz“ organisatorisch vernetzt, um das regionale System auch über die Pilotphase hinaus für weitere Projekte und Akteure zu öffnen (H2 GeNeSiS).

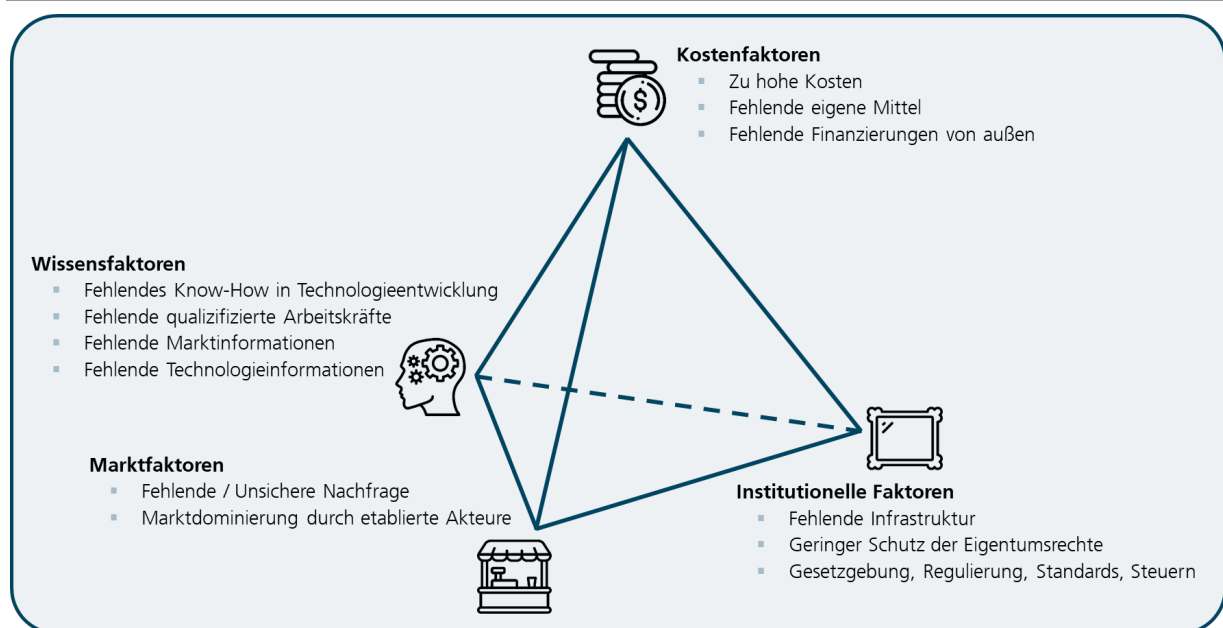
Wissenschaftlich begleitet werden die beiden Modellregionen Grüner Wasserstoff durch das Begleitforschungsprojekt H2-Companion. Das Konsortium wird vom Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO geleitet und umfasst als Partner das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, das Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (I-REES) sowie das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). Die Begleitforschung fokussiert sich auf wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Fragestellungen im Kontext des Wandels hin zu einer Wasserstoffwirtschaft und untersucht die Auswirkungen von Wasserstofftechnologien auf verschiedenen Ebenen. Zu den zentralen Aufgaben zählen die Unterstützung bei der Entwicklung langfristiger Szenarien und nachhaltiger Geschäftsmodelle, die Erfassung von CO₂-Einsparungen sowie die Analyse und Konzeption effektiver Ansätze für Bürgerbeteiligung und Öffentlichkeitsarbeit. Darüber hinaus wird verstärkt der gesellschaftliche Einfluss betrachtet, insbesondere die Entwicklung neuer Qualifizierungsformate im Bildungsbereich und die Förderung der Zusammenarbeit unterschiedlicher Bildungsakteure. Die Projektergebnisse werden in Workshops, auf Veranstaltungen und in Publikationen vermittelt, um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Regionen zu gewährleisten. Zusätzlich sollen daraus Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaft entwickelt werden.

1.2 Methoden und konzeptionelle Grundlage

Die Analysen und Schlussfolgerungen basieren auf einem breiten Methodenspektrum, das unter anderem eine Formulierung und Bewertung der Hemmnisfaktoren auf Basis der OECD-Hemmnisfaktoren für Innovationsaktivitäten, eine Literaturrecherche, eine Umfrage, punktuelle Datenerhebungen und Workshops umfasst. Zentral war dabei stets der Austausch mit den Modellregionen H2-Wandel und H2-GeNeSiS (Kapitel 1.1). Dieser wurde in der bisherigen Projektlaufzeit über unterschiedliche Formate realisiert. Auch die Erfahrungen anderer Modellregionen in Baden-Württemberg wurden punktuell aufgenommen und zur Validierung der Beobachtungen berücksichtigt.

Die OECD formuliert im Oslo Manual Richtlinien, wie Innovationsdaten gesammelt und interpretiert werden sollten. In diesem Rahmen werden Faktoren benannt, die auf Innovationsaktivitäten hemmend wirken können. Diese werden nach vier Dimensionen gegliedert: Kostenfaktoren, Wissensfaktoren, Marktfaktoren und institutionelle Faktoren, wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 1 dargestellt. Dieses Konzept wurde auf die Entstehung eines Innovationsökosystems übertragen, um Hemmnisfaktoren für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg zu formulieren. Die Hemmnisfaktoren wurden in einem internen Workshop der Begleitforschung formuliert und im Austausch mit den Modellregionen validiert. Dennoch ist das so entstehende Raster nicht frei von subjektiven Verzerrungen. Manche Hemmnisfaktoren sind möglicherweise deutlich breiter formuliert als andere, zudem lässt sich eine Überlappung zwischen verschiedenen Faktoren nicht ausschließen. Dies sollte insbesondere bei der Interpretation der Umfrageergebnisse berücksichtigt werden.

Abbildung 1: Hemmnisfaktoren für Innovationsaktivitäten



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (OECD/Eurostat 2018)

Im Rahmen des H2-Kolloquiums 2024 in Baden-Baden wurden die Teilnehmenden eingeladen, an einer Umfrage zur Bewertung der Hemmnisfaktoren teilzunehmen. Erfragt wurde dabei, für wie groß das Risiko gehalten wird, dass die genannten Faktoren den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg in den nächsten Jahren hemmen werden. Verwendet wurde dabei die Bewertung der einzelnen Hemmnisfaktoren auf der Skala: kein Risiko, geringes Risiko, mittleres Risiko, hohes Risiko. Außerdem wurden die Teilnehmenden gebeten, die Akteure (Politik, Wissenschaft, Wirtschaft) zu priorisieren, die ihrer Ansicht nach die jeweiligen Hemmnisfaktoren (nach den vier Dimensionen) angehen oder abbauen sollten („Wer sollte nun handeln?“). Insgesamt haben

75 Personen an der Umfrage teilgenommen. Aufgrund der Ausrichtung des H2-Kolloquiums ist davon auszugehen, dass die meisten Teilnehmenden einen Bezug zu dem Wasserstoffökosystem in Baden-Württemberg haben. Ein Großteil der Teilnehmenden ordnet sich der Industrie oder der Wissenschaft zu. Die Teilnehmenden verteilen sich gleichermaßen auf den Bereich der Wasserstoffbereitstellung und der Wasserstoffnutzung, wobei ein Großteil der Akteure im Bereich der Technologieentwicklung tätig ist. Eine vollständige Übersicht der Selbstzuordnung, wobei Mehrfachnennungen möglich waren, ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Freiheiten in der Wahl und Abgrenzung der Hemmnisfaktoren führen auch bei der Umfrage zu Interpretationsgrenzen, die berücksichtigt werden sollten. So können einige Faktoren besonders hohe Bewertungen erhalten, weil sie allgemein formuliert sind, während andere im Vergleich dazu sich auf eine kleine und konkreter abgegrenzte Hürde beziehen. Auch Überschneidungen oder Dopplungen in den gewählten Hemmnisbeschreibungen können die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschweren. Dennoch bietet die Umfrage einen wertvollen Überblick über die wahrgenommenen Herausforderungen, auch wenn kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht. Anfang 2025 wurden die Umfrageergebnisse mit ausgewählten Modellregionen in Baden-Württemberg diskutiert, um zu überprüfen, inwiefern sich die Wahrnehmung der Hemmnisse über die Zeit verändert hat. Die Erkenntnisse aus diesen Gesprächen sind in die Bewertung der Hemmnisfaktoren in Kapitel 2 eingeflossen.

Tabelle 1: Umfrageteilnehmende nach eigener Zuordnung

Mehrfachoptionen entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff waren möglich (daher entspricht „Gesamt“ nicht der Summe der Einzeleinträge). Insgesamt gab es 75 Umfrageteilnehmende.

	Politik und Verwaltung	Industrie	Kommunale Unternehmen	Wissenschaft	Andere Einordnung
Bereitstellung von Wasserstoff	0	10	2	4	1
Nutzung von Wasserstoff	0	11	2	4	1
Technologieentwicklung Wasserstoff-erzeugung (z. B. Elektrolyse, ...)	0	14	1	8	3
Technologieentwicklung Wasserstoff-nutzung (z. B. Brennstoffzellen, ...)	0	20	0	8	2
Weitere Aktivitäten im Wasserstoff-bereich	10	7	0	7	4
Gesamt	10	36	3	20	6

Quelle: Eigene Abfrage

Beim Projekt-Kickoff im Mai 2022 fand eine erste Workshop-Runde mit den Modellregionen statt, in der offen und umfassend Herausforderungen und Hindernisse gesammelt wurden, die die Modellregionen beschäftigen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die Hemmnisfaktoren gemäß der zuvor beschriebenen Methodik abgeleitet. Auf dem Konsortialtreffen im Juli wurden mögliche Entwicklungsszenarien nach Sektoren diskutiert, um eine Diskussion anzustoßen, die

wiederum als Input für die Hemmnisfaktoren Verwendung fand. Beim Konsortialtreffen im Oktober 2024 schließlich wurde ein Workshop durchgeführt, in dem die Hemmnisfaktoren konkret besprochen, Erfahrungen aus den Modellregionen eingeordnet sowie potenzielle Handlungsspielräume und Abhängigkeiten herausgearbeitet wurden. Die drei Workshops bilden den Rahmen, innerhalb dessen die Analyse durchgeführt wurde, die in diesem White Paper präsentiert wird. Ergänzend wurden die Erfahrungen der Modellregionen mit Preissteigerungen diskutiert. Dabei wurden Zahlen zu den konkreten Preissteigerungen zwischen den erwarteten Werten zum Zeitpunkt der Projektskizze und den tatsächlichen Angeboten aus der Region H2-Wandel von Prof. Thorsten Zenner aus der Hochschule Reutlingen gesammelt und zur Verfügung gestellt und um die Erfahrungen aus der Modellregion H2 GeNeSiS ergänzt.

Die Analysen wurden durch begleitende Literaturrecherchen zu Hemmnissen, Preis-, Technologie- und Marktentwicklungen sowie durch Erfahrungsberichte verschiedener Akteure der Wasserstoffwirtschaft ergänzt.

Zudem erfolgten eine Sichtung und Einordnung bestehender Handlungsempfehlungen relevanter Akteure. In dieser Analyse wurden Anregungen und Forderungen, die in Gesprächen mit Akteuren der Modellregionen gefallen sind, berücksichtigt. Auf Grundlage der umfassenden Analysen, Diskussionen und Workshops entwickelte das Projektteam eigene Handlungsempfehlungen, die den Abschluss dieses White Papers bilden.

2 Empirische Ergebnisse: Hemmnisfaktoren

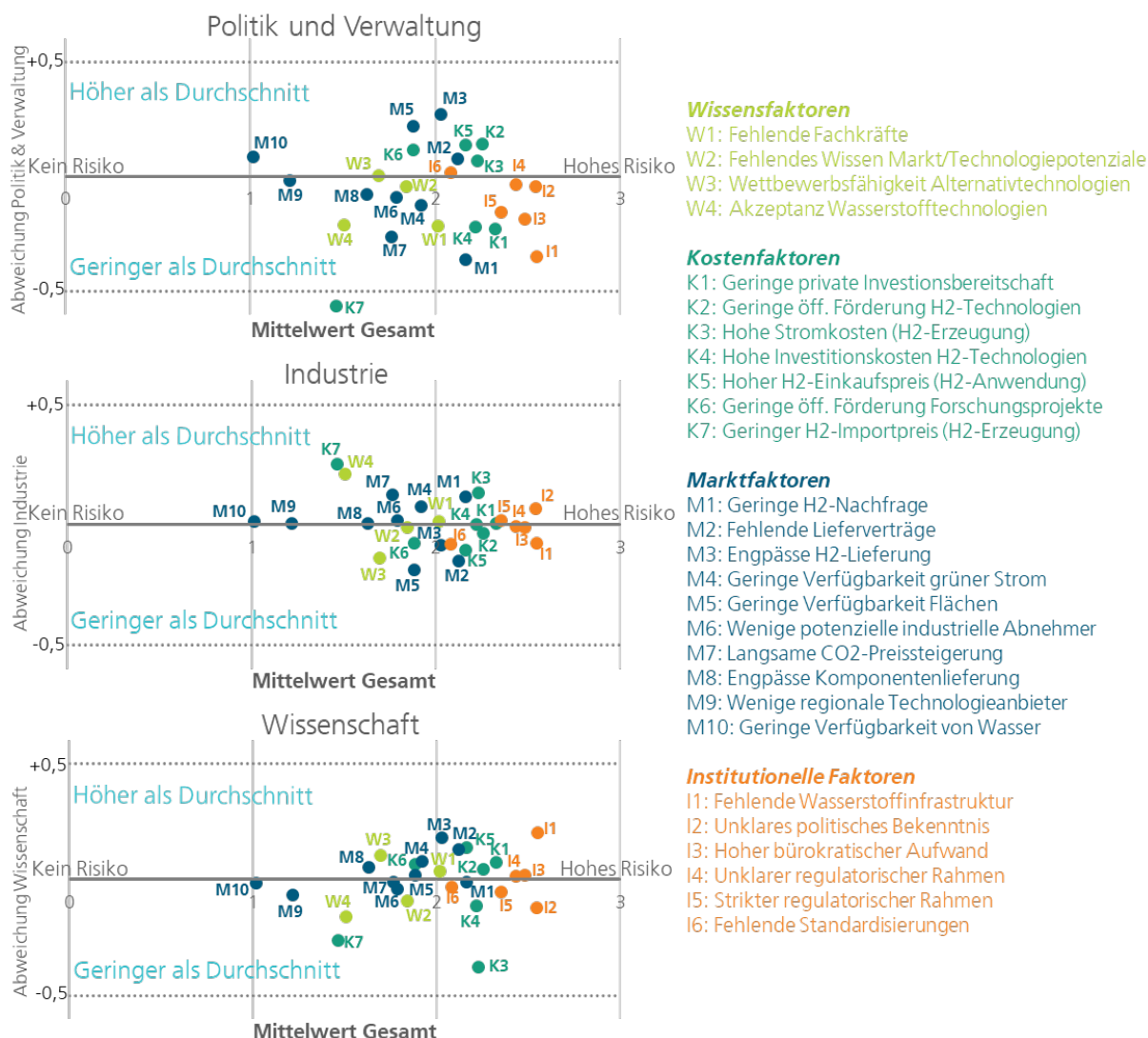
Der auf Modellregionen basierende Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist grundsätzlich ein vielschichtiges und aufwändiges Unterfangen, da es sich über vielerlei Sektoren, Technologien und Akteure erstreckt. Dabei ist dieser Aufbau nicht zuallererst von kurzfristiger Wirtschaftlichkeit getrieben, sondern soll neben den wirtschaftlichen auch ökologische, technologische und soziale Potenziale für die Zukunft sichern.

Dementsprechend vielfältig sind auch die Hemmnisse, Herausforderungen und Hürden, die diesem Aufbau entgegenstehen. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Hemmnisfaktoren benannt und ihre jeweilige Relevanz diskutiert. Diese wahrgenommene Relevanz setzt sich einerseits aus einer erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeit (wie wahrscheinlich ist, dass dieser Faktor tatsächlich hemmend wirkt) und andererseits dem potenziellen Schaden (was passiert, wenn dieser Faktor tatsächlich hemmend wirkt) zusammen. Dabei wurde nicht unterschieden, ob die Faktoren aktuell zum Tragen kommen und beispielsweise Entscheidungen oder Prozesse negativ beeinflusst haben, oder aber für die Zukunft als Risiko wahrgenommen werden. Eine derartige Differenzierung ist aufgrund der schwer einzuordnenden Einflüsse, die zukünftig erwartetes Risiko auf heutige Entscheidungen bereits haben kann, nicht seriös möglich.

Die Hemmnisfaktoren werden entlang der vier Dimensionen Wissen, Kosten, Markt und Institutionelle Faktoren diskutiert. Diese Unterteilung hat sich in vielen vergangenen Forschungsaktivitäten als sinnvoll erwiesen.

Grundsätzlich können sich die Auswirkungen einzelner Hemmnisfaktoren je nach Akteur entlang der Wertschöpfungskette unterschiedlich ausprägen. So kann beispielsweise ein geringer Wasserstoff-Importpreis die Nutzung von Wasserstoff-Anwendungen fördern, während dadurch zugleich aufgrund der entstehenden Wettbewerbssituation die heimische Erzeugung gehemmt werden könnte. Aus diesem und anderen Gründen werden die Herausforderungen von den unterschiedlichen Akteuren im Innovationsökosystem – in unserer Analyse unterteilt nach Industrie, Wissenschaft, Politik – oft als unterschiedlich relevant erachtet. Diese Beobachtungen werden im Folgenden diskutiert.

Abbildung 2: Einschätzung des Risikos der Hemmnisfaktoren über alle Akteursgruppen (x-Achse) und Abweichung der spezifischen Akteursgruppe (y-Achse)



Quelle: Eigene Darstellung

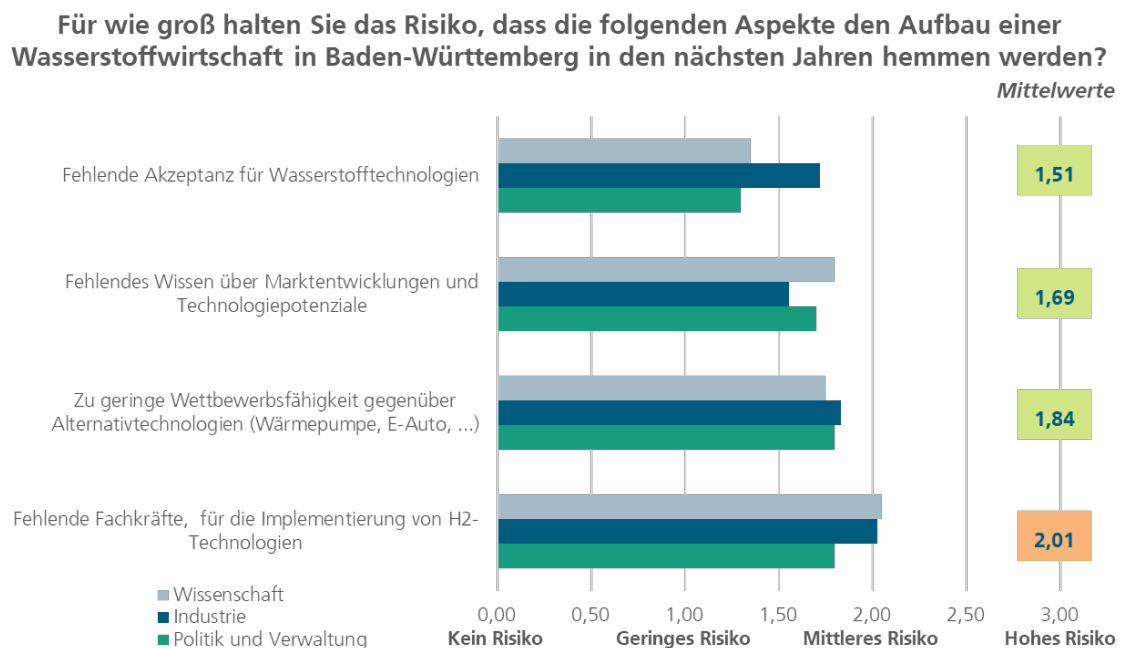
In Abbildung 2 ist eine Übersicht aller Hemmnisfaktoren nach ihrer Relevanz dargestellt. Die Einschätzung der Akteursgruppen weicht dabei nur in einem geringen Maßstab voneinander ab. Eine detaillierte Einschätzung der Relevanz der Hemmnisfaktoren wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

2.1 Wissensfaktoren

Im Innovationsprozess sind Wissensfaktoren zentrale Komponenten. Wissen umfasst das Verständnis von Informationen sowie die Fähigkeit, diese zielgerichtet für verschiedene Zwecke einzusetzen (OECD/Eurostat 2018). Die Generierung, Verbreitung und Nutzung von Wissen erfolgt durch ein Zusammenspiel verschiedener Akteure wie Unternehmen, Universitäten und öffentliche Forschungseinrichtungen. Kollaborationen und Netzwerke zwischen diesen Akteuren sind daher von besonderer Bedeutung, um Synergien zu schaffen und Innovationspotenziale zu heben. Die Effektivität des Austauschs hängt entscheidend von der Gestaltung kollaborativer Strukturen und Netzwerke ab, die das Teilen und Kombinieren von Wissen fördern. Wissen als potenzielle Hemmnisdimension für den Aufbau eines regionalen Wasserstoffökosystems wurde im Rahmen der

Begleitforschung untersucht. Im Rahmen der Umfrage (Kapitel 1.2) wurden zentrale Aspekte identifiziert, die das Innovationsgeschehen und die Marktdurchdringung von Wasserstofftechnologien beeinflussen können. Entsprechend der konzeptionellen Grundlage wurde die Dimension breit gedacht und umfasst daher auch technologische Limitierungen, bzw. eine mögliche fehlende Wettbewerbsfähigkeit der jeweiligen Wasserstofftechnologien, sowie Aspekte der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Abbildung 3: Eingeschätzte Relevanz der Hemmnisfaktoren in der Dimension Wissen



Quelle: Eigene Darstellung

W1: Fehlende Fachkräfte für die Implementierung von Wasserstofftechnologien

Sowohl der technische Umgang mit Wasserstoff als auch die Bewältigung regulatorischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Fragestellungen des entstehenden Wasserstoffmarkts erfordern spezifische Expertise. Der derzeitige generelle Fachkräftemangel (Müller 2025), insbesondere in technischen Berufen, birgt somit ein Risiko für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems. Sollte es nicht gelingen, ausreichend qualifizierte Fachkräfte zu gewinnen, könnte dies die Entwicklung und Implementierung von Wasserstofftechnologien erheblich verzögern (Stahlecker et al. 2025). Aktuell fehlen bereits 49.500 qualifizierte Fachkräfte in den für die Wasserstoffwirtschaft relevanten Branchen und 8.177 angebotene Ausbildungsstellen blieben in wasserstoffrelevanten Berufen zuletzt unbesetzt (Risius et al. 2025).

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen jedoch, dass der Fachkräftemangel vor Ort bislang zwar als wichtigster Hemmnisfaktor der Dimension Wissen, aber nicht als vorrangig limitierender Faktor wahrgenommen wird. Während Wissenschaft und Industrie den Mangel an Fachkräften als größeres Hemmnis einstufen, sehen Politik und Verwaltung hier weniger dringenden Handlungsbedarf.

W2: Zu geringe Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Alternativtechnologien

Wasserstofftechnologien können eine ökonomisch tragfähige Alternative zu fossilen Energieträgern darstellen, insbesondere da ihr Markthochlauf durch gezielte politische Maßnahmen wie Einführung eines europäischen CO₂-Preises oder des CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism) aktiv unterstützt wird. Dennoch bestehen im Vergleich zu anderen

Technologien für vergleichbare Anwendungsfälle weiterhin Nachteile hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Kostenstruktur, etwa beim Brennwert gegenüber Erdgas oder beim Wirkungsgrad im Vergleich zu Direktelektrifizierungslösungen wie Wärmepumpen (Doucet et al. 2023) oder batterieelektrischen Fahrzeugen (Specht und Fabianek 2022). Es gibt aber auch Industriebereiche in denen Wasserstoff als einzig sinnvoller technischer Lösungsansatz zur Emissionsminderung gilt. Die Befragung zeigt, dass das Risiko, dass diese Wettbewerbssituation sich negativ auf den Wasserstoffhochlauf auswirkt, von relevanten Akteuren als ein mittleres Hemmnis eingeschätzt wird.

W3: Fehlendes Wissen über Marktentwicklungen und Technologiepotenziale

Unsicherheiten bezüglich der Marktentwicklung und des Technologiepotenzials von Wasserstoff können den Aufbau eines Wasserstoffökosystems hemmen. Die gegenseitige Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage (Schulte et al. 2021) und gleichzeitige Informationsasymmetrien zwischen den Stakeholdern stellen ein grundlegendes Problem bei der Einschätzung der Marktentwicklung dar (acatech und DECHEMA 2023). Zudem kann die Entscheidungsfindung für Investoren und Anwender aufgrund der Unklarheiten bezüglich der Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Skalierbarkeit neuer Technologien erschwert werden (Gilles und Przezicka 2022). Der Zugang zu aktuellen und relevanten Informationen ist daher essenziell. Die Erfahrungen der Akteure zeigen, dass fehlendes Wissen über Marktentwicklungen eine moderate Rolle spielt und im Vergleich zu anderen Hemmnissen als weniger gravierend bewertet wird.

W4: Fehlende Akzeptanz für Wasserstofftechnologien

Ein weiterer potenzieller Hemmnisfaktor ist die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstofftechnologien. Fehlende Akzeptanz kann Innovationsaktivitäten behindern, wie Erfahrungen bspw. aus dem Netzausbau zeigen (Neukirch 2016), bei denen Proteste und Bürgerbegehren Projekte verzögert haben. Im Bereich Wasserstoff zeichnen sich aktuell jedoch noch keine vergleichbaren Akzeptanzprobleme ab. Generell ist grüner Wasserstoff deutschlandweit beliebt und erzielt häufig höhere Akzeptanzwerte als andere erneuerbare Energietechnologien. Die Marktakzeptanz in der Bevölkerung, das heißt die Bereitschaft, als Endkunde wasserstoffbasierte Produkte zu kaufen, ist aber deutlich niedriger, da es kaum eine Bereitschaft gibt, Mehrkosten gegenüber herkömmlichen oder elektrifizierten Lösungen zu zahlen (Lohmann und Caspari 2023). Im Rahmen von H2-Companion wird zusätzlich seit 2023 eine Längsschnitturnfrage in der Allgemeinbevölkerung der Modellregionen durchgeführt (N = 166). Die Anwendung von Wasserstoff ist dabei allgemein beliebt und die spezifischen Wasserstoffprojekte, die in den Modellregionen „vor der eigenen Haustür“ umgesetzt werden sollen, ebenso (≥ 75 % Zustimmung). Grüner Wasserstoff wird insbesondere deshalb gut angenommen, weil er zum Klimaschutz beiträgt.

Neben gesellschaftlicher Akzeptanz spielen auch Aspekte der Marktakzeptanz bei den verschiedenen Stakeholdern entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette potenziell eine Rolle. Die Befragungsergebnisse aus dem H2-Kolloquium zeigen, dass Akzeptanz derzeit als Hemmnisfaktor mit geringerer Relevanz wahrgenommen wird. In der Industrie besteht eine größere Sorge als bei Wissenschaft, Politik und Verwaltung.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Wissensfaktoren zwar potenzielle Hemmnisse für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg darstellen, sie insgesamt aber als geringer eingeschätzt werden als andere Komponenten im Innovationssystem. Die Bedeutung je nach Akteursgruppe und Aspekt variiert insgesamt nur gering. Während der Fachkräftemangel als Herausforderung gesehen wird, werden die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Alternativtechnologien, fehlendes Wissen über Marktentwicklungen und die gesellschaftliche Akzeptanz aktuell weniger

kritisch eingeschätzt. Die gezielte Förderung von Wissensaustausch, Qualifizierung und Vernetzung bleibt daher ein zentraler Hebel für die erfolgreiche Entwicklung eines regionalen Wasserstoffökosystems.

2.1.1 Erfahrungen der Modellregionen

In den Modellregionen werden Hemmnisse aus der Dimension „Wissen“ vielfach bereits direkt wahrgenommen und proaktiv adressiert, auch wenn unklar bleibt, ob daraus bereits konkrete Einschränkungen für die Aktivitäten der Regionen resultieren.

Akteure aus den Modellregionen berichten, dass die Bemühungen, Weiterbildungsangebote bereitzustellen, derzeit zumindest teilweise auf eine vergleichsweise geringe Nachfrage stoßen. Diese Beobachtung steht im Spannungsverhältnis zu den Ergebnissen der Umfrage, die aus Sicht der Industrie ein relevantes Risiko eines Fachkräftemangels im Wasserstoffbereich aufzeigt, während die bestehenden Fort- und Weiterbildungsangebote von den Modellregionen nur begrenzt genutzt werden. Insbesondere in größeren Unternehmen der Regionen gibt es bereits eine nennenswerte Anzahl an Mitarbeitenden, die sich mit Wasserstofftechnologien und deren Anwendung beschäftigen. Da entsprechende Schulungen stets mit Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind, gehen die Modellregionen davon aus, dass Unternehmen diese Angebote erst dann verstärkt in Anspruch nehmen, wenn klar absehbar ist, welche Kompetenzen in welchem Umfang benötigt werden. Diese Einschätzung wurde auch von weiteren Modellregionen in Baden-Württemberg bestätigt, die derzeit keinen abzeichnenden Fachkräftebedarf verzeichnen. Bisher beobachten die Modellregionen keinen grundlegenden Bedarf an neuen Berufsbildern, sondern eher an Fort- und Weiterbildungen, deren Bedarf aber größtenteils bereits durch die existierenden Angebote und den Austausch zwischen den Akteuren gedeckt ist (Stahlecker et al. 2025). Aus den Modellregionen wurde zudem berichtet, dass viele Akteure die Marktentwicklung nur schwer einschätzen können, was die Bewertung von Geschäftsmodellen erheblich erschwert. Informationen zu tatsächlichen Bedarfen sind meist nur in direkten Gesprächen zu gewinnen, da eine belastbare und ausreichend granulare, öffentlich zugängliche Datenbasis fehlt.

Schließlich wird aus den Modellregionen auch berichtet, dass der Mehrwert einer lokalen Wasserstoffproduktion in Baden-Württemberg von relevanten Entscheidungsträger:innen häufig nicht erkannt wird. Dementsprechend erhalten Strategien zum Wasserstoffimport oft mehr Aufmerksamkeit. Dies könnte möglicherweise auf unzureichendes Wissen über die Potenziale der lokalen Produktion und die damit verbundenen Marktentwicklungen zurückzuführen sein.

2.1.2 Abhängigkeiten und Handlungsspielräume

Um die Herausforderungen in der Dimension „Wissen“ zu bewältigen, bieten sich den verschiedenen Akteuren in den Modellregionen vielfältige Handlungsspielräume. Dazu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Bildungsangeboten (Stahlecker et al. 2025) für unterschiedliche Zielgruppen sowie die Initiierung von Dialogformaten mit der Bevölkerung, etwa durch Veranstaltungen und Bürgerbeteiligungsformate. Darüber hinaus können Marktinformationen erhoben oder Marktstudien in Auftrag gegeben werden, um bessere Entscheidungsgrundlagen zu schaffen. Die technische Leistungsfähigkeit und damit einhergehende Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstofftechnologien liegen zwar meist nur begrenzt im Einflussbereich regionaler Akteure. Dennoch gibt es in Baden-Württemberg und den begleiteten Modellregionen bereits Unternehmen mit internationaler Ausstrahlung, die auf dem Weg der Technologieentwicklung gezielt unterstützt werden können.

Gleichzeitig bestehen viele Abhängigkeiten von Aktivitäten auf nationaler, europäischer und globaler Ebene sowie von Entwicklungen, die kaum steuerbar sind, etwa das Auftreten und die

Verbreitung möglicher negativer Informationen (z. B. Ereignisse, Falschnachrichten), die von Medien breit rezipiert werden könnten und die Akzeptanz von Wasserstofftechnologien nachhaltig beeinträchtigen würden. Besonders hervorzuheben ist der technologische Wettbewerb mit alternativen Ansätzen, wie etwa der direkten Elektrifizierung durch batterieelektrische Mobilität oder Wärmepumpen, der erhebliche Unsicherheiten bei den Erwartungen und der Bewertung der Potenziale von Wasserstofftechnologien erzeugt.

Während in vielen Bereichen die Skepsis gegenüber Wasserstoff wächst, gelten die Technologien in anderen weiterhin als unverzichtbar, wenn es um klimaneutrale Prozesse geht. Die Debatten werden zunehmend kontrovers, sodass es mitunter schwerfällt, tatsächlich unabhängige und technologie-neutrale Perspektiven zu identifizieren.

Eine Übersicht über die wichtigsten externen Abhängigkeiten und vorhandenen Handlungsspielräume findet sich in Tabelle 2. Die begleiteten Modellregionen sind bereits in vielen dieser Handlungsspielräume aktiv, beispielsweise durch Bildungsangebote (z. B. H2-ToKnow), Veranstaltungen (z. B. Informationsabende für Bürger und Bürgerinnen) sowie weitere Formate (z. B. Wasserstofflotsen) (Stahlecker et al. 2025).

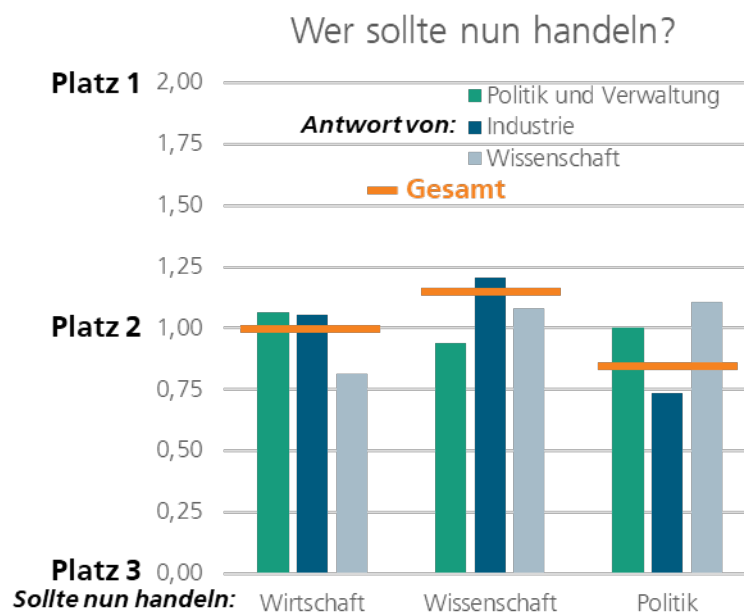
Tabelle 2: Abhängigkeiten und Handlungsspielräume in der Dimension Wissen

	Externe Abhängigkeit (z. B. zu Akteur oder Gegebenheit)	Kann die Modellregion beeinflussen durch... / Kann in den Regionen beeinflusst werden durch...
Bildungsangebote	• Studiengänge/Angebote außerhalb der Modellregionen • Standardisiertes/zertifizierbares Bildungsangebot • Arbeitsmarkt	• Eigene Bildungsangebote
Marktinformationen	• Für Abfragen im großen Stil möglicherweise unzureichender Zugang zu Informationen	• Kann selbst in Auftrag gegeben werden. Wird z. T. in Begleitforschung betrachtet • Ggf. Beispiele?
Akzeptanz	• Unsicherheit – medial geprägt oder durch Events	• Veranstaltungen, Bürgerbeteiligung, frühzeitige und transparente Dialoge anstoßen
Wettbewerbsfähigkeit von H2-Technologien	• Entwicklung von Batterie/BEV/Wärmepumpe/H2-Technologien/...	• Entwicklungen durch H2-Technologie-Anbieter (aber nur begrenzter Einfluss auf internationale Technologieentwicklung)

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Interviews, Workshops, Diskussionen und Literatur

Die Umfrageergebnisse zeigen in der Dimension „Wissen“ das uneindeutigste Bild bezüglich der Frage, welche Akteursgruppen – ob Wissenschaft, Politik oder Industrie – am ehesten für den Abbau der entsprechenden Hemmnisfaktoren verantwortlich handeln sollten. Mit nur geringen und begrenzt signifikanten Unterschieden wurde die Wissenschaft leicht vor der Wirtschaft und anschließend der Politik eingestuft.

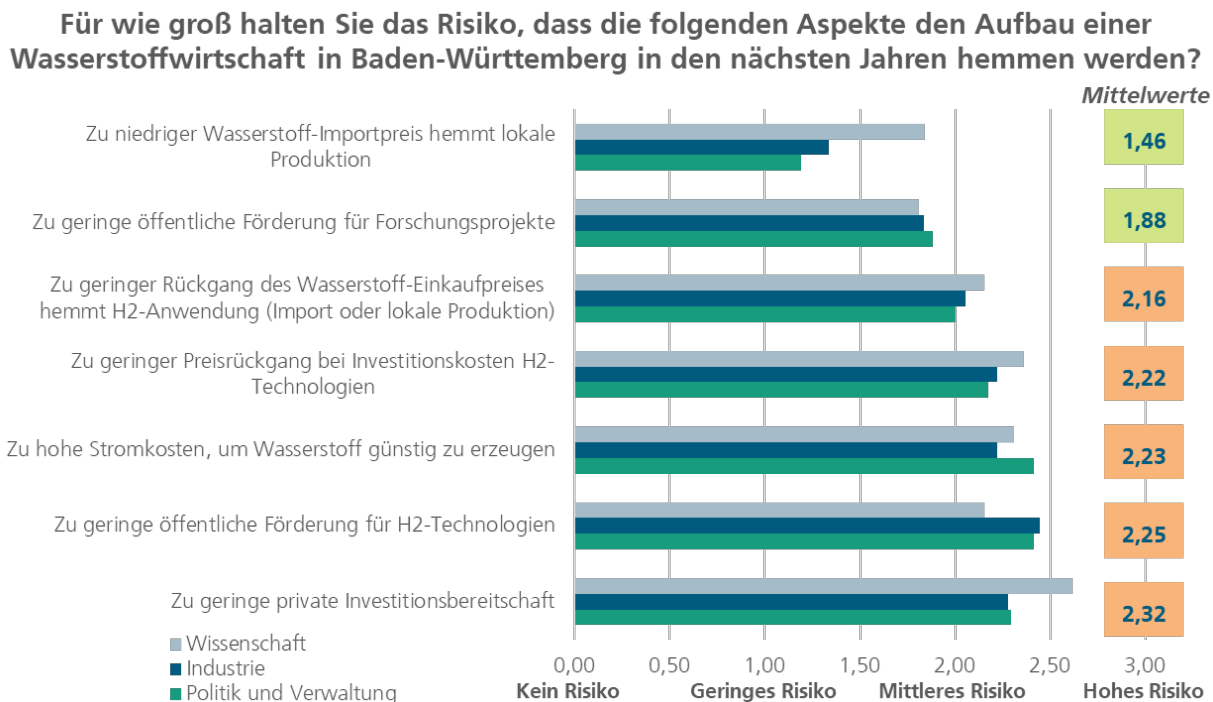
Abbildung 4: Einordnung, welche Akteure nun in der Verantwortung stehen, um die Hemmnisse der Dimension Wissen abzubauen (gemittelte Platzierung)



Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Kostenfaktoren

Die Entwicklung und Implementierung von transformativen Innovationen hängen typischerweise mit signifikanten wirtschaftlichen Kosten zusammen. In der Kommerzialisierungsphase wird die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Unterfangens allerdings zunehmend relevanter. Hohe Kosten können also das Roll-Out neuer technologischer Lösungen hemmen und in Fällen, in denen ein wirtschaftlicher Betrieb auch langfristig nicht absehbar ist, gänzlich verhindern. Kosten werden dabei nicht nur für Investitionen in neue Technologien fällig, sondern auch in den Forschungs- und Entwicklungsleistungen, sowie den benötigten Materialien und Ressourcen für die Produktion und den Betrieb der Technologien (Personal, Ausgangsmaterialien, Energiekosten, ...).

Abbildung 5: Eingeschätzte Relevanz der Hemmnisfaktoren in der Dimension Kosten

Quelle: Eigene Darstellung

K1: Zu geringe private Investitionsbereitschaft

Investitionen aus der Industrie sind für die Entstehung eines Marktes und zur Förderung von Technologienentwicklungen und Implementieren von Lösungen von elementarer Bedeutung (Büttner et al. 2015). Dieser private Investitionsanteil bleibt aktuell unter Potenzial und könnte auch künftig einen Engpass im Aufbau der deutschen Wasserstoffwirtschaft darstellen (Wietschel et al. 2024). Die Befragung zeigt, dass abgesehen von institutionellen Faktoren die mangelnde Investitionsbereitschaft als größter hemmender Faktor gesehen wird. Industrieunternehmen zögern bei der massiven Vorleistung aufgrund bestehender Unsicherheiten durch nicht planbare Rahmenbedingungen.

Einerseits werden private Investitionen für die Forschung und Entwicklungen von innovativen Technologien benötigt, um einen Pfad von Innovationen in die Kommerzialisierung zu ermöglichen. Die Investitionssummen in Forschung- und Entwicklung variieren für Unternehmen stark branchenabhängig, liegen aber typischerweise im unteren einstelligen Prozentbereich des Umsatzes, wobei forschungsintensive Unternehmen durchaus Werte um die 10 % erreichen können (EY 2023). An diesen Größenordnungen müssen sich auch die Investitionen in Wasserstofftechnologien messen lassen.

Andererseits sind Investitionen in Infrastruktur, Technologieimplementierung und Umrüstungen bei Unternehmen notwendig. In Deutschland gibt es bereits einige Beispiele für derartige Hebeleffekte, die durch öffentliche Mittel erzeugt wurden. So beteiligt sich EnBW mit 1 Milliarde Euro am Ausbau des Wasserstoff-Kernnetzes in Deutschland. Produktionsstätten für Brennstoffzellen entstehen durch Investitionen beispielsweise bei Cellcentric und EKPO, während Bosch in unterschiedliche Wasserstofftechnologien investiert (Baden-Württemberg 2022; EnBW Investoren 2024; cellcentric 2024). Hierbei lassen sich allerdings auch zunehmend Unsicherheiten beobachten, wie beispielsweise das Aufschieben des Aufbaus der Brennstoffzellfabrik von Cellcentric (Werwitzke 2025).

Die Investitionen von privater Seite liegen in Deutschland im europäischen Vergleich meist leicht unterdurchschnittlich. Neben einer unternehmenseigenen Bewertung der Investitionen nach Risiko und Erfolgsversprechen, können auch andere Aspekte Investitionsentscheidungen beeinflussen, wie öffentliche Förderung (z. B. IPCEI) (Büttner et al. 2015). Zuletzt haben sich in Deutschland allerdings viele Beispiele gezeigt, in denen private Investitionen trotz substantieller öffentlicher Förderung verschoben, in Frage gestellt, vollständig zurückgezogen wurden oder während der Umsetzungsphase nicht erfolgreich verlaufen sind: Northvolt in Heide (NDR Info 2025), Intel in Magdeburg (MDR Sachsen-Anhalt 2025) und für die Verwendung von grünen Wasserstoff in der Stahlproduktion bei ArcelorMittal (Tagesschau 2025) oder Thyssen Krupp (Bös 2025). Die Gründe hierfür sind vielfältig und können unklare wirtschaftliche Perspektiven, regulatorische Unsicherheiten, fehlende oder nicht ausreichend passfähige Infrastruktur, Marktfragmentierung und internationale Konkurrenz umfassen. Trotz erheblicher öffentlicher Förderung wurden die wirtschaftlichen Risiken sowohl allgemein (Passow 2025) als auch spezifisch in der Wasserstoffwirtschaft (Stratmann 2025) ursprünglich unzureichend eingeschätzt. Die entsprechenden Möglichkeiten, derartige Hebeleffekte zu erzielen, werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

K2: Zu geringe öffentliche Förderung für H2-Technologien

Neue Technologien bringen ein hohes initiales Risiko mit sich, da gerade zu Beginn hohe Investitionen notwendig sind, um eine Technologieentwicklung und die Entstehung eines Marktes zu ermöglichen. Diese Investitionen sind risikobehaftet, da keine Planungssicherheiten bestehen und mit großen Unsicherheiten verbundene wirtschaftliche Bewertungen durchzuführen sind. Die öffentliche Hand kann hierbei mit Förderungen Anreize setzen, Investitionsentscheidungen herbeizuführen. Unsere Umfrage ergab, dass der Faktor der zu geringen öffentlichen Förderungen für Wasserstofftechnologien als nur ein leicht geringeres Risiko auf die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft erachtet wird als der Faktor der zu geringen privaten Investitionsbereitschaft. Wie staatliche Fördermittel Einfluss nehmen können, lässt sich am Beispiel des Umweltbonus für E-Autos darstellen. Für einen Großteil der Kunden (über 70 % im Jahr 2023) hatte die Förderung einen mittleren bis hohen Einfluss auf die Kaufentscheidung (Rao et al. 2024). Andererseits können Förderprogramme für alternative Technologien (fossil, elektrisch, ...) auch auf die Kommerzialisierung von Wasserstoffinnovationen hemmend wirken.

Baden-Württemberg beispielweise fördert in Modellregionen die Erprobung neuer Ansätze und Lösungen mit dem Ziel, die Ergebnisse auf andere Regionen zu übertragen. Für die Förderung der Modellregionen werden insgesamt 47 Millionen Euro aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) der Europäischen Union grüner Wasserstoff sowie aus Landesmitteln bereitgestellt. Auch auf nationaler Ebene werden solche Fördermodelle umgesetzt. Beispiele hierfür sind die Modellregion Norddeutschland als Verbund mit der norddeutschen Wasserstoffstrategie und mehreren Wasserstoffhubs, die Windstrom nutzen oder die grüne Wasserstoffregion HyBayern, in der ein geschlossener Kreislauf entlang der Wertschöpfungskette erzeugt wird.

In den bisherigen Important Projects of Common European Interest (IPCEIs) im Wasserstoffbereich entspricht der Umfang der öffentlichen Förderung in etwas dem Volumen der privaten Investitionen, die in die Projekte fließen (4,6 Mrd. € öffentliche Förderung bei 3,3 Mrd. € privaten Investitionen) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2024). IPCEIs in anderen Technologiebereichen oder vergleichbaren Förderaktivitäten haben in der Vergangenheit mitunter auch deutlich größere Hebeleffekte erzielt (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023).

K3: Zu hohe Stromkosten, um Wasserstoff günstig zu erzeugen

Für den wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseuren sind die Stromkosten zur Erzeugung von grünem oder kohlenstoffarmem Wasserstoff einer der relevantesten Aspekte. Eine Vorhersage von

künftigen Entwicklungen für Strompreise ist mit hohen Unsicherheiten versehen. So rechnen viele Studien aufgrund der Transformation des Energiesystems mit steigenden Strompreisen in Deutschland, so auch die Abschätzung des Bundeswirtschaftsministerium 2023, das mit einer leichten Strompreissteigerung auf Endkundenpreise im Bereich von 40 ct/kWh (Normaltarif, Nominalpreise) in 2042 rechnet (Deutscher Bundestag 2023). Dennoch gibt es auch Studien, die bei einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien fallende Stromkosten prognostizieren, der für verschiedene Kundengruppen in 2045 auf unter 25 ct/kWh (inflationsbereinigt – Vergleichsjahr 2020) fallen könnte (Luderer et al. 2025).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Strompreise und -preiskomponenten vielfältig sind und je nach Kundengruppe gestaffelt sind. Hinzu kommen politische Ambitionen, den Strompreis gering zu halten – so hat in der Vergangenheit beispielsweise die Festlegung eines (geringen) Industriestrompreises politisch und medial für Aufmerksamkeit gesorgt (CDU, CSU, SPD 2025).

Das Netzentgelt ist für viele Kundengruppen eine relevante Kostenkomponente und beläuft sich auf aktuell um die 10 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2024). Elektrolyseure, die bis Ende 2029 in Betrieb genommen werden, sind nach aktuellem Stand von Netzentgelten bis zu einem Zeitraum von zwanzig Jahren befreit (Deutscher Bundestag). Ob die Netzentgeltbefreiung für Elektrolyseure zeitlich erweitert und gar entfristet wird, ist aktuell nicht abzusehen, wird aber von einigen Akteuren gefordert (EWE AG 2024; Lassen et al. 2025). Weitere Auswirkungen, die regulatorische Rahmenbedingungen auf die Strompreise haben können, werden in Kapitel 2.4 diskutiert.

Stromkosten wirken sich natürlich auch wechselseitig auf alternative Technologien aus, mit denen Wasserstofftechnologien im Wettbewerb stehen. So wirken sich Stromkosten aufgrund der geringeren Gesamteffizienz (Umwandlung Strom in Wasserstoff, Rückumwandlung Wasserstoff in Strom) meist höher auf Wasserstoffanwendungen aus als auf direktelektrifizierbare Alternativen. Allerdings kann ein Elektrolyseur prinzipiell flexibel auf aktuelle Strompreise reagieren, was gegenüber einigen Anwendungsfällen einen Vorteil bieten kann. Hohe Stromkosten gelten als potenziell stark hemmende Einflussfaktoren auf die entstehende Wasserstoffwirtschaft.

K4: Zu geringer Preistrückgang bei Investitionskosten von H2-Technologien

Neue Technologien haben typischerweise hohe Initialkosten, da noch keine Skalierung stattfinden konnte. Es fehlen noch hohe Stückzahlen über Abnahmemengen im Einkauf, um Preiseffekte wirksam werden zu lassen. Auch sind Fertigungsprozesse noch nicht ausgereift, um beispielsweise über geringe Taktzeiten oder Personaleinsatz die Stückkosten zu reduzieren. Weiterhin müssen anfänglich teilweise hohe Entwicklungskosten umgelegt werden, was die Stückkosten signifikant beeinflusst. Typischerweise wird bei einer Verdopplung der kumulierten Menge der produzierten Einheiten ein Kostenrückgang um 20-30 % erwartet (Sabel und Weiser 2008). Gerade in den ersten Jahren sind die Effekte entsprechend groß. In unserer Umfrage wird bei den Wasserstofftechnologien ein zu geringer Preistrückgang bei Investitionskosten mit einem mittleren Risiko bewertet. Tatsächlich finden teilweise sogar große Kostensteigerungen statt (siehe Kapitel 2.2.1). Die Gesamtentwicklung der Kosten für Wasserstoff ist derzeit noch unklar, bzw. wird – wie im folgenden Abschnitt diskutiert – stark unterschiedlich bewertet.

K5: Zu geringer Rückgang des Wasserstoff-Einkaufspreises (bezogen auf Anwendungen von Wasserstoff)

Die Preis- und Kostenerwartungen für Wasserstoff sind, wie die Kostenentwicklungen bei H2-Technologien und Stromkosten auch, mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Zahlen, die von vielen Akteuren abgeschätzt oder verbreitet werden, zeigen eine bemerkenswerte Spannweite auf, die sich teilweise durch die Kopplung an unterschiedliche Stromerzeugungsmethoden oder zugrunde gelegte Importwege erklären und einordnen lassen (z. B. Carels et al. 2023; Merten und Scholz

2023). Entsprechend sind die berücksichtigten Kostenkomponenten (Stromerzeugungskosten, Stromnetzpreis, H₂-Transportkosten, Kosten Tankstellenbetrieb) auch unterschiedlich, was bei einer individuellen Analyse stets berücksichtigt werden sollte. Während aktuell an Tankstellen Wasserstoffpreise abgerufen werden, die mitunter noch im zweistelligen Preisbereich (€/kg) liegen (H₂ Mobility 2025), werden für die nächsten Jahrzehnte Kostenentwicklungen von grünem Wasserstoff in den (unteren) einstelligen Preisbereich erhofft und in vielen Fällen erwartet (Merten und Scholz 2023). Bei dieser Diskussion ist stets eine Differenzierung zwischen Erzeugungskosten und tatsächlichen Preisen bei der Abnahme (beim Erzeuger oder z. B. an einer Tankstelle) notwendig.

Der Wasserstoffpreis, der sich in Deutschland bei der Abnahme direkt vom Erzeuger, aus der Pipeline oder an der Tankstelle realisieren lässt, wird dauerhaft einen großen Einfluss auf die Nachfrage, bzw. die sich realisierenden Wasserstoffanwendungen in Deutschland haben (Wietschel et al. 2023). Inwieweit der antizipierte Preisrückgang sich tatsächlich realisieren lässt, ist daher kritisch für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Wasserstoffanwendungen. Es wurde daher als Hemmnisfaktor mit hohem Risiko bewertet, wenn auch als nicht so kritisch wie die zuvor genannten Kostenfaktoren.

Für Erzeuger von (grünem) Wasserstoff wirkt dieser Hemmnisfaktor zumindest teilweise in entgegengesetzte Richtung. Falls die Importpreise höher ausfallen, ist der Spielraum für einen wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseuren größer. Für Wasserstoffanwender spielt hier meist nur der niedrigste Preis eine Rolle, der für Wasserstoff mit den geforderten Spezifikationen (beispielsweise Wasserstofffarbe) erzielt werden kann und kann somit sowohl regionale Erzeugung als auch Wasserstoffimport betreffen.

K6: Zu geringe öffentliche Förderung für Forschungsprojekte

Innovationen als Treiber von Transformationen können vielfältige Auswirkungen auf den Aufbau eines Wasserstoffökosystems haben. Sie können beispielsweise Kosten für Technologien, Prozesse und Anwendungen senken, neue technische Möglichkeiten eröffnen oder sich auf Nachhaltigkeit und Akzeptanz auswirken.

Innovationsaktivitäten finden – insbesondere in frühen Technologiephasen – stark in Forschungsprojekten statt, welche wiederum abhängig von öffentlicher Förderung sind. Dies zeigt sich auch in den umfangreichen Forschungsprojekten, die durch das Forschungsministerium (früher BMBF nun BMFT) im Wasserstoffbereich in der Vergangenheit gefördert wurden (Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt 2025). Aber auch andere Ministerien, wie das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (früher BMWK) und das Verkehrsministerium (früher BMDV) haben Innovationen im Wasserstoffbereich substantiell gefördert (Döscher et al. 2023; Döscher et al. 2024). Falls diese Förderungen von Forschungsprojekten in der Zukunft zu gering ausfallen, könnten Innovationsaktivitäten versiegen oder Potenziale nicht ausgeschöpft werden.

Zudem kommt der öffentlichen Forschungsförderung in Deutschland eine besondere Relevanz zu, da im Vergleich zu einigen anderen Nationen eine deutlich niedrigere private Investitionsbereitschaft vorherrscht (Büttner et al. 2015).

K7: Zu niedriger Wasserstoff-Importpreis (bezogen auf lokale Produktion)

Die Bundesregierung erwartet im Jahr 2030 für Deutschland einen Bedarf an Wasserstoff und Derivaten in Höhe von 95-130 TWh, bei einem Importanteil von 50-70 %. Die Wasserstoffnachfrage und entsprechende Importbedarfe werden im Zuge der volkswirtschaftlichen Transformation hin zu Klimaneutralität weiter ansteigen: Bis 2045 auf etwa 360-500 TWh für Wasserstoff sowie 200 TWh für Wasserstoffderivate (Die Bundesregierung 2024). Neben den Gestehungskosten für Wasserstoff ist der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auch beeinflusst durch den Wettbewerb mit dem Importmarkt. Ist der im Ausland produzierte Wasserstoff zu deutlich geringeren Preisen zu bekommen, als

das über eine lokale Produktion möglich ist, so ist diese weniger attraktiv. Für das Jahr 2030 prognostizieren Studien Importpreise für Wasserstoff nach Europa beispielsweise im Bereich zwischen 3,5 und 6,5 €/kg (2050 zwischen 2,5 und 4,5 €/kg). Mit diesen Werten müssen sich die zu erwartenden Gestehungskosten messen (prognos und spha 2022; Wietschel et al. 2024). Für Wasserstoffanwendungen hingegen stellt sich ein gegensätzlicher Effekt dar. Niedrige Importkosten wirken sich auf das Wachstum des Marktes positiv aus und fördern die Transition zu wasserstoffbasierten Anwendungen und Prozessen. In den Ergebnissen unserer Umfragen lässt sich erkennen, dass diese Unsicherheit im Vergleich zu anderen Faktoren als moderat betrachtet werden.

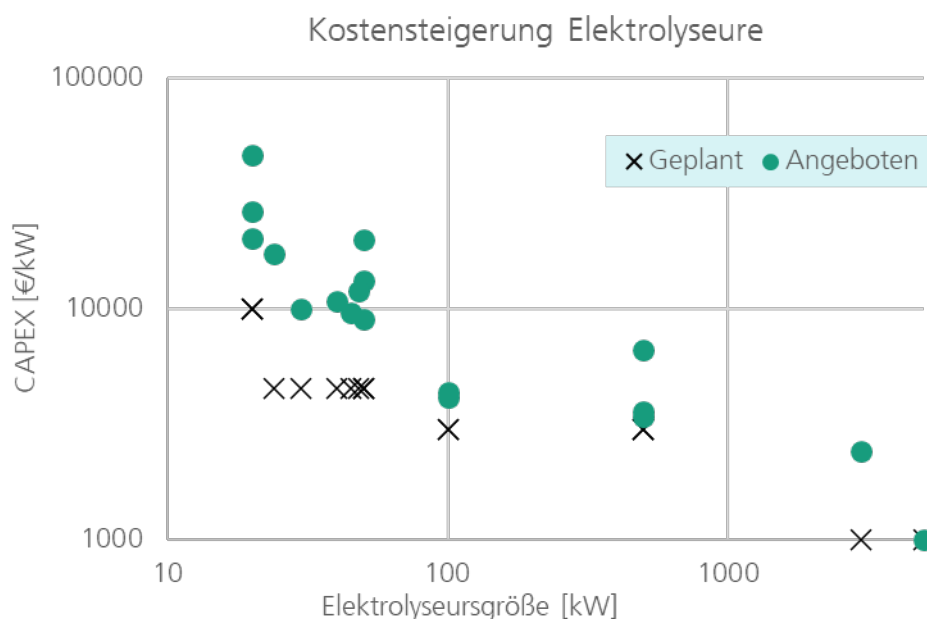
Die Diskussion der Hemmnisdimension Kosten zeigt, dass sowohl auf Seite der Wasserstoff-Nachfrage als auch auf Seiten von Wasserstoff-Angebot und -Technologieentwicklung schon heute Preisentwicklungen eine relevante Herausforderung darstellen. Förderungen aus öffentlicher Hand und Investitionen von Unternehmen werden also auch künftig eine relevante Rolle spielen. Im Gesamtvergleich stellen sich die Kostenfaktoren als am zweithöchsten bewertete Hemmnisse dar.

2.2.1 Erfahrungen der Modellregionen

Die Akteure in den Modellregionen haben in vielen Fällen direkte Erfahrungen oder indirekte Beobachtungen in Bezug auf die potenziell hemmenden Kostenfaktoren gemacht.

So konnten die Modellregionen aus erster Hand Preissteigerungen bei Angeboten für Wasserstofftechnologien beobachten. In Abbildung 6 ist dargestellt, wieviel höher die Angebotspreise für die ausgeschriebenen Elektrolyseure lagen als während der Projektantragsphase angenommen. Ein Übertreffen der ursprünglich geplanten Preise auf mindestens das Doppelte ist eher der Regelfall als die Ausnahme. Insbesondere bei den Anlagen kleinerer Größe ist eine Vervielfachung des geplanten Preises im Vergleich zu den tatsächlichen Angebotspreisen zu beobachten. Elektrolyseure sind dabei nur ein Beispiel für Wasserstofftechnologien, die investitionsintensiv sind. Solange kein Wasserstoffnetzanschluss zur Verfügung steht und Traileranlieferungen notwendig sind, entstünden hohe Kosten, beispielsweise durch die limitierte Liefermenge und die Notwendigkeit teurer Wechselbrücken. Aber auch der Betrieb neuer Technologien sei initial oft mit höheren Kosten verbunden, da hohe Wartungskosten aufgrund fehlender Laufzeiterfahrungen anfallen würden.

In einigen Fällen mussten Teilprojekte aufgrund gestiegener Investitionskosten sogar herabskaliert werden, um dem Förderrahmen zu entsprechen. Dabei ist nicht auszuschließen, dass steigende Förderungen auch zu Mitnahmeeffekten führen, wie Erfahrungen mit Komponentenherstellern zeigen, die nur geringe Kostensteigerungen in der eigenen Produktion zu verzeichnen haben dürften, aber höhere Preise verlangen, um möglicherweise zusätzlich von den Förderungen zu profitieren. Dabei profitieren sie davon, dass die „Pionierkosten“ der Unternehmen, die frühzeitig und risikobehaftet in Wasserstofftechnologien investiert haben (Power-to-X-Allianz 2025) typischerweise über den Investitionskosten in einem etablierten Markt liegen und in Förderprogramme eingepreist werden. Aber auch die noch fehlenden kostensenkenden Skalierungseffekte treiben die Kosten, wie das Beispiel der Elektrolyseurproduktion gut verdeutlicht. Diese erfolgen in einem Hochlohnland wie Deutschland immer noch größtenteils handwerklich, sodass noch keine nennenswerte Automatisierung und Industrialisierung durchlaufen ist (Brudermüller et al. 2023).

Abbildung 6: Angebotspreise für Elektrolyseure im Vergleich zu ursprünglich eingeplanten Preisen

Quelle: Erfahrungen aus H2-Wandel / Prof. Dr. Thorsten Zenner

Akteure aus den Modellregionen haben zuletzt im politischen und industriellen Umfeld Sparmaßnahmen und Haushaltskürzungen beobachtet, worunter Investitionen aus öffentlicher und privater Hand in die Wasserstoffwirtschaft gelitten haben könnten. Dabei stellen sie fest, dass die Förder Rahmenbedingungen für Wasserstofftechnologien nicht mit den umfangreichen Förderungen für andere grüne Technologien wie Windkraft, Photovoltaik und Biogas Schritt halten, da letztere durch die EEG-Einspeisevergütung über die vollständige Betriebslaufzeit kaum wirtschaftliches Risiko tragen. Außerdem wurde die Feststellung geäußert, dass auch größere Unternehmen in Branchen, in denen Wasserstoff als alternativlos auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion gilt, zurückhaltend mit Investitionen in diesem Bereich seien. So scheuten auch Unternehmen, die eigentlich Umstellungen in Angriff nehmen wollen würden und sich dementsprechend bereits in Stellung gebracht hätten, jetzt als „First-Mover“ ins Risiko zu gehen.

Der Wasserstoffpreis wurde auch von zentralen Akteuren in den Modellregionen als maßgebliches Thema wahrgenommen, insbesondere für die Industrie, die grundsätzlich als hoch preissensitiv gelte. Für viele Anwendungen würden auch künftige Wasserstoffpreise um die 10 €/kg für einen wirtschaftlichen Betrieb zu hoch sein. Auch die Erfahrungen mit den Preisen an Wasserstoff-Tankstellen in anderen Modellregionen Baden-Württembergs wurden als Entscheidungsgrund gegen eine Umstellung auf Wasserstoffmobilität wahrgenommen. Dies ist ein Beispiel dafür, wie das übliche Weiterreichen von Kosten die Nachfrage nach Wasserstoff hemmen kann. Dabei gäbe es auch andere Kostentreiber für Aktivitäten in den Modellregionen, wie Personalkosten, die nicht unterschätzt werden sollten. Auch die Allgemeinbevölkerung in der Längsschnittumfrage in den Modellregionen sah Kosten als wichtiges Hemmnis an: Als höchstes Risiko nannten die Befragten nicht etwa Sicherheitsaspekte, sondern das finanzielle Risiko für ihre Heimatkommunen, die in Wasserstoffprojekte investieren (Lohmann 2025).

2.2.2 Abhängigkeiten und Handlungsspielräume

Um die Herausforderungen in der Dimension Kosten zu adressieren, stellen sich Akteuren in den Modellregionen unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten dar. Bei einigen Aspekten ist eine starke externe Abhängigkeit gegeben, dennoch bestehen relevante Handlungsspielräume, um Einfluss nehmen zu können.

Der Preis für Wasserstoff ist stark geprägt durch regulatorische Vorgaben, die Strommarktlage sowie dem Importpreis, kann aber auch von öffentlichen Förderungen beeinflusst werden. Hier zeigen sich für die Modellregionen nur begrenzte Möglichkeiten zu Einflussnahme auf. Spielräume ergeben sich lediglich durch die eigene Erzeugung von Wasserstoff, die wiederum von einer engen Abhängigkeit der regulatorischen Vorgaben und des Strompreises geprägt ist. Dies könnte über eine eigene grüne Stromerzeugung in den Regionen adressiert werden sowie durch die bei der Erzeugung entsprechend ausgestalteten Betriebsstrategien. Ein ähnliches Bild zeichnet sich beim marktabhängigen Strompreis selbst ab. Regulierungen und Förderungen stellen neben der Marktlage die Abhängigkeiten dar.

Die Investitionskosten für Wasserstofftechnologien hängen vorrangig von externen Faktoren wie dem globalen Stand der Technologieentwicklung, erzielten Skaleneffekten, der allgemeinen Preisentwicklung sowie der Verfügbarkeit (über-)regionaler Förderprogramme ab. Die Modellregionen besitzen hier nur einen begrenzten aber durchaus wirksamen Hebel. Durch die Förderung eigener Entwicklungsprojekte und den Ausbau regionaler Fertigungskapazitäten könnten die Kosten in einem begrenzten Rahmen gesenkt und der Markthochlauf unterstützt werden. Auch die möglichen Mehrwerte von gemeinsamen und ggf. überregionalen Beschaffungskonsortien ließe sich prüfen. Schließlich liegt es auch in der Hand der Modellregionen, kurzfristige Verluste in Kauf zu nehmen oder durch Förderungen abzufangen, um trotz der hohen Kosten die Innovationsaktivitäten umzusetzen.

Die gesamte auf die Wasserstoffwirtschaft wirkende private Investitionsbereitschaft ergibt sich einerseits durch die Strategien (inter-)nationaler Unternehmen, die sich auf dem Markt befinden bzw. in diesen eintreten, andererseits beeinflussen externe insbesondere wirtschaftliche Risiken und deren Mitigation durch Förderprogramme die Bereitschaft der regionalen Unternehmen zu investieren. Diesen selbst bleibt der Handlungsspielraum, ihre eigenen Strategien bzgl. Angebot, Nutzung und Technologie entsprechend auszurichten.

Die Verfügbarkeit öffentlicher Fördermittel wird primär durch Bund, Land und EU bestimmt – Budgethöhen, Programmschwerpunkte und Vergabekriterien liegen somit weitgehend außerhalb des Einflussbereichs der Modellregionen. Dennoch können die Regionen indirekt auf diesen Faktor einwirken, indem sie frühzeitig förderfähige Projekte bündeln, starke Konsortien schmieden, aktiv Lobbyarbeit für passende Förderlinien betreiben und Anträge professionell vorbereiten; so lässt sich die Chance auf Bewilligung erhöhen und der Umfang eingeworbener Mittel maximieren.

Zusammengefasst ergeben sich für die Modellregionen verschiedene Hebel, um Herausforderungen im Bereich der Kosten zu begegnen, um den durchaus umfangreichen Abhängigkeiten von externen Akteuren entgegenzuwirken. Tabelle 3 bietet dazu einen Überblick über die wichtigsten Abhängigkeiten und Handlungsspielräume.

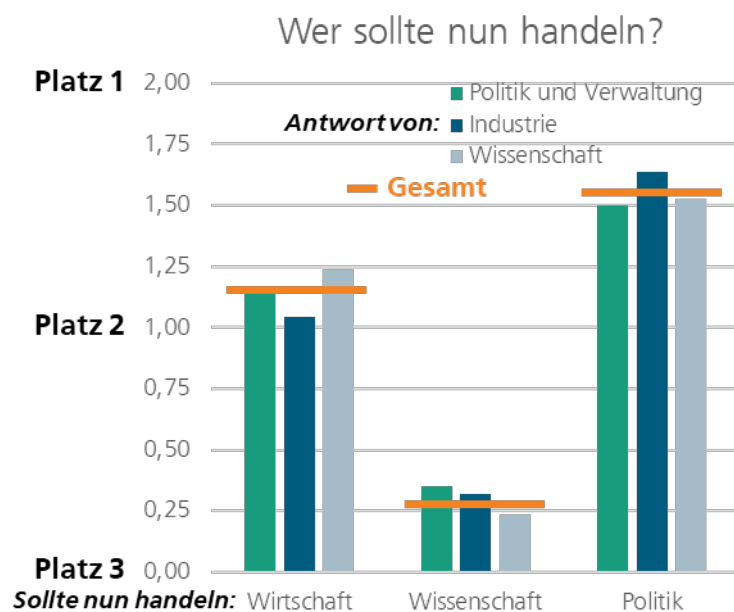
Tabelle 3: Abhängigkeiten und Handlungsspielräume in der Dimension Kosten

	Externe Abhängigkeit (z. B. zu Akteur oder Gegebenheit)	Kann die Modellregion beeinflussen durch... / Kann in den Regionen beeinflusst werden durch...
H2-Preis	• Import-Preis • Strom-Preis • Ggf. Öffentliche Förderungen • Regulatorische Vorgaben	• Begrenzt: Eigene Erzeugung durch Akteure in den Regionen (enge Preisabhängigkeit Strom) • Betriebsstrategien
Strom-Preis	• Strommarkt (großer Einfluss von nationalem Strommarkt auf regionale Stromkosten) • Förderungen/Regulierung: Industriestrompreis, Netzentgeltbefreiung, ...	• Eigene grüne Stromerzeugung • Flexibilisierung (Speicher für bessere Konditionen am Strommarkt / Teilnahme Regelenenergiemarkt)
Investitionskosten H2-Technologien	• Technologieentwicklung, Skalierung, Preisentwicklung • Ggf. Förderungen	• Theoretisch ein kleiner(!) Hebel durch in der Region ansässige Technologieentwicklungen/Skalierung der Fertigung • Vernetzung/Beschaffungskonsortien
Private Investitionsbereitschaft	• Strategie (inter-)nationaler Firmen • Externe (wirtschaftliche) Risiken und Mitigation durch Förderprogramme	• Investitionsstrategie der regionalen Industrieakteure (Angebot: z. B. Stadtwerke, Nutzung: z. B. Prozesswärme; Technologie: z. B. Brennstoffzellenanbieter)
Öffentliche Förderung	• Europäische Förderungen, Bundesebene, Landespolitik.	• Lobbyarbeit

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Interviews, Workshops, Diskussionen und Literatur

Die Hemmnisdimension Kosten nimmt daher, nach Wahrnehmung der Umfrageteilnehmenden, einerseits die Politik und andererseits wirtschaftliche Akteure in die Verantwortung (Abbildung 7). Diese Einordnung bezieht sich vermutlich einerseits auf die private Investitionsbereitschaft, vor allem aber auf starke öffentliche Förderprogramme für Wasserstoff.

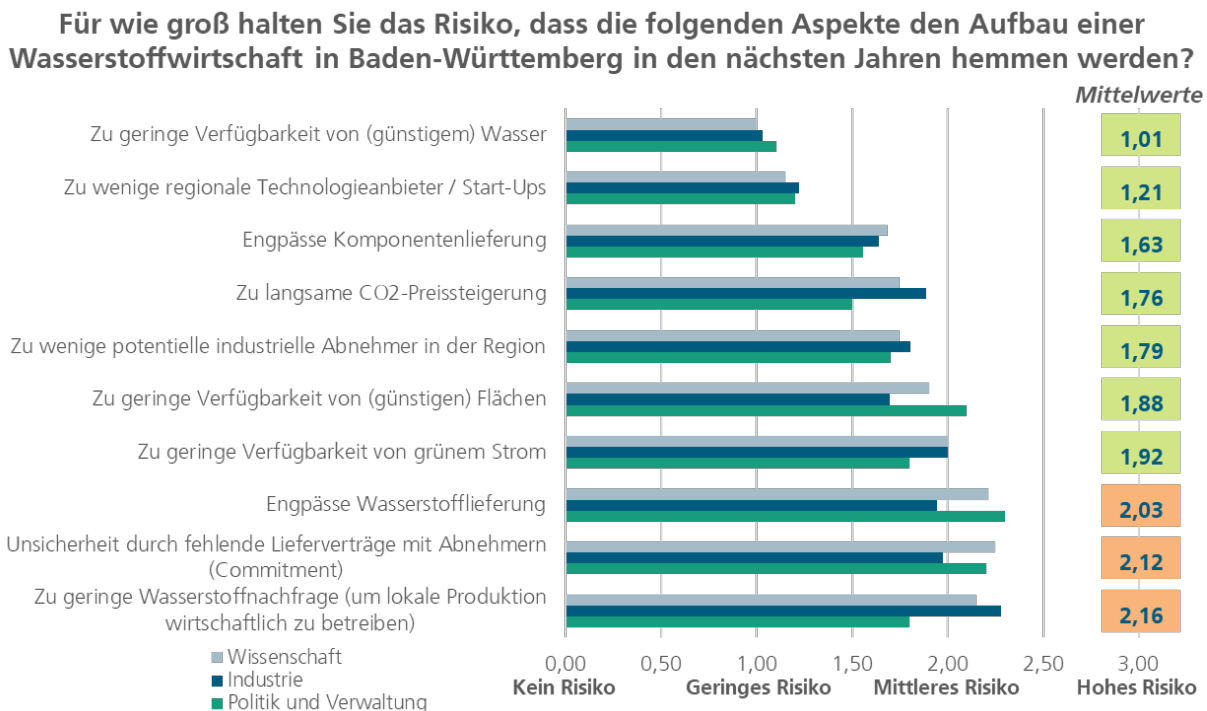
Abbildung 7: Einordnung, welche Akteure nun in der Verantwortung stehen, um die Hemmnisse der Dimension Kosten abzubauen (gemittelte Platzierung)



Quelle: Eigene Darstellung

2.3 Marktfaktoren

Neben institutionellen Faktoren stellen auch verschiedene marktwirtschaftliche Rahmenbedingungen zentrale Herausforderungen für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft dar. Die Ergebnisse der Begleitforschung verdeutlichen, dass insbesondere eine noch unzureichend entwickelte Marktstruktur die Etablierung wirtschaftlich tragfähiger Wertschöpfungsketten hemmt. Im Folgenden werden zentrale Hemmnisse näher ausgeführt.

Abbildung 8: Eingeschätzte Relevanz der Hemmnisfaktoren in der Dimension Markt

M1: Geringe lokale Wasserstoffnachfrage

Ein wesentliches Hindernis für den wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffherstellungsanlagen ist eine (bislang) unzureichende lokale Nachfrage. Fehlt ein belastbarer Absatzmarkt, werden Investitionen in die Erzeugung wirtschaftlich unattraktiv – insbesondere da Skaleneffekte ausbleiben und Betriebskosten vergleichsweise hoch bleiben. Die Nachfrageperspektive wirkt damit unmittelbar auf die Standortwahl, Dimensionierung und Auslegung von Elektrolyseanlagen. Zwar ist mittelfristig mit einer Zunahme potenzieller Abnehmer zu rechnen, jedoch bleibt die gegenwärtige Marktsituation für viele Investoren mit Unsicherheiten behaftet. Grüner Wasserstoff ist derzeit teurer als fossile Energieträger, und es gibt aktuell meist keinen ausreichend klaren Anreiz, auf grünen Wasserstoff umzusteigen: Weder bestehen entsprechende gesetzliche Verpflichtungen, noch gleicht der CO₂-Preis die höheren Kosten des klimaneutralen Produkts ausreichend aus. Laut der landesweiten Wasserstoff-Bedarfsabfrage des Umweltministeriums Baden-Württemberg aus dem Jahr 2023 wird der Wasserstoffbedarf auf etwa 4,1 TWh im Jahr 2025 geschätzt. Für die Jahre 2032 und 2035 steigt der prognostizierte Bedarf auf rund 52 TWh bzw. 73 TWh an und erreicht ab 2040 voraussichtlich ein Niveau von etwa 91 TWh jährlich (Plattform H2BW 2023b). Nach den Ergebnissen der Umfrage stellt dieses Risiko das dominierende Hemmnis dar, wobei es von Politik und Verwaltung im Vergleich zu den anderen Akteursgruppen etwas zurückhaltender bewertet wird.

M2: Fehlende Abnahmeverträge

Die Unsicherheit hinsichtlich fester Lieferverträge mit Abnehmern stellt eine zentrale Markteintrittsbarriere für Wasserstoffherzeuger dar. Langfristige Abnahmeverträge gelten als essenzielle Voraussetzung zur finanziellen Absicherung von Investitionen in die Wasserstoffproduktion. Laufzeiten und Abnahmemengen von Wasserstofflieferverträgen variieren stark in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall. So beliefert RWE die Total-Raffinerie in Leuna im Rahmen eines langfristigen Vertrags von 2030 bis 2044 jährlich mit rund 30.000 Tonnen grünem Wasserstoff. Im Gegensatz dazu liefert Lhyfe zwischen 2025 und 2030 insgesamt über 1.200 Tonnen Wasserstoff an vier von

H2 Mobility entwickelte und betriebene Wasserstofftankstellen (Schunck 2025; Schwarz 2024). Sie ermöglichen Planungs- und Investitionssicherheit, insbesondere für die Auslegung und Finanzierung großskaliger Elektrolyseure. Fehlen solche Vereinbarungen, steigt das unternehmerische Risiko erheblich – nicht nur für die Erzeugung, sondern auch für nachgelagerte Infrastrukturakteure wie Tankstellenbetreiber, Netzbetreiber oder Technologieanbieter. Fehlende Lieferverträge werden insgesamt als bedeutendes Hemmnis wahrgenommen, wobei die Industrie diesem Aspekt tendenziell weniger Gewicht beimisst als die übrigen Akteursgruppen.

M3: Engpässe in der Wasserstoffbelieferung

Neben der unklaren Nachfrageseite wirken potenzielle Versorgungsengpässe aufseiten der Infrastruktur und Logistik als weiteres marktwirtschaftliches Risiko. Unsicherheiten hinsichtlich stabiler Lieferketten – verstärkt durch jüngste Erfahrungen in globalen Liefernetzwerken (z. B. Ever Given im Suez Kanal, Auswirkungen von Covid) – können die Verlässlichkeit der Wasserstoffversorgung beeinträchtigen. Für industrielle Anwendungen oder kritische Infrastrukturen wie Mobilität oder Wärmeversorgung stellen unterbrochene oder unzuverlässige Lieferketten ein nicht zu vernachlässigendes Risiko dar. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit sowie der stark regional ausgeprägten Produktionsbedingungen von grünem Wasserstoff unterliegt das Preisniveau derzeit erheblichen Schwankungen. Eine kurzfristige Stabilisierung ist nicht absehbar, da insbesondere volatile Strompreise und Unsicherheiten in der Lieferkette weiterhin preistreibend wirken (Mohr et al. 2025). Die Umfrageergebnisse zeigen, dass die Engpässe bei Wasserstofflieferungen als ein bedeutender Hemmnisfaktor für den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft wahrgenommen werden. Seitens der Industrie wird dies jedoch weniger kritisch eingeschätzt als von Vertretern aus Wissenschaft, Politik und Verwaltung.

M4: Begrenzte Verfügbarkeit von grünem Strom

Die Produktion von grünem Wasserstoff setzt den Zugang zu ausreichenden Mengen regenerativ erzeugter Energie voraus. In der Praxis ist die Verfügbarkeit von grünem Strom jedoch oft limitiert – sowohl mengenmäßig als auch aufgrund infrastruktureller Engpässe. Für eine wirtschaftliche Nutzung von Elektrolyseuren sind hohe Auslastungsgrade (3.000-4.000 Vollaststunden abhängig vom Strompreis und der gewählten Technologie) erforderlich (EMCEL GmbH et al. 2023). Die eingeschränkte Verfügbarkeit grünen Stroms gefährdet nicht nur die Wirtschaftlichkeit von Erzeugungsprojekten, sondern auch die Glaubwürdigkeit von Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger. Zahlreiche industrielle Prozesse – etwa in der Hochtemperaturanwendung oder der Direktreduktion von Eisenerz – lassen sich mit dem Einsatz direkter elektrischer Prozesse derzeit entweder nicht praktikabel oder nur mit erheblichen Effizienzverlusten und technischen Anpassungen realisieren (Rehfeldt et al. 2024). Diese Anwendungsfelder fallen daher voraussichtlich eher in den Zuständigkeitsbereich von Wasserstoff. Eine fundierte Bewertung erfordert jedoch eine prozessspezifische und technologisch differenzierte Analyse. Nach den Ergebnissen der Umfrage wird dieses Risiko insgesamt als moderat eingeschätzt, wobei Politik und Verwaltung diesem tendenziell eine geringere Relevanz beimessen als die anderen Akteursgruppen.

M5: Flächenverfügbarkeit

Ein weiterer limitierender Faktor ist die eingeschränkte Verfügbarkeit geeigneter (und günstiger) Flächen, etwa für Elektrolyseure, Speicher, Tankstellen oder Netzanschlüsse. Besonders in urbanen oder industriell stark genutzten Regionen sind Gewerbeflächen begrenzt. Die Standortfrage ist entscheidend, da viele Wasserstoffanwendungen auf eine direkte räumliche Nähe zu Energiequellen, Abnehmern oder Versorgungsinfrastrukturen angewiesen sind. Bezüglich der Flächenverfügbarkeit zeigt sich laut Umfrageergebnissen, dass insbesondere die Politik hierin ein deutlich größeres Hemmnis sieht als Wissenschaft und Industrie.

M6: Fehlende industrielle Abnehmer in der Region

Auch wenn sich die Wasserstoffnachfrage langfristig entwickeln dürfte, mangelt es in vielen Regionen derzeit an unmittelbar verfügbaren industriellen Großabnehmern. Die Transformation energieintensiver Branchen – etwa in der Stahl- oder Chemieindustrie – erfolgt meist in langfristigen Planungshorizonten (z. B. klimaneutrale Umstellung von Stahlwerken bis 2033 bzw. 2045 von Salzgitter bzw. Thyssenkrupp) (Salzgitter AG 2025; thyssenkrupp 2025). Bleiben solche Abnehmer in einer Region absehbar aus, sinkt bereits heute die Investitionsbereitschaft potenzieller Anbieter, wodurch Skaleneffekte nicht ausgeschöpft werden können. In der Folge verliert der Aufbau eines regionalen Wasserstoffmarkts an wirtschaftlicher Attraktivität und wird entsprechend verzögert. Laut Umfrageergebnissen werden fehlende industrielle Abnehmer in der Region von allen Akteursgruppen als eher moderates Risiko für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg in den kommenden Jahren eingeschätzt.

M7: Langsame CO₂-Preissteigerung

Ein wesentlicher Wettbewerbsnachteil von Wasserstoff gegenüber fossilen Energieträgern besteht weiterhin darin, dass externe Kosten – insbesondere CO₂-Emissionen – bislang nicht vollständig internalisiert werden. Der Internationale Währungsfonds (IWF) sieht CO₂-Preise von mindestens 75 US-Dollar pro Tonne bis 2030 als notwendig an, damit Industrieländer ihre Emissionen im Einklang mit den Zielen des Pariser Abkommens reduzieren können. Andere Analysen gehen von noch ambitionierteren Preisniveaus aus: Für die Europäische Union wird in einigen Studien ein CO₂-Preis von etwa 130 Euro pro Tonne als erforderlich angesehen (Deutscher Bundestag 2024b). Der Ariadne-Report nennt sogar eine Spanne von 300 bis 500 Euro pro Tonne CO₂, um eine ausreichende klimapolitische Steuerungswirkung zu erzielen (Bruch et al. 2025). Eine langsame oder unsichere Entwicklung des CO₂-Preises verzögert die Wirtschaftlichkeit klimaneutraler Alternativen und bremst damit den Markthochlauf. Die antizipierten Kosten für fossile Heizsysteme, Fahrzeuge oder industrielle Prozesse wirken sich unmittelbar auf die Investitionsentscheidungen potenzieller Anwender aus. Dies betrifft die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette, da ein hinreichend hoher und verlässlicher CO₂-Preis die Attraktivität von Wasserstofftechnologien maßgeblich steigern würde. Auch in diesem Fall wird laut den Umfrageergebnissen insgesamt ein moderates Hemmnis gesehen, wobei insbesondere die Industrie das Risiko höher einordnet als Politik und Verwaltung.

M8: Engpässe bei Komponenten und Vorprodukten

Wie bei vielen innovativen Technologien ist die Wasserstoffwirtschaft auf funktionierende und verlässliche Lieferketten angewiesen. Engpässe bei kritischen Komponenten – etwa Elektrolysezellen (z. B. Katalysatorschichten aus Platin), Druckbehältern oder Steuerungssystemen – können Projekte verzögern oder verteuern. Gerade in frühen Marktphasen, in denen sich technologische Standards noch nicht etabliert haben, wirken sich Störungen in der Vorkette besonders stark auf die gesamte Wertschöpfungskette aus. Nach den Erfahrungen der Umfrageteilnehmenden werden Engpässe bei Komponentenlieferungen im unteren Mittelfeld der hemmenden Faktoren eingeordnet.

M9: Fehlende regionale Technologieanbieter und Start-ups

Die regionale Verfügbarkeit von Technologieanbietern – sowohl etablierten Unternehmen als auch innovativen Start-ups – spielt eine zentrale Rolle für die Entwicklung eines leistungsfähigen Wasserstoffmarkts (Fisher et al. 2024; Lee 2023). Start-ups gelten als wichtige Treiber für disruptive Innovationen und neue Geschäftsmodelle, während etablierte Unternehmen durch Erfahrung und Kapital langfristige Entwicklungen absichern können. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stellen dabei einen wichtigen Beitrag für die wirtschaftliche Entwicklung dar (Makedos 2014). In vielen Regionen bestehen hier jedoch strukturelle Defizite, die den Aufbau regionaler

Wertschöpfungsketten erschweren. Insgesamt wird das Risiko eines Mangels an regionalen Anbietern als vergleichsweise gering eingeschätzt.

M10: Geringe Wasserverfügbarkeit

Zwar ist der Wasserbedarf für die Elektrolyse im Vergleich zu anderen industriellen Prozessen moderat, dennoch wird die Verfügbarkeit von (günstigem) Wasser in der öffentlichen Debatte häufig als möglicher Engpass diskutiert (dpa Niedersachsen 2024). Im konkreten Fall Baden-Württembergs zeigt sich, dass dieses Risiko im Rahmen der Befragung insgesamt als weniger kritisch eingeschätzt wird – auch wenn eine sorgfältige Standortwahl und Ressourcennutzung stets gewährleistet sein müssen. Für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff werden rund 9 kg Wasser benötigt, was einem Wasserbedarf von etwa 270.000 m³ pro TWh Wasserstoff entspricht. Bei einem angenommenen Wasserstoffbedarf von 4,1 TWh im Jahr 2025 ergibt sich ein Wasserbedarf von ca. 1,1 Mio. m³, im Jahr 2035 bei 73 TWh etwa 19,7 Mio. m³. Wird der Wasserstoff vollständig in Baden-Württemberg per Elektrolyse produziert, entspräche dies selbst 2035 nur rund 0,65 % des heutigen jährlichen Wasserverbrauchs des Landes (ca. 3.000 Mio. m³) (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2024).

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass marktbezogene Faktoren maßgebliche Hemmnisse für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg darstellen. Als besonders herausfordernd werden die derzeit noch geringe Wasserstoffnachfrage, die Unsicherheit durch fehlende Lieferverträge, sowie die langsame Entwicklung des CO₂-Preises oder Engpässe in der Lieferkette für Komponenten. Diese Hemmnisse erschweren sowohl Investitionsentscheidungen auf der Angebotsseite als auch eine breitere Marktdurchdringung auf der Nachfrageseite. Sie wirken sich zudem auf zentrale Skaleneffekte aus, die für eine ökonomisch tragfähige Wasserstoffwirtschaft entscheidend sind. Ein gezielter Abbau dieser Marktbarrieren – etwa durch verstetigte Nachfrageanreize, marktnahe Förderinstrumente, den Ausbau regionaler Wertschöpfungsketten und eine stringente CO₂-Bepreisung – stellt daher eine wesentliche Voraussetzung für die Etablierung eines funktionierenden Wasserstoffmarkts dar.

2.3.1 Erfahrungen der Modellregionen

Der Aufbau eines funktionierenden Markts für grünen Wasserstoff in Baden-Württemberg wird derzeit durch zahlreiche marktwirtschaftliche Hemmnisse gebremst. Eine zentrale Herausforderung ist die fehlende Differenzierung bei den Qualitätsanforderungen: Die regulatorischen Vorgaben für grünen Industriewasserstoff orientieren sich an den strengen RFNBO-Kriterien für den Mobilitätssektor. Dadurch werden auch für industrielle Anwendungen kostenintensive Strombezugsmodelle wie PPAs notwendig – mit negativen Folgen für die Wirtschaftlichkeit.

Ein zentrales Hemmnis ist das Fehlen verlässlicher Abnehmerstrukturen. Abseits einzelner Förderprojekte im ÖPNV konnten bislang kaum stabile Partnerschaften etabliert werden. Industrieunternehmen aus der Zement-, Pharma- oder Gießereibranche zeigen ebenso wie mittelständische Betriebe zwar grundsätzliches Interesse, zögern aber aufgrund fehlender Planungs- und Versorgungssicherheit. Viele Unternehmen haben Machbarkeitsstudien angestoßen, scheuen jedoch konkrete Investitionen – insbesondere aus der fehlenden Bereitschaft, als „First Mover“ wirtschaftliche Risiken allein tragen zu müssen. In den meisten Regionen, in denen die grundsätzliche Bereitschaft vorhanden ist, bleiben bislang umfangreiche und langfristige Abnahmeverträge aus.

Ähnliches ist auch bei Wasserstofftechnologien zu beobachten. So habe die unklare politische Positionierung und der Wegfall der Förderung von Brennstoffzellfahrzeugen dazu geführt, dass geplante Produktionslinien für Brennstoffzellen aufgegeben oder die Herstellung von Brennstoffzellfahrzeugen eingestellt wurde. Dies setze eine Kaskade in Gang, die auch den Aufbau von

Tankstelleninfrastruktur, Erzeugerkapazitäten und Abnehmerstrukturen für grünen Wasserstoff aufgrund fehlender wirtschaftlicher Attraktivität ins Stocken bringe.

Ein weiteres Spannungsfeld entsteht bei Lieferverpflichtungen für grünen Wasserstoff gegenüber der noch eingeschränkten technischen Zuverlässigkeit von Elektrolyseuren. Für potenzielle Abnehmer bedeutet dies ein signifikantes Risiko. Hinzu kommt die lange Abschreibungsdauer der Anlagen, die kurzfristigen Marktpulsen und fehlenden langfristigen Abnahmeverträgen gegenübersteht.

Zwar gibt es punktuelle Fortschritte – neben den Aktivitäten in den begleiteten Modellregionen z. B. durch vier Wasserstofftankstellen im Rahmen der Projekte H2-Rivers und H2-Rhein-Neckar, deren Auslastung allerdings bisher noch gering bleibt und deren wirtschaftlicher Betrieb ohne Förderung aktuell kaum möglich ist und deren wirtschaftlicher Betrieb von einer ausreichenden Auslastung abhängt. Auch kleinere Vorhaben wie das der Stadtwerke Tübingen zeigen, dass bereits geringe Abnahmemengen tragfähige Geschäftsmodelle ermöglichen könnten. Dennoch fehlen in den meisten Fällen verbindliche langfristige Zusagen. In anderen Fällen zeichnen sich aber auch umfangreichere Nachfragen ab, sodass z. B. in der Region H2-GeNeSiS der ursprünglich vorgesehene Elektrolyseur nun vergrößert geplant wird.

Infrastrukturelle Engpässe, etwa beim Transport durch fehlende Trailer und Container, verschärfen die Situation. Während Anbieter von Wasserstoff-Blockheizkraftwerken vereinzelt sichtbarer werden, fehlen vielen Start-ups oder Elektrolyseurherstellern eine entsprechende Marktpresenz, bzw. Referenzprojekte.

2.3.2 Abhängigkeiten und Handlungsspielräume

Um die Herausforderungen im Bereich Markt zu adressieren, können die Akteure in der Modellregion verschiedene Handlungsspielräume aktiv nutzen – auch wenn zentrale Marktbedingungen vielfach durch nationale, europäische oder globale Rahmenbedingungen geprägt sind.

So lassen sich beispielsweise lokale Wasserstoffabnehmer identifizieren und durch gezielte Förderungen von Pilotanwendungen in Industrie, Mobilität oder kommunaler Versorgung aktivieren. Stadtwerke, Busbetreiber oder mittelständische Produktionsbetriebe können auf diese Weise zur regionalen Nachfrageentwicklung beitragen – selbst wenn übergeordnete Förderprogramme oder regulatorische Rahmenbedingungen nicht direkt beeinflussbar sind. Auch bei Engpässen in der Komponentenlieferung – bedingt durch globale Lieferketten, geopolitische Spannungen oder fehlende Rohstoffe – bestehen begrenzte, aber wirkungsvolle regionale Einflussmöglichkeiten. So kann gezielt mit Technologieanbietern aus der Region wie Bosch oder innovativen KMU kooperiert werden, um lokale Fertigungskapazitäten auszubauen oder die Resilienz der Wertschöpfungsketten zu erhöhen. Die Modellregionen können darüber hinaus eine aktive Rolle in der Unterstützung von Transformationsprozessen energieintensiver Unternehmen übernehmen. Zwar sind Standortentscheidungen und Strukturwandel oft überregional beeinflusst, durch gezieltes Standortmarketing oder die Moderation zwischen Erzeugern und Abnehmern können jedoch wichtige Impulse für neue Ansiedlungen und Kooperationen gegeben werden. Bei der Verfügbarkeit möglicher Flächen für Wasserstoffinfrastruktur stehen Vorgaben der Landespolitik zu Raumplanung und Nutzungskonkurrenzen den Handlungsmöglichkeiten der Modellregionen entgegen. Interkommunale Gewerbegebiete, beschleunigte Flächenumwidmungen oder frühzeitige Beteiligungsverfahren können geeignete Hebel sein, um Flächenkonkurrenzen und Zielkonflikte aufzulösen. Auch bei der CO₂ Preissteigerung bestehen Abhängigkeiten zu den politischen Rahmenbedingungen auf Bundes- und EU-Ebene (z. B. ETS), wodurch für die Akteure der Modellregion kein großer Handlungsspielraum gegeben ist. Hierbei kann die Modellregion durch etwaige Kommunikation des CO₂ Preispfades oder durch Sensibilisierung von Unternehmen möglicherweise aktiv werden. Die Sicherung von

grünem Strom ist eng mit dem Strommarktdesign und dem Netzausbau auf nationaler Ebene verknüpft. Dennoch kann auf regionaler Ebene etwa durch die Unterstützung von PPA-Projekten, durch die Identifikation geeigneter Standorte für EE-Anlagen oder durch die Nutzung industrieller Abwärme ein Beitrag zur Versorgungssicherheit geleistet werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Modellregionen über eine Vielzahl an Stellschrauben verfügen, um Marktbarrieren zu adressieren – auch wenn viele Einflussfaktoren extern bestimmt sind. Eine Übersicht zentraler Abhängigkeiten und Handlungsmöglichkeiten ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

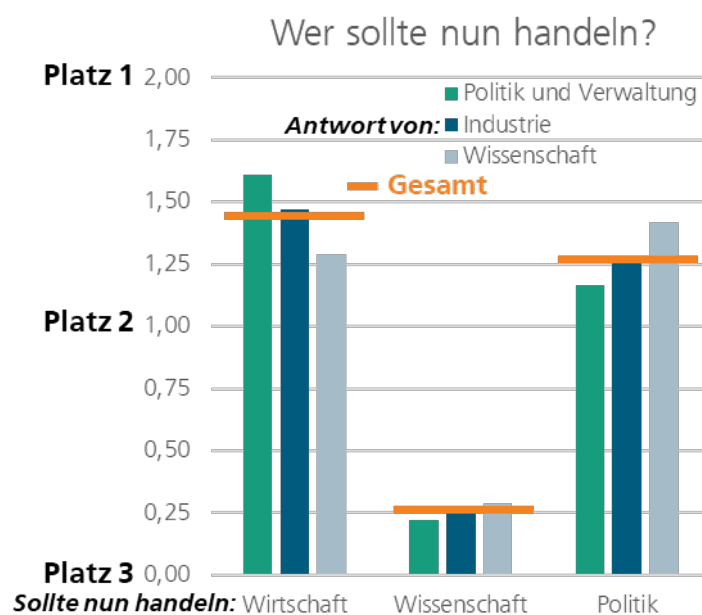
Tabelle 4: Abhängigkeiten und Handlungsspielräume in der Dimension Markt

	Externe Abhängigkeit (z. B. zu Akteur oder Gegebenheit)	Kann die Modellregion beeinflussen durch... / Kann in den Regionen beeinflusst werden durch...
H2-Nachfrage	Deutschlandweite Nachfrage (nur begrenzt relevant für regionale Erzeugung), sektorspezifische Rahmenbedingungen (z. B. Förderprogramme für H2-Nutzung in Industrie oder Verkehr)	- Kooperation mit lokalen Abnehmern (siehe: Stadtwerke, Busbetreiber, Industrieunternehmen) - kommunale H2-Pilotprojekte mit Vorbildcharakter - Langfristige Verträge mit Verkehrsakteuren
Engpässe Komponentenlieferungen	Abhängigkeit von Zulieferern/Weltmarkt/externe Schocks, Transportlogistik	- Technologieanbieter aus der Region (z. B. Bosch, KMUs) - Gemeinsame Beschaffungsstrategien im Konsortialmodell
CO2-Preissteigerung	Politische Rahmenbedingungen auf Bundes- und EU-Ebene (ETS), globale Marktmechanismen	(kein relevanter Handlungsspielraum) aber Kommunikation des CO2-Preispfades, Sensibilisierung von Unternehmen, freiwillige Kompensationsmodelle - Etablierung von Energiemanagementsystemen und Energieaudits (indirekt)
Verfügbarkeit Flächen	Politische Rahmenbedingungen, Raumplanung, Nutzungskonkurrenzen, Eigentumsverhältnisse	Flächenumwidmungen, Entwicklung interkommunaler Gewerbegebiete
Verfügbarkeit grüner Strom	Stromnetz Deutschland/ Nachbarländer, Strompreisgestaltung	- Ausbau kann regional vorangetrieben werden, Unterstützung von PPA-Quellen, Nutzung industrieller Abwärmequellen - Energiebereitstellung kann strategische Stromnetzplanung begleiten - Kooperation mit Energieversorgern
Fehlende industrielle Abnehmer	Strukturwandel in energieintensiven Branchen, Standortentscheidungen, überregionale Preisunsicherheiten	- Ansiedlungsförderung Unternehmen mit H2-Bedarf, Unterstützung bei Transformationsplänen bestehender Industrie, Moderation zwischen Erzeugern und potenziellen Abnehmern - Fokusgruppen mit Industrievertretern - Langfristige Abnahmeverträge
Lieferverträge	Überregionale Nachfrageentwicklung	- Frühzeitig langfristige Lieferverträge abschließen - Projektgesellschaften mit Vertragsstruktur - Vertragliche Rollenverteilung in Partnerschaften

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Interviews, Workshops, Diskussionen und Literatur

Die Umfrageergebnisse zeigen bei der Fragestellung, welche Akteure (Wissenschaft, Politik, Industrie) nun für den Abbau dieser Hemmnisfaktoren am ehesten handeln sollten eine eindeutige Tendenz. Auffällig ist, dass sowohl die Wirtschaft als auch die Politik sich selbst und jeweils gegenseitig stark in der Verantwortung sehen. Bei der Wissenschaft hingegen wird durchgängig eine geringere Handlungsnotwendigkeit gesehen, sowohl von sich selbst als auch von den anderen Gruppen. Insgesamt deutet die Verteilung auf ein differenziertes Verantwortungsverständnis hin, bei dem die zentralen Impulse vor allem von politischen und wirtschaftlichen Akteuren erwartet werden.

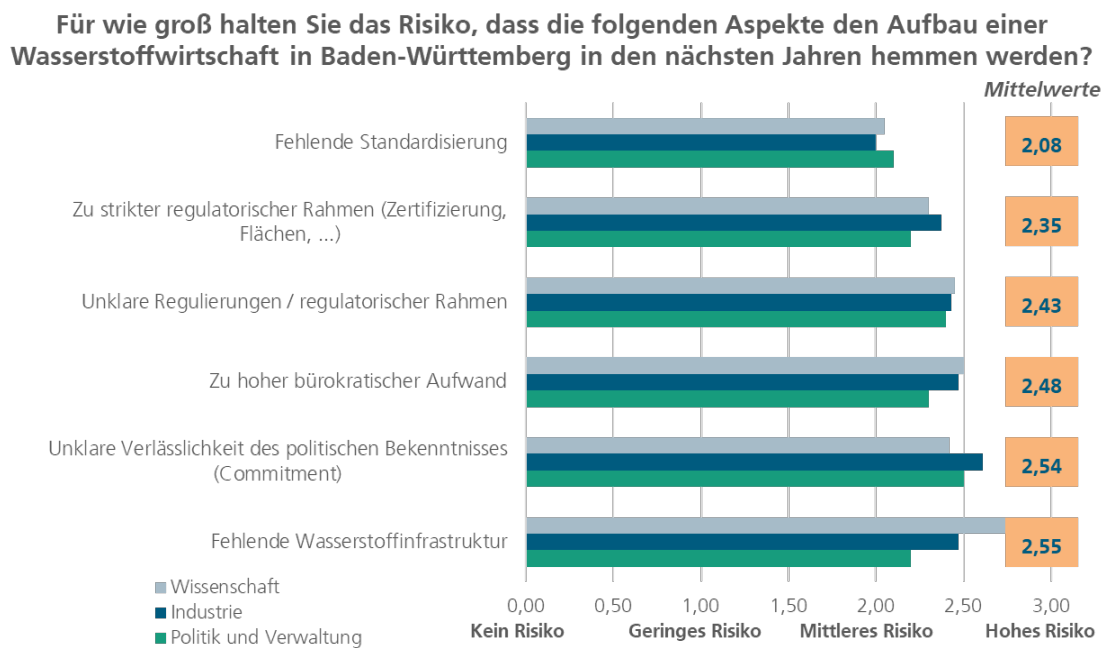
Abbildung 9: Einordnung, welche Akteure nun in der Verantwortung stehen, um die Hemmnisse der Dimension Markt abzubauen (gemittelte Platzierung)



Quelle: Eigene Darstellung

2.4 Institutionelle Faktoren

Institutionelle Rahmenbedingungen stellen eine zentrale Einflussgröße im Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft dar. Sie definieren die Spielregeln, innerhalb derer Innovations- und Investitionsprozesse stattfinden, und betreffen eine Vielzahl an normativen, organisatorischen und politischen Strukturen. Dazu zählen etwa regulatorische Vorgaben, politische Zielsetzungen, Verwaltungsabläufe oder auch der Ausbau kritischer Infrastrukturen. Diese Faktoren wirken sich direkt auf die Handlungsoptionen der beteiligten Akteure aus – darunter Unternehmen, Kommunen, Netzbetreiber, Forschungsinstitutionen und öffentliche Fördermittelgeber. Institutionelle Faktoren wurden im Rahmen der Begleitforschung als potenzielle Hemmnisse für den Aufbau eines regionalen Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg untersucht. Im Zuge der Befragung relevanter Stakeholder (vgl. methodisches Vorgehen, Kapitel 1.2) konnten zentrale Aspekte identifiziert werden, die als systemische Barrieren im institutionellen Gefüge wirken und insbesondere die Skalierung und Integration wasserstoffbasierter Technologien im Energiesystem hemmen. Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die wichtigsten institutionellen Hemmnisse, ihre Wirkung auf verschiedene Bereiche der Wasserstoffwertschöpfung sowie die spezifischen Herausforderungen, die sich daraus für Baden-Württemberg ergeben.

Abbildung 10: Eingeschätzte Relevanz der Hemmnisfaktoren in der Dimension Institutionelle Rahmenbedingungen

Quelle: Eigene Darstellung

I1: Fehlende Wasserstoffinfrastruktur

Ein zentrales institutionelles Hemmnis stellt der derzeit unzureichende Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur dar. Darunter fallen sowohl der fehlende Anschluss an nationale Pipelineprojekte (z. B. das Wasserstoff-Kernnetz oder das europäische Wasserstoff-Backbone-Netz) als auch regionale Verteilnetze und Importmöglichkeiten über Häfen. Zudem mangelt es an Wasserstofftankstellen, was insbesondere den Mobilitätssektor betrifft. Dieser infrastrukturelle Mangel hemmt sowohl die Erzeugung als auch die Nachfrage: Produzenten haben keinen gesicherten Absatzweg, während potenzielle Nutzer aufgrund fehlender Versorgungsoptionen zurückhaltend bleiben. Damit manifestiert sich das viel zitierte „Henne-Ei-Problem“. Der Infrastrukturausbau erfordert große Investitionen, die häufig in der Verantwortung öffentlicher Akteure auf kommunaler, Landes- und Bundesebene liegen. In Baden-Württemberg bestehen erste Konzepte für einen regionalen Anschluss an Wasserstoffquellen sowie zahlreiche Projekte im Mobilitätsbereich. Die Ergebnisse der Umfrage verdeutlichen, dass der unzureichende flächendeckende Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur als der derzeit im Durchschnitt über alle Teilnehmer gravierendste limitierende Faktor für den Markthochlauf wahrgenommen wird. Dieses Ergebnis wird vorrangig durch Industrie und Wissenschaft vorangetrieben, die Politik und Verwaltung sehen dieses Hemmnis als weniger hohes Risiko an.

I2: Unklare Verlässlichkeit des politischen Bekenntnisses (Commitment)

Die Entwicklung und der Aufbau eines Wasserstoffökosystems hängen wesentlich vom politischen Willen und der Verlässlichkeit langfristiger Zielsetzungen ab. Politische Rahmensetzungen – etwa das Verbrenner-Aus, Net-Zero-Ziele oder konkrete Fördermaßnahmen – geben Orientierung und Planungssicherheit für Investitionen. Wechselnde Regierungskoalitionen oder sich ändernde Prioritäten können dieses politische Commitment jedoch verwässern und die Verlässlichkeit mindern. In der Vergangenheit zeigte sich beispielsweise, dass angekündigte Fördermaßnahmen mitunter gekürzt oder verzögert wurden, was bei Unternehmen und Kommunen zu Zurückhaltung führte. Da Preisentwicklungen, Nachfrage und Infrastrukturaufbau stark von politischen

Rahmenbedingungen abhängen, führt Unsicherheit auf dieser Ebene zu Verzögerungen in der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette (z. B. unerwartete Streichung des Umweltbonus für Autos, die gewisse Vorgaben erfüllen). Auch in Baden-Württemberg ist das politische Engagement grundsätzlich vorhanden, doch eine langfristige Verstetigung der Zielsetzungen und Maßnahmen ist entscheidend, um Vertrauen bei privaten und institutionellen Akteuren aufzubauen. Die Umfrageergebnisse zeigen, dass die unklare Verlässlichkeit des politischen Commitments als ein bedeutender Hemmnisfaktor für den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft wahrgenommen wird. Insbesondere seitens der Industrie wird dies kritischer eingeschätzt als von Vertretern aus Wissenschaft, Politik und Verwaltung.

I3: Zu hoher bürokratischer Aufwand

Bürokratische Prozesse gelten regelmäßig als Innovationshemmnis – dies trifft auch auf die Wasserstoffwirtschaft zu. Der hohe administrative Aufwand bei der Beantragung von Genehmigungen, Fördermitteln oder beim Nachweis regulatorischer Anforderungen bindet personelle Ressourcen und führt zu erheblichen Zeitverzögerungen. Insbesondere kleinere Unternehmen und Kommunen sehen sich mit komplexen Formularen, langen Bearbeitungszeiten und dem Bedarf an Spezialwissen konfrontiert, was die Umsetzung von Projekten erschwert. Konkrete Beispiele sind der langwierige Genehmigungsprozess für Elektrolyseure, bei dem sowohl umweltrechtliche als auch bauliche Vorgaben zu erfüllen sind, sowie die komplizierte Antragstellung bei Bundes- oder EU-Förderprogrammen. Solche Hürden betreffen alle Bereiche – Erzeugung, Infrastruktur und Nutzung – und bremsen den systemweiten Hochlauf. Der hohe bürokratische Aufwand wird in den Umfrageergebnissen insbesondere von Akteuren aus Wissenschaft und Politik als ein maßgeblicher Hemmnisfaktor bestätigt. Politische Repräsentanten selbst schätzen das damit verbundene Risiko hingegen tendenziell zurückhaltender ein.

I4: Unklare Regulierungen und fehlender regulatorischer Rahmen

Ein weiterer Hemmnisfaktor ist die Unsicherheit in Bezug auf den regulatorischen Rahmen. Zahlreiche Projekte im Bereich der Wasserstoffwirtschaft werden derzeit unter Bedingungen geplant, deren rechtliche Grundlagen noch nicht eindeutig definiert sind. Dies betrifft z. B. Fragen der Einspeisung von Wasserstoff in bestehende Gasnetze, die Zertifizierung von grünem Wasserstoff oder die Ausgestaltung zukünftiger Anreizsysteme. Die Unklarheit erzeugt Investitionsrisiken, da unklar bleibt, ob Projekte langfristig tragfähig oder überhaupt genehmigungsfähig sind. In Baden-Württemberg wie auch bundesweit fehlt es noch an rechtssicheren Standards für viele dieser Aspekte, was zielgerichtetes Handeln erschwert, maßgeblich zu Verzögerungen beiträgt und insbesondere für neue Marktakteure ein erhebliches Risiko darstellt. Unklare Regulierungen werden den Umfrageergebnissen zufolge von allen drei Akteursgruppen in vergleichbarem Maße als hemmender Faktor eingeschätzt.

I5: Zu strikter regulatorischer Rahmen

Neben der Unklarheit bestehender Regelungen kann auch ein zu rigider regulatorischer Rahmen hemmend wirken. Vorschriften zum Umwelt-, Natur- und Lärmschutz, zur Flächenverfügbarkeit oder zur Anlagensicherheit stellen zwar wichtige Schutzmechanismen dar, führen aber in der Praxis häufig zu Einschränkungen bei der Umsetzung von Projekten. So kann beispielsweise die Errichtung von Elektrolyseanlagen oder Wasserstofftankstellen durch Vorgaben zu Mindestabständen, Lärmemissionen oder Sicherheitszonen zeitaufwendig und teuer machen (NOW GmbH 2022; Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) 2024; Plattform H2BW 2023a). In dicht besiedelten oder stark regulierten Regionen Baden-Württembergs ist die Flächenverfügbarkeit für solche Anlagen ohnehin begrenzt, sodass regulatorische Vorgaben dort besonders ins Gewicht fallen. Ein weiteres Beispiel sind die Vorgaben für den Netzanschluss von Elektrolyseuren, die zu

einer Verweigerung des Netzanschlusses führen können und damit den Aufbau entsprechender Wasserstofferzeugungskapazitäten einschränken können (50Hertz et al. 2024; Deutscher Wasserstoff-Verband DWV 2024; Kalis 2019).

Im Vergleich zu anderen identifizierten Hemmnissen wird das Risiko in diesem Bereich in den Umfrageergebnissen insgesamt etwas geringer eingeschätzt – insbesondere von Umfrageteilnehmenden aus der Politik. Industrieakteure hingegen bewerten die Relevanz dieses Hemmnisfaktors tendenziell etwas höher.

I6: Fehlende Standardisierung

Ein bislang häufig unterschätztes Hemmnis ist der Mangel an technischen und prozessualen Standards. An den Schnittstellen zwischen Technologien verschiedener Anbieter – etwa bei der Verbindung von Elektrolyseuren, Speicherlösungen und Verbraucheranlagen – fehlen einheitliche Spezifikationen. Dies erschwert die Integration, erhöht die Kosten für Wartung und Betrieb und mindert die Vergleichbarkeit bei der Beschaffung. Auch aus Sicht von Kommunen und öffentlichen Trägern stellt die fehlende Standardisierung ein Problem dar, da sie Investitionsentscheidungen und Ausschreibungen verkompliziert. In Baden-Württemberg bestehen Ansätze zur Standardentwicklung, etwa über Clusterinitiativen oder Forschungsprojekte, jedoch fehlen bislang übergreifende verbindliche Normierungen. Die Erfahrung der Akteure zeigt, dass die fehlende Standardisierung derzeit eine moderate Rolle spielt und im Vergleich zu anderen Hemmnissen als weniger gewichtet bewertet wird.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass institutionelle Faktoren als zentrale Hemmnisse für den Aufbau eines Wasserstoffökosystems in Baden-Württemberg wahrgenommen werden. Als besonders herausfordernd werden dabei der unzureichende Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur, die unklare Verlässlichkeit des politischen Commitments, ein hoher bürokratischer Aufwand, unklare oder restriktive regulatorische Rahmenbedingungen sowie die fehlende Standardisierung entlang der Wertschöpfungskette eingeschätzt. Diese Faktoren wirken sich teils isoliert, teils im Zusammenspiel hemmend auf Investitions- und Innovationsentscheidungen aus. Gezielte regulatorische Klarheit, verlässliche politische Zielsetzungen, effiziente Verwaltungsprozesse sowie der koordinierte Ausbau kritischer Infrastrukturen gelten daher als zentrale Stellschrauben für die erfolgreiche Entwicklung eines regionalen Wasserstoffökosystems.

2.4.1 Erfahrungen der Modellregionen

Ein zentrales institutionelles Hemmnis für den Ausbau der Wasserstoffwirtschaft ergibt sich aus der Genehmigungspflicht für Elektrolyseanlagen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Seit der Dritten Verordnung zur Änderung der 4. BImSchV vom 12. November 2024 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2024), wurden Elektrolyseure erstmals gezielt reguliert. Dabei wurden sie aus der Gruppe der Industrieemissionsanlagen herausgenommen und in eine neue Kategorie verschoben. Elektrolyseure mit einer elektrischen Nennleistung von unter 5 MW sind grundsätzlich nicht genehmigungspflichtig nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. Für Anlagen ab 5 MW greift ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren (Deutscher Bundestag 2024a), sofern die tägliche Wasserstoffproduktion unter 50 Tonnen liegt. Zudem ist ab einer elektrischen Leistung von 5 MW eine standortbezogene und ab 50 MW eine allgemeine Vorprüfung nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) erforderlich, was den Planungsaufwand weiter erhöht (Deutscher Bundestag 2021a). Zwar wurde damit rechtliche Klarheit geschaffen und die bisherige Unsicherheit über die Genehmigungspflicht beseitigt, jedoch stellt das Verfahren – insbesondere für Pilot- und Demonstrationsvorhaben – weiterhin eine erhebliche bürokratische Hürde dar. Gerade weil Genehmigungsbehörden oft nur begrenzte Erfahrung mit Wasserstofftechnologien haben. In der Praxis können Verfahren in Einzelfällen bis zu

mehreren Jahren dauern, wie aus Regionen in Baden-Württemberg berichtet wurde – mit erheblichen finanziellen Folgen für Projektentwickler.

EU-Vorgaben wirken zusätzlich hemmend: Der Delegierte Rechtsakt zur Definition von erneuerbarem Wasserstoff verlangt ab 2028 den ausschließlichen Einsatz neuer und nicht geförderter Wind- und Solaranlagen und eine zeitliche Übereinstimmung zwischen dem erzeugten Strom aus diesen Anlagen und dessen Nutzung zur Wasserstoffherzeugung. Diese Vorgabe wird in der Modellregion als praxisfern kritisiert, da sie eine gemeinsame Projektierung neuer EE-Anlagen notwendig macht – in einer ohnehin herausfordernden Planungsumgebung.

Auch die fehlende Standardisierung stellt ein zentrales Problem dar. Unterschiedliche technische Anforderungen, etwa bei Tankprotokollen für Lkw oder Trailern, verzögern Projekte. Zudem verhindern einige Marktakteure bewusst einheitliche Lösungen, um patentrechtliche Vorteile zu sichern. Dies behindert die Skalierbarkeit und hemmt den Marktzugang neuer Anbieter.

Hinzu kommt die unstete Förderpolitik auf Bundesebene. Das Auf und Ab der Förderprogramme wird von vielen Akteuren als unzuverlässig wahrgenommen. So wurde etwa die Förderung für H₂-Fahrzeuge eingestellt, während wichtige Infrastrukturen wie Tankstellen oder Verteilnetze nicht ausreichend unterstützt werden. Auch der bevorstehende Wegfall der Netzentgeltbefreiung für strombasierte Wasserstoffproduktion sorgt für Verunsicherung. Besonders Start-ups leiden unter dieser Unbeständigkeit – ihnen fehlen häufig Referenzprojekte, einheitliche Rahmenbedingungen und verlässliche Förderung, was Investitionen und Markteintritt erschwert. Ein prominentes Beispiel dafür, wie externe Schocks Innovationsbemühungen hemmen, war der Wegfall der Fördermittel aus dem Klima- und Transformationsfonds nach dem Gerichtsurteil 2023 (Bundesverfassungsgericht 2023).

Die im EU-Delegierten Rechtsakt zur Definition von erneuerbarem Wasserstoff verankerte Vorgabe besagt, dass ab 2028 für die Produktion von grünem Wasserstoff nur noch Wind- und Solaranlagen genutzt werden, die nicht älter als 36 Monate sind, bevor sie im Rahmen eines Power Purchase Agreements (PPA) oder per Direktleitung genutzt werden dürfen. Außerdem dürfen diese Anlagen keine laufende operative oder Investitionsförderung mehr erhalten. In der Modellregion wird diese Vorgabe als hemmend wahrgenommen. Die damit verbundene gemeinsame Projektierung einer entsprechenden Erzeugeranlage ist in der ohnehin herausfordernden Situation eine weitere Hürde. Hinzu kommt, dass zur ausreichenden Auslastung eines Elektrolyseurs durch erneuerbare Energien umfangreichere PPAs abgeschlossen werden müssen, als bei einer ermöglichten Nutzung von Netzstrom notwendig wären. So nehmen Akteure aus den Modellregionen die EU-Definitionen für grünen Wasserstoff als stark hemmenden Faktor für einen europäischen Markthochlauf wahr.

2.4.2 Abhängigkeiten und Handlungsspielräume

Um die Herausforderungen im Bereich Regulierung zu adressieren, verfügen die Akteure in den Modellregionen nur in begrenztem Maße über direkte Gestaltungsmöglichkeiten. Dennoch bestehen relevante Handlungsspielräume, um regulatorische Hürden sichtbar zu machen, regionale Prozesse zu koordinieren und gezielt Impulse in den politischen Raum zu senden.

Eine wesentliche Abhängigkeit liegt in komplexen regulatorischen Anforderungen und bürokratischen Verfahren, die häufig auf Bundes- oder EU-Ebene verankert sind. Genehmigungsprozesse sind oftmals mehrstufig, fragmentiert und durch unterschiedliche Zuständigkeiten geprägt. Die Modellregionen können hier durch eine systematische Sichtbarmachung der Herausforderungen sowie den Aufbau regionaler Kompetenznetzwerke zur Beschleunigung und Entlastung beitragen.

Auch im Bereich des politischen Commitments bestehen Abhängigkeiten – etwa durch wechselnde Prioritäten auf Bundes- und Landesebene oder haushaltsrechtliche Unsicherheiten. Handlungs-

spielräume ergeben sich beispielsweise durch aktive Öffentlichkeitsarbeit, regionales Lobbying sowie das Aushandeln von Zielvereinbarungen mit politischen Entscheidungsträgern.

Begrenzt ist der regionale Gestaltungsspielraum zudem beim schleppenden Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur, der primär von überregionalen Akteuren wie Netzbetreibern, dem Bund oder der EU vorangetrieben wird. Dennoch können Modellregionen durch frühzeitige Bedarfsabfragen auf die Entwicklung integrativer Netzinfrastrukturkonzepte sowie eine strategische Vernetzung mit Infrastrukturakteuren proaktiv Einfluss nehmen.

Auch der Mangel an Standardisierung wird häufig als strukturelles Hemmnis identifiziert, dessen Lösung zumeist auf internationaler oder europäischer Ebene verhandelt wird und regionale Akteure in eine externe Abhängigkeit drängt. Über Standardisierungsprojekte mit Industriepartnern und Mitarbeit in Normungsgremien könnten wichtige Impulse gesetzt werden.

Ein weiterer Engpass ergibt sich durch einen mitunter zu strikten regulatorischen Rahmen – etwa im Umwelt-, Bau- oder Sicherheitsrecht. Hier können kommunale Interpretationsspielräume sowie standortbezogene Konzepte mit frühzeitiger behördlicher Einbindung den Handlungsspielraum erweitern.

Die Modellregionen sind in vielen dieser Bereiche bereits aktiv – etwa durch Kooperationsnetzwerke, politische Kommunikation und Pilotprojekte. Eine Übersicht der zentralen externen Abhängigkeiten sowie der bestehenden Handlungsmöglichkeiten ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Abhängigkeiten und Handlungsspielräume in der Dimension Institutionelle Rahmenbedingungen

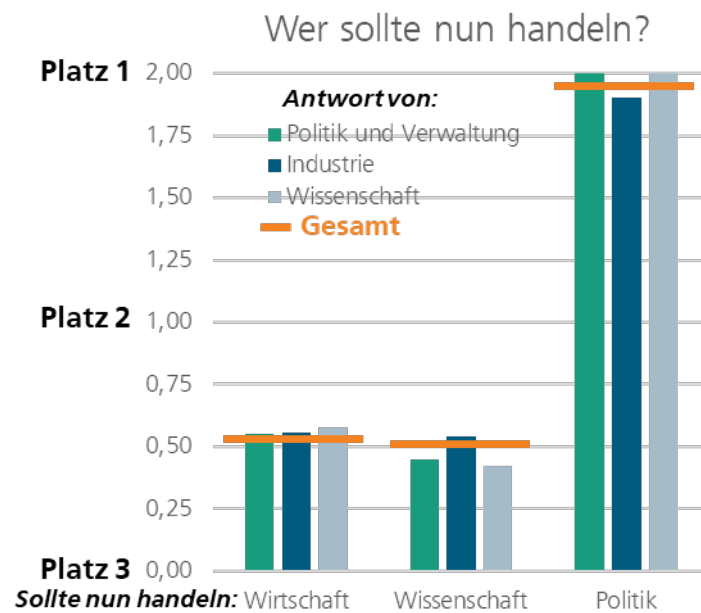
	Externe Abhängigkeit (z. B. zu Akteur, oder Gegebenheit)	Kann die Modellregion beeinflussen durch... / Kann in den Regionen beeinflusst werden durch...
Regulierungen/ Bürokratie	• Politische Rahmenbedingungen, Bundes- und EU-Verwaltungsvorgaben, Mehrstufigkeit der Genehmigungen • Klare nationale Vorgaben für Transformationspläne • Bürokratische Hürden bei Fördermittelzugang	• Transparentmachen der Herausforderungen • Kompetenztransfer innerhalb der Modellregionen • Erfahrene Berater in Förderantragsstellung einbeziehen • Team mit Know-How in EU-Förderrichtlinien aufbauen
Politisches Commitment	• Politische Rahmenbedingungen, Wechselnde Bundes-/Landespolitik, haushaltsrechtliche Unsicherheiten	• Lobbying, regionale Zielvereinbarungen, Öffentlichkeitsarbeit • Kooperation mit anderen Kommunen und Ländern • Politisches Engagement (regional/national/international) • Briefing von politischen Entscheidungsträgern • Etablierung eines Energiebeirats

	Externe Abhängigkeit (z. B. zu Akteur, oder Gegebenheit)	Kann die Modellregion beeinflussen durch... / Kann in den Regionen beeinflusst werden durch...
Fehlende H2- Infrastruktur	• Ausbau durch Bund, EU, private Netzbetreiber • Private und öffentliche Finanzierung über den Kapitalmarkt	• Frühzeitige Bedarfsabfrage, Regionale Netzintegrationskonzepte • Eigene Infrastruktur aufbauen – Modellregion als Keimzelle • Kleine Verbindungen, geschlossene, dezentrale Systeme • Projektentwicklung und Pilotprojekte mit mehreren Partnern als Konsortialmodell zur Ressourcenbündelung (Unternehmen, Forschungsinstituten, Verkehrsunternehmen) • Projektgesellschaften zur Finanzierung von Infrastruktur • Mobilisierung privater Kapitalgeber
Fehlende Standardi- sierung	• Internationale Normungs- gremien, Marktfragmentierung • „Standardisierungsaktivitäten laufen auf internationaler Ebene ab und erfordern teilweise politischen Willen“	• Clusterarbeit, Standardisierungsprojekte mit Industriepartnern, Mitarbeit in Normungsgremien
Zu strikter regulatorischer Rahmen	• Umwelt, Bau, und Sicherheitsrecht, Flächenvorgaben • Transformationsplanung für Gasverteilnetze • Verknüpfung von EnWG, WPG • und GEG	• Standortkonzepte mit frühzeitiger Einbindung komplementärer Akteure, kommunale Regelinterpretation nationaler Vorgaben • Integration von Wärme- und Gasnetzplanung

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Interviews, Workshops, Diskussionen und Literatur

Die Umfrage (Abbildung 11) verdeutlicht, dass aus Sicht aller befragten Akteursgruppen die Politik vorrangig gefordert ist, institutionelle Hemmnisse zu adressieren. Wirtschaft und Wissenschaft folgen mit deutlichem Abstand. Der auffällig einhellige Handlungsappell an die Politik ist, ob dessen zentraler Rolle bei der Schaffung gesetzlicher Rahmenbedingungen und in entsprechenden politischen Entscheidungsprozessen, wenig überraschend.

Abbildung 11: Einordnung, welche Akteure nun in der Verantwortung stehen, um die Hemmnisse der Dimension Institutionelle Rahmenbedingungen abzubauen (gemittelte Platzierung)



Quelle: Eigene Darstellung

3 Handlungsempfehlungen

Im vorigen Kapitel wurden Hemmnisfaktoren für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in innovierenden Modellregionen vorgestellt und mögliche Handlungsspielräume für die Modellregionen sowie externe Abhängigkeiten diskutiert. Akteure in und um die Modellregionen in Baden-Württemberg haben in Bezug auf diese Hemmnisse teilweise klare Forderungen, Wünsche oder Empfehlungen, welche Schritte von Seiten der Politik notwendig wären, um den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen. Diese Perspektiven werden zunächst dargestellt und eingeordnet, bevor wir aus den diskutierten Aspekten in diesem White Paper Empfehlungen aus Sicht der Begleitforschung formulieren.

3.1 Perspektive der Modellregionen in Baden-Württemberg

Die Modellregionen haben in einigen Fällen bereits Handlungsempfehlungen formuliert, verweisen zum Teil auf bestehende Empfehlungen (z. B. Lassen et al. 2025) oder treffen in Gesprächen, Interviews und Workshops Einordnungen von Handlungsspielräumen. Diese beziehen sich nicht notwendigerweise ausschließlich auf politische Akteure. Im Folgenden werden die wichtigsten Themen und Empfehlungen einsortiert.

Handlungsempfehlung im bundesweiten Außenraum

Deutschlandweit gibt es viele Akteure, Verbünde und Lobbygruppierungen die bereits Empfehlungen und Forderungen an die Bundespolitik ausgesprochen hat. Auf entsprechende Papiere verweisen auch Akteure aus den Modellregionen, da hier zum Teil bereits klar formulierte Empfehlungen zu konkreten Regulierungen oder Förderschemata vorliegen.

Als prominentestes Beispiel sind hier die Empfehlungen „Fünf vor 2030“ des Deutschen Wasserstoffverbands zur 21. Legislaturperiode zu nennen, die viele der oben genannten Hemmnisfaktoren adressieren. Zur Mitigation hemmender Kostenfaktoren finden sich dort Vorschläge zur Senkung der Stromkosten, der zeitlichen Entfristung der Netzentgeltbefreiung für Elektrolyseure oder der langfristigen Absicherung attraktiver Zinssätze. Die Marktdimension wird durch eine Vielzahl an Empfehlungen adressiert, wie beispielsweise der Wiedereinführung von Fördermitteln in der Mobilität, das Ermöglichen der Nutzung von Netzstrom zur Erzeugung von kohlenstoffarmem Wasserstoff, Ausschreibungen für Elektrolyseure, Ausbau von Tankstellen und Privilegierungen im Bau-recht. Ebenso vielfältig sind die Empfehlungen, welche auf die institutionellen Hemmnisfaktoren einzahlen würden: Beschleunigungen der Genehmigungsverfahren für Wasserstoffnetze, -kraftwerke und -speicher, Festlegung von Wasserstoff-Reinheitsgraden für Brennstoffzellenanwendungen oder der Umsetzung eines europäischen Herkunftsnachweissystems. Nur wenige Empfehlungen lassen sich den Hemmnissen aus der Dimension Wissen zuordnen – darunter fällt zum Beispiel das Schaffen von Klarheit für Industrie und Gewerbe mit Hinblick auf eine mögliche künftige Anbindung an das Wasserstoffkernnetz. (Lassen et al. 2025)

Empfehlungen und Anregungen aus den Modellregionen

Auch in den Modellregionen selbst kristallisieren sich zunehmend konkretere Wünsche und Forderungen an die Landes- und Bundespolitik heraus, die einerseits teilweise Eingang in publizierte Handlungsempfehlungen gefunden haben (z. B. Bund der Wasserstoffregionen 2024), andererseits in Diskussionen und Gesprächen immer wieder aufgegriffen werden.

So wird grundsätzlich eine zunehmende finanzielle Unterstützung durch Bund und Land gewünscht, um die hohen Kosten für die Realisierung von Wasserstoffhubs aufzufangen. Im Wettbewerb mit

etablierten fossilen Energieträgern sind innovative grüne Technologien wie klimaneutraler Wasserstoff durch die notwendigen hohen initialen Investitionen im Nachteil. Daher sind Maßnahmen notwendig, die eine wettbewerbsfähige Finanzierung von grünem Wasserstoff ermöglichen – als ein Bestandteil sei dafür eine umfangreiche Förderung von Elektrolyseuren genannt oder zumindest eine langfristige Netzentgeltbefreiung für diese.

Besonders wichtig sei hierbei die Sicherung der Nachfrageseite durch die Etablierung von Leitmärkten für grünen oder kohlenstoffarmen Wasserstoff. Die Umweltförderung für Fahrzeuge war in der Vergangenheit ein – insbesondere im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge – relevanter Bestandteil davon, dessen Wiedereinführung von vielen Akteuren aus den Modellregionen gefordert wird. Aber auch andere Erleichterungen für klimaneutrale Fahrzeuge, wie beispielsweise die diskutierte Mautbefreiung, seien hier sinnvolle Maßnahmen. Schließlich könne Wasserstoff im Schwerlastverkehr zu höheren Preisen vertrieben werden als in anderen Sektoren, während zugleich der Aufbau der hierfür erforderlichen Tankinfrastruktur auch umfangreiche regionale Erzeugungskapazitäten für Wasserstoff schaffen würde. Die verlässlichen Bedarfe nach grünem Wasserstoff sollte aber ebenso in anderen Sektoren, wie der Industrie, regulatorisch gestützt werden. Ebenso sollte der Betrieb von Wasserstoffspeichern durch entsprechende Preissignale gefördert werden.

Für die Regionen selbst spielen sinnvolle Gasverteilinfrastrukturen eine zentrale Rolle. Daher sollte geprüft werden, inwieweit bestehende Infrastrukturen sinnvoll weitergenutzt werden können und Wege erschlossen werden, breite Gebiete an das geplante Wasserstoffkernnetz anzuschließen. Hier sei es besonders wichtig Klarheit zu schaffen, in welchen Zeiträumen welche Infrastrukturen in welchem Umfang genutzt werden können. Bis zur Fertigstellung des Wasserstoffkernnetzes sei auch eine regulatorische Rahmenbedingung zur Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz sinnvoll.

Von politischen Akteuren und der gesetzlich geregelten Regulatorik ist dabei ein klares Bekenntnis verlangt, in welchen Zeiträumen auf welche (fossile/grüne) Energieträger zurückgegriffen werden kann, um Planungssicherheit zu schaffen. Ebenso sei eine Analyse und entsprechende Übersicht über die entstehenden Bedarfe in den verschiedenen Sektoren, Erzeugerkapazitäten (von Wasserstoff und erneuerbaren Energien) und Verteilinfrastrukturen notwendig.

Schließlich seien umfangreiche Informationsangebote notwendig. Einerseits betrifft dies mögliche Endkunden, die beim Energiemanagement beraten werden sollten, Politik und Verwaltung, die für die Potenziale und Herausforderungen von Wasserstofflösungen sensibilisiert werden sollten, sowie die Bürger:innenschaft, die über Mehrwerte informiert, aber auch über Beteiligungsformate eingeladen werden sollte, Teil der auf Wasserstofftechnologien basierenden Transformationen zu werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Modellregionen insbesondere Maßnahmen zur Schaffung von wirtschaftlichen Angeboten und nachhaltiger Nachfrage fordern, um sowohl kurz- als auch langfristige Unsicherheiten des Wasserstoffhochlaufes abzufedern.

3.2 Einordnung aus Perspektive der Begleitforschung

Die Herausforderungen, Hemmnisse, Risiken auf der einen Seite, aber auch der Handlungsspielräume und Abhängigkeiten von externen Akteuren auf der anderen Seite, sind ausgesprochen vielfältig, wie die Analyse auf den obigen Seiten demonstriert hat. Dennoch haben sich klare Trends und Profile herausgebildet, in welchen Bereichen die Handlungsoptionen zur Unterstützung des Aufbaus eines Wasserstofföko- und -innovationssystems ausgeschöpft werden sollten.

Klare Rahmenbedingungen schaffen

Die Modellregionen sehen sich sowohl auf der regionalen Mikro- und Mesebene als auch in ihrer Einbettung im deutschen makroökonomischen Gesamtsystem mit signifikanten Unsicherheiten in den politisch-regulatorischen und den techno-ökonomischen Rahmenbedingungen konfrontiert.

Diese Unsicherheiten gilt es so weit wie möglich aufzufangen oder aufzulösen. Dies sollte stets vor dem Hintergrund des regionalen Profils in Bezug auf Wasserstoffangebot, -nachfrage und -technologiekompetenz geschehen und die mögliche Wertschöpfung und Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in der Region im Blick haben.

Lange galt Wasserstoff als der Treibstoff für die Mobilität der Zukunft. Angesichts rasanter Erfolge in der batterie-elektrischen Mobilität wird in der Fachwelt inzwischen jedoch kontrovers darüber diskutiert. Auf Basis kurz- und mittelfristiger direkter Kosten der Klimatransformation sehen viele Experten aufgrund der hohen Gesamtsystemeffizienz die Batterie im Mobilitätssektor in einer zentralen Rolle. In Märkten mit besonderen Leistungsanforderungen, wie zum Beispiel den Schwerlastverkehr, besteht über den künftigen Technologiemarkt jedoch kein abschließender Konsens. Bezieht man auch indirekte Faktoren und Kosten wie etwa den regionalen Strukturwandel, Aspekte der Technologiesouveränität, die unterschiedlichen Randbedingungen in den verschiedenen internationalen Märkten mit ein, könnte sich das Bild nochmals wandeln.

In Baden-Württemberg sollte eine politische Positionierung darüber, welche Rolle die Wasserstoffmobilität regional spielen soll, dementsprechend berücksichtigen, dass regionale Akteure zu den wichtigsten globalen Brennstoffzellentwicklern oder -integratoren zählen. Eine frühzeitige politische Festlegung auf technologiepräferierende (oder technologieoffene) Förderstrategien hätte entsprechende wirtschaftliche Implikationen für den Technologiestandort Baden-Württemberg. In diesem Zusammenhang wäre für die Modellregionen vor allem Klarheit über die politischen Zielsetzungen und die lokalen technoökonomischen Potenziale wertvoll, um strategische Planungen auf einer belastbaren Grundlage vornehmen zu können. Diese Diskussion lässt sich auch auf andere Wasserstofftechnologien übertragen. Es sollte daher, wo möglich, möglichst frühzeitig eine politische Einordnung kommuniziert werden, in welchen Anwendungsbereichen auf Direktelektrifizierung gesetzt wird (Batterieelektrische Mobilität, Wärmepumpen, ...) und wo förderpolitisch technologieoffene Ansätze präferiert werden. Hierbei sollte die Ambition der Technologieoffenheit aber nicht dazu missbraucht werden, Lösungen mittel- bis langfristig zu fördern, die in den kommenden Energietransformationen nicht im relevanten Maßstab als vielversprechend erscheinen.

Ebenso sollte grundlegende Klarheit über die europäischen, bundes- und landespolitischen Erkenntnisse zur Umsetzung der Klimaziele geschaffen werden. Zuletzt wurde das Vertrauen in Zielsetzungen, wie dem sogenannten „Aus für Verbrennungsmotoren“ auf europäischer Ebene, durch zunehmende Forderungen, auch relevanter politischer Akteure, nach Aufweichungen geschwächt. Die politischen Ziele in Bezug auf die Transformationen der relevanten Sektoren sollten klar kommuniziert werden, um Planbarkeit bei allen relevanten Akteuren herzustellen.

Diese Forderungen übersetzen sich auf der Makroebene zugleich in transparente und möglichst langfristig angelegte Regulatorik. Dies beinhaltet einerseits eine Gesetzgebung, die Regelungen und Förderungen auf entsprechend langfristige Zeiträume ausrichtet, andererseits auch eine Kommunikation oder Festlegung darauf, in welcher Art und Weise und zu welchen Zeitpunkten über Fristverlängerungen entschieden wird (z. B. für Netzentgeltbefreiung von Elektrolyseuren). Auch gänzliche Entfristungen von wasserstoffinnovationsfördernden Gesetzestexten sind in bestimmten Fällen denkbar.

Ein erster Schritt sind die im Sommer 2025 verabschiedeten europäischen Standards für kohlenstoffarmen Wasserstoff. Darauf aufbauend sollten klare Regularien und Zertifizierungen definiert und umgesetzt werden, die Klarheit über Wasserstoffklassifizierungen entlang der

Wertschöpfungskette bringen (Herkunftsnachweise, grüner Wasserstoff, kohlenstoffarmer Wasserstoff, ...). Dies sind insbesondere wichtige Voraussetzungen für einen effizienten Wasserstoffhandel. Auch im technischen Sinne sind Standards, z. B. bei den Anforderungen zu Reinheitsgraden von Wasserstoff für Brennstoffzelltechnologien, ein sinnvolles Mittel, um Technologiekompatibilitäten möglich zu machen. Ebenso scheinen die von Akteuren aus dem nationalen Wasserstoffökosystem geforderten qualitativen Kriterien für Elektrolyseure in Bezug auf Nachhaltigkeit und den ökologischen Fußabdruck als eine sinnvolle Maßnahme für mehr Klarheit.

Aber auch auf der Meso- und Mikroebene ist der Bedarf nach Klarheit sehr groß. Dies ist in der Vergangenheit in den Genehmigungsverfahren für Elektrolyseure deutlich geworden, für die im Rahmen der Modellregionen erst Erfahrungen gesammelt werden mussten. Dies lässt sich durchaus als Erfolgsgeschichte betrachten, da durch die Förderung von Modellregionen frühzeitig ein gezielter Impuls zum Aufbau adäquater Prozesse gesetzt wurde. Allerdings sollten die Erfahrungen dafür aggregiert und landesweit den Regierungspräsidien und möglichen Anwendern zugänglich gemacht werden, um schon kurzfristig Beschleunigung in den Genehmigungsverfahren erzielen zu können. Hier ließe sich über eine Art exemplarische Modellgenehmigung diskutieren, die landesweit als Best-Practice zugänglich gemacht wird, um einfache und schnelle Genehmigungsverfahren zu unterstützen.

Auf Meso- und Mikroebene sind zusätzlich die Daten, auf denen Einschätzungen über künftige Marktperspektiven von Wasserstoff getroffen werden kann, oft nur eingeschränkt verfügbar. Hier könnte mehr Klarheit für alle Stakeholder geschaffen werden, indem eine Datenplattform zu möglicherweise entstehenden Wasserstoff-Bedarfen (z. B. in der Industrie aus Prozesswärme), -Angeboten (Elektrolyseure, Tankstellen) und -Transportwegen (Pipelines, Anschlüsse ans Wasserstoff-Kernnetz) aufgesetzt würde, die niederschwellig zugänglich gemacht werden sollte. Um eine möglichst vollständige Abdeckung in der Datenplattform zu erreichen ist eine regulatorische Begleitung notwendig. So können strategische Planungen von Akteuren in den Modellregionen unterstützt werden. Darüber hinaus wäre ergänzend eine Übersicht über bestehende Anwendungsfelder von Wasserstoff(-technologien), verknüpft mit entsprechenden Anforderungen an die Wasserstoffkosten, -mengen und -spezifikationen (Farbe, Reinheit, ...) sinnvoll.

Andererseits geht die Empfehlung mehr Klarheit zu schaffen auch in die Richtung aus den Modellregionen in die Kommunal- und Landespolitik, da diese möglichst transparent und effizient Überblick über die kurzfristigen Herausforderungen in den Modellregionen erhalten sollten, um möglicherweise steuernd oder unterstützend eingreifen zu können. Ein Ausgangspunkt ist in dieser Hinsicht mit den Veranstaltungen und Veröffentlichung im Rahmen der Modellregionen und der Begleitforschung hoffentlich gemacht – eine Verstetigung des Austausches sollte auch über die Projektlaufzeiten hinaus mitgedacht werden.

Klarheit in Verlässlichkeit übersetzen

Damit die Modellregionen ihre Rolle als Impulsgeber erfüllen können, brauchen Unternehmen verlässliche Rahmenbedingungen – nicht nur als politische Aussage, sondern durch konkrete Instrumente. Dies betrifft einerseits die oben bereits erwähnte langfristig angelegte Regulatorik und Gesetzgebung. Andererseits sollten auch – ebenfalls mit langfristiger Zielsetzung konstruierte – Anreizstrukturen geprüft werden, die die Schaffung des Marktes nachhaltig fördern.

Es könnten einzelne oder ein Mix der folgenden, oft diskutierten Förderhebel geprüft werden, um das Risiko der Marktteilnehmenden zu senken. Preisgarantien würden Sicherheit bei dem stark fluktuierenden Wasserstoffpreis schaffen, Abnahmegarantien oder langfristige kommunale Abnahmeverträge würde den Erzeugern von grünem Wasserstoff wirtschaftliche Sicherheit bieten und Ausfallbürgschaften an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette die Risiken der First Mover auffangen. Hierbei können ggf. hohe Kosten akkumulieren, insbesondere wenn Markt und

Wasserstoffpreis sich nur schwerfällig entwickeln. Dennoch ist insbesondere in dieser Phase der Marktentwicklung im Bereich des grünen Wasserstoffs ein regulatorisches Eingreifen, wenn man den ersten Marktakteuren und den Modellregionen Raum zur Vertiefung der Aktivitäten bieten möchte, angeraten.

Auch alternative Förderansätze, die den bestehenden Marktunsicherheiten und den diskutierten Hemmnisfaktoren mittelfristige Verlässlichkeit entgegensetzen, könnten geprüft werden, wie möglicherweise eine Incentivierung von langfristigen Liefer-/Abnahmeverträgen, durch die Verknüpfung von Förderungen an entsprechende Laufzeiten.

Hierbei sollte auch aus den Erfahrungen der jüngeren Vergangenheit gelernt werden, in der sich in einigen Fällen der Erfolg kurzfristig angelegter Investitionsunterstützungen für große oder teure Projekte zur Ansiedlung von Produktionsstandorten in Deutschland nicht eingestellt hat (Beispiele sind in Kapitel 2.3 diskutiert). Wenn sich für die Industrie für investitionsintensive Aktivitäten nicht mittel- und langfristig eine Wirtschaftlichkeit als vielversprechend abzeichnet, bleibt sie insbesondere in Deutschland zuletzt eher zurückhaltend.

Übergangsphase weitsichtig gestalten

Die vorangetriebenen Transformationen unserer Zeit und insbesondere der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft brauchen Perspektiven auf eine wirtschaftliche Übergangsphase. Auch den Modellregionen müssen Spielräume gewährt werden, um Versorgungssicherheit, Skalierung und Technologieerprobung gewährleisten zu können. Ohne die mittelfristigen Zielsetzungen zur Treibhausgasemissionsreduktion zu untergraben, sollte das Bewusstsein für eine weiche, aber ambitionierte Übergangsphase gegeben und in entsprechende Richtlinien übersetzt werden.

Für den Aufbau von Elektrolyseuren wären entsprechende Spielräume für die Erzeugung und den Verkauf von kohlenstoffarmem Wasserstoff aus überschüssigem Netzstrom sinnvoll, um den Betreibern kurzfristig einen wirtschaftlichen Eintritt in den Markt auf Basis sinnvoller Betriebsstrategien zu ermöglichen. In diesem Sinne wäre auch eine Aufweitung der entsprechenden Förderungen für grünen Wasserstoff auf wohldefinierten kohlenstoffarmen Wasserstoff im Rahmen einer Übergangszeit sinnvoll.

Ebenso sollte geprüft werden, inwieweit Brückentechnologien, wie wasserstoffbasierte Kraft-Wärme-Kopplung oder Wasserstoffverbrenner kurz- bis mittelfristig eingesetzt und entsprechend unterstützt werden könnten. Ein schnelles Marktwachstum potenziell grüner Technologien könnte mittel- bis langfristig mehr Treibhausgasemissionen einsparen, wenn bei deren Förderung kurzfristig nicht zu strikte Maßstäbe angelegt werden. Aber auch hier sollte auf klare und transparente Richtlinien gesetzt werden und eine kontinuierliche Evaluierung der Zweckmäßigkeit im Sinne der Marktentwicklung und der langfristigen Treibhausgasemissionsreduktion vorgesehen werden.

Märkte entwickeln und stimulieren

Ohne Marktzugang und Nachfrage in relevantem Umfang entstehen keine skalierbaren Geschäftsmodelle. Öffentliche Hand und Förderinstitutionen stehen dabei ebenfalls in der Verantwortung Nachfrage zu stimulieren und Innovationen durch Anreizsetzungen zu unterstützen.

Nicht zuletzt kann die öffentliche Beschaffung direkt substanzielle Nachfrage nach Wasserstoff und Wasserstofftechnologien erzeugen. So erscheinen Vorgaben in der öffentlichen Beschaffung, beispielsweise in Bezug auf den ökologischen Fußabdruck von Fuhrparks, Materialeinsatz (Stahl, Baustoffe) etc., auch weiterhin als probates Mittel, um Anreize für den Kauf grüner oder kohlenstoffarmer Technologien zu geben.

Aber auch die gezielte Ausschreibung für systemdienliche Elektrolyseure kann direkt auf Technologienachfrage- und Wasserstoffangebotsseite ein Baustein für eine Marktgenerierung darstellen.

Entsprechend der Zielsetzungen, die sich aus dem ersten Abschnitt „Klarheit schaffen“ ergeben und der Erkenntnisse, die in dem Absatz „Übergangsphase weitsichtig gestalten“ diskutiert sind, sind auch Ausschreibungen weiterer Wasserstofftechnologien möglich. Außerdem könnte dabei, entsprechend der Erkenntnisse, die in dem Absatz „Übergangsphase weitsichtig gestalten“ diskutiert sind, die Nutzung weniger strikter Wasserstoffklassifizierungen berücksichtigt werden.

Der Aufbau und Ausbau von Modellregionen zu regionalen Wasserstoffhubs, die Marktteilnehmende an unterschiedlichen Stellen der Wasserstoff-Wertschöpfungskette zusammenbringen und auch über die Region hinaus Nachfrage und Angebote schaffen sind sinnvoll. Die Modellregionen haben bereits umfangreiche Erfahrungen gemacht, den Blick auf Herausforderungen und Hemmnisse gelenkt, die vorher möglicherweise nicht im Bewusstsein der innovationsbegleitenden Akteure lag und umfangreiche Lernprozesse mit neuen Wasserstofftechnologien durchlaufen. Nun können sie als Keimzelle ausgebaut werden, um als Katalysator für den Aufbau einer landes- und bundesweiten Wasserstoffwirtschaft zu wirken. Kurzfristig wird dabei der Aufbau regionaler Marktplattformen für relevante Anwendungsgebiete, wie beispielsweise der Prozesswärme und Logistik sowie die Verwertung in Geschäftsmodellen, welche sich bereits jetzt mit grünem Wasserstoff wirtschaftlich umsetzen lassen, eine Rolle spielen.

Gesellschaftliche Akzeptanz im Blick halten

Bürger und Bürgerinnen aus der Allgemeinbevölkerung treffen in ihrer Meinungsbildung ähnliche Kosten- und Nutzenabwägungen wie andere Akteure. Ihre Akzeptanz von Wasserstoff bildet sich im Kosten-Nutzen-Vergleich verschiedener Technologien: bspw. wirtschaftlich ausgedrückt in der geringen Bereitschaft, Mehrkosten gegenüber der Alternativtechnologien zu tragen oder auch auf soziopolitischer Ebene in niedrigerer Akzeptanz von Wasserstoffeinsatz in Bereichen, in denen stattdessen die Direktelektrifizierung möglich wäre. Die vorangegangenen Handlungsempfehlungen sind daher auch für die gesellschaftliche Akzeptanz relevant, z. B. die klare Festlegung, in welchen Anwendungsbereichen der Einsatz von Wasserstoff sinnvoll ist und politisch unterstützt wird und wo nicht. Diese klaren Bekenntnisse und die Argumente, auf denen das Bekenntnis basiert, können dann kommuniziert werden.

Auch die in vorherigen Abschnitten angesprochenen Marktunsicherheiten sind akzeptanzrelevant. Bevölkerungsumfragen in den Modellregionen zeigen, dass die stärksten Bedenken wirtschaftlicher Art sind – spezifisch die Sorge, dass die Investition in Wasserstoffprojekte ein finanzielles Risiko für die eigene Kommune ist. Eine stabilere Marktsituation und die Außenkommunikation von verlässlichen Absatzmärkten und Liefervereinbarungen, wo diese bestehen, können daher zur Akzeptanz in der Bevölkerung beitragen. Der stärkste Motivator für die lokalen Wasserstoffprojekte ist in diesen Umfragen der Klimaschutz. Die klimafreundliche Wirkung von grünem Wasserstoff sollte also in der Kommunikation hervorgehoben werden. Umgekehrt ist für Projekte, in denen kein grüner Wasserstoff eingesetzt wird (bspw. die Dekarbonisierung von Prozessen mit grauem Wasserstoff, solange das Gesamtvolumen an lieferbarem grünem Wasserstoff niedrig ist), eine deutlich niedrigere Akzeptanz zu erwarten.

Die Lokalakzeptanz von Anwohnenden in der Nähe von Wasserstoffinfrastruktur sollte zusätzlich durch frühzeitige und transparente Information und, wo noch Entscheidungsspielräume bestehen, Beteiligung begünstigt werden. Das beinhaltet die transparente Kommunikation von Nachteilen, Risiken und Fehlern. Die Möglichkeit von nachteiligen Verschiebungen im Weltmarkt oder Sicherheitsvorfällen (auch in anderen Teilen Deutschlands oder der Welt, s. z. B. die Auswirkung des Atomunglücks in Fukushima auf die deutsche Debatte über nukleare Sicherheit), die über Medienberichte auch die Allgemeinbevölkerung erreichen, können Kommunen und Regionen nicht vermeiden. Eine Vertrauensbasis, die schon vorab durch konsistente und transparente Kommunikation

zwischen Anwohnenden und Projektierern geschaffen wurde, kann die negativen Wirkungen solcher Vorfälle aber abfedern.

In den Bereichen, in denen sich der sinnvolle Einsatz von Wasserstoff abzeichnet, hat die Allgemeinbevölkerung eher wenig Relevanz als Abnehmer von Wasserstoff. Die Marktakzeptanz für Direktkunden muss daher über andere Akteure wie z. B. Industrieabnehmer sichergestellt werden (s. die anderen Handlungsempfehlungen in diesem Kapitel).

Bildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen verstetigen

Die Bereitstellung von Qualifikationen und Kompetenzen ist entscheidend, um dem zukünftigen Bedarf von Fachkräften auf dem Arbeitsmarkt gerecht zu werden. Auch wenn aktuell eine sinkende Nachfrage seitens der auf dem Gebiet des Wasserstoffs aktiven Bildungsakteure in Baden-Württemberg zu beobachten ist, sollten entsprechende Maßnahmen quantitativ und qualitativ zumindest beibehalten werden. Ziel sollte es sein, Qualifikationen bereitzustellen, die der mittel- bis langfristigen spezifischen Nachfrage auf dem Arbeitsmarkt entsprechen, insbesondere in höheren Bildungsstufen und beruflicher Weiterbildung. Schwerpunkte sollten auf der Vernetzung mit Bildungsakteuren, der Verankerung von Wasserstoffthemen in Schulen, der Institutionalisierung von Wasserstofflotsen, der Ansiedlung von Stiftungslehrstühlen und der Organisation von Veranstaltungen zur Sensibilisierung und Wissensvermittlung liegen. Die Modellregionen könnten hierbei als Schnittstelle zwischen Wirtschaft, Bildung und Politik agieren und die Umsetzung dieser Maßnahmen moderieren. Darüber hinaus sollten die Hochschulen und Forschungseinrichtungen stärker in Bildungs- und Weiterbildungsinitiativen eingebunden werden. Dies umfasst die Integration von Wasserstoffthemen in die grundständige Lehre (Bachelor und Master), den Ausbau berufsbegleitender Weiterbildungsangebote und die Förderung von Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Dabei können spezifische Studiengänge wie Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien eine zentrale Rolle spielen. Die finanzielle Unterstützung durch die Landesregierung, etwa in Form von Gutscheinen, könnte die Teilnahme an diesen Programmen erleichtern. Insgesamt sollen diese Maßnahmen dazu beitragen, die Wasserstoffwirtschaft nachhaltig zu stärken und Kompetenzen für die Energiewende zu fördern.

4 Schlussfolgerungen

Die Rolle von Wasserstoff in den kommenden Transformationen bleibt unbestritten hochrelevant. Aktuell lässt sich beobachten, dass der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft langsam ins Rollen kommt. Lokale Projekte zur Wasserstofferzeugung mit Elektrolyseuren nehmen zu, das Wasserstoffkernnetz wird vorangetrieben und internationale Importstrategien von Wasserstoff und dessen Derivate haben in der Vergangenheit immer wieder Schlagzeilen gemacht.

Dem gegenüber steht allerdings die Beobachtung, dass die Prozesse in vielen Fällen nur äußerst zäh voranschreiten und in einigen Bereichen die Bemühungen bereits wieder erodieren, wie jüngste Strategiewechsel bei Wasserstofftankstellen zeigen. Dies lässt sich einerseits auf die sich einstellende Ernüchterung mit Hinblick auf die meist hohen Technologieerwartungen zurückführen, andererseits aber auch durch die Unsicherheiten, die durch unetische Politikwechsel erzeugt werden.

Diese Kombination aus bestehenden Aktivitäten und Kompetenzen auf der einen und zunehmende Rückschläge auf der anderen Seite erinnern nicht zuletzt an die Potenziale von vorhandenen deutschen Technologiekompetenzen, die in der Vergangenheit nicht zielstrebig genug genutzt wurden: so konnte sich die vormals sehr starke deutsche Solarindustrie nicht gegen die Konkurrenz aus Asien durchsetzen und auch die aktuell weiterhin breit vorhanden Kompetenzen im Bereich der Batteriezelltechnologien konnten zuletzt trotz Förderungen in einigen Fällen nicht in industrielle Produktionsstätten übersetzt werden. Auch bei diesen Technologien wurde das retardierende Moment, das nach der ersten von Motivation und Goldgräberstimmung geprägten Frühphase der Technologie aufgetreten ist, nicht ausreichend aufgefangen, sodass die zuerst bestehende Technologieführerschaft aufgegeben wurde. Nun sehen sich viele Wasserstofftechnologien mit der Notwendigkeit auseinandergesetzt, sich gegenüber Alternativtechnologien oder im Kontext der künftigen Strategiewetzung rechtfertigen zu müssen. Dabei sollten sich Staat und Politik gerade in der frühen Kommerzialisierungsphase weiterhin in der Verantwortung sehen. Das politische Handeln und die Gesetzgebung können wichtige Rahmenbedingungen schaffen, um Innovationsaktivitäten am Markt zu fördern, aber auch destruktive Signalwirkungen haben. So wie Technologiehypes meistens überzogen sind, besteht auch die Gefahr, dass auf diese anschließend übermäßiger Pessimismus, große Unsicherheit oder Skepsis folgt. In dieser Phase befinden wir uns gerade in Deutschland und Baden-Württemberg – daher ist nun ein Besinnen auf konstruktives Handeln aller Akteure im entsprechenden Innovationsökosystem gefordert.

Die Modellregionen erfüllen ihren Auftrag Erfahrungen zu sammeln und Keimzellen für überregionale Wasserstoffwirtschaft zu schaffen. Dabei sehen sie sich Herausforderungen gegenüber, die einerseits das lokale wirtschaftliche Handeln stark erschweren, andererseits aber genutzt werden können, um die Rahmenbedingungen auf Mikro- und Makroebene zu optimieren.

Damit das Konzept der Modellregionen auch weiterhin erfolgreich als Testballon für Wasserstoffökosysteme in Baden-Württemberg funktionieren kann, ist aber eben dieses Lernen aus den Erfahrungen auf landes- und bundespolitischer Ebene notwendig. Daher sollten zeitnah Weichen gestellt werden, um Klarheit zu schaffen und Verlässlichkeit zu erzeugen. Es sollten Rahmenbedingungen für Übergangsphasen formuliert werden und weitere Maßnahmen zur Entwicklung von Wasserstoff(technologie)-Märkten angestoßen werden.

Literaturverzeichnis

50Hertz; Amprion; Tennet; TransnetBW (2024): Technische Anforderungen für den Anschluss von Elektrolyseanlagen. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/de-de/%C3%9Cberuns/Studien-und-Positionspapiere/Anforderungen-an-Elektrolyseanlagen>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

acatech; DECHEMA (2023): Ergebnisse des Stakeholder-Dialogs. Perspektiven zum Wasserstoffhochlauf in Deutschland. Wasserstoff Kompass. Online verfügbar unter https://www.wasserstoffkompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Ergebnisse_des_Stakeholder-Dialogs.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Baden-Württemberg: Das Klima effektiv schützen. Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/bw-gestalten/nachhaltiges-baden-wuerttemberg/klimaschutz>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Baden-Württemberg (2022): Land und Bosch wollen Wasserstofftechnologie voranbringen. Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-und-bosch-wollen-wasserstofftechnologie-voranbringen>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Baden-Württemberg (2024): Fortschrittsbericht zur Wasserstoff-Roadmap für Baden-Württemberg. Fahrplan. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima-energie/energiewende/wasserstoffwirtschaft/roadmap>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bös, Nadine (2025): Warum das Grünstahl-Megaprojekt stockt. SMS-Group und Thyssenkrupp. Hg. v. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Online verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/gruenstahl-megaprojekt-hat-verspaetung-110478452.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bruch, Nils; Ueckerdt, Falko; Knodt, Michèle (2025): Hydrogen in the Reformed EU ETS–Implications for Competitiveness and Emissions Reductions.

Brudermüller, M.; Neugebauer, R.; Ploss, R.; Süssenguth, F.; Liepold, A. (2023): Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft. Hg. v. acatech IMPULS. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/elektrolyseure/>.

Bund der Wasserstoffregionen (2024): BdWR: Wasserstoff muss in der Fläche gefördert werden. Positionspapier. Online verfügbar unter <https://www.bdwr.de/#Anliegen>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) (2024): Vollzugsleitfaden "Genehmigung und Überwachung von Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser ("Elektrolyseure)". UMK-Umlaufbeschluss 58/2024. Online verfügbar unter https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/vollzugsleitfaden-elektrolyseure-stand10-2024_2_1730722825.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2025): Özdemir: Die Zukunft unserer Industrie hängt ab von der verlässlichen Versorgung mit grünem Wasserstoff. Pressemitteilung 22/2025. Online verfügbar unter <https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/03/250325-AbschlusskonferenzTranshyde.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024): Dritte Verordnung zur Änderung der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. BGBl. I,

vom 355. Online verfügbar unter <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2024/355/VO.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2024): Offizieller Startschuss für die Umsetzung von 23 IPCEI-Wasserstoff-Projekten in Deutschland. Pressemitteilung. Online verfügbar unter <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilung-gen/2024/07/20240715-ipcei-wasserstoff-projekte.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): BMWK-Maßnahmen zur Batteriezellfertigung. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/230629-bmwk-massnahmen-zur-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesnetzagentur (2024): Ab 2025 niedrigere Netzentgelte in Regionen mit viel Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241018_Netzkosten.html, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Bundesverfassungsgericht (2023): Urteil vom 15. November 2023. Zweites Nachtragshaushaltsgesetz 2021. Online verfügbar unter https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2023/11/fs20231115_2bvf000122.html, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Büttner, Thiess; Hönig, Anja; Kauder, Björn; Krause, Manuela; Potrafke, Niklas; Riem, Marina (2015): Rahmenbedingungen für Private Investitionen in Deutschland. Hg. v. IMPULS-Stiftung des VDMA. ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V. Online verfügbar unter <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Rahmenbedingungen-fuer-private-Investitionen-in-Deutschland.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Carels, F.; Sens, L.; Kaltschmitt, M.; Janke, L.; Deutsch, M. (2023): Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland. In: *Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf*.

CDU, CSU, SPD (2025): Verantwortung für Deutschland. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 21. Legislaturperiode. Online verfügbar unter <https://www.koalitionsvertrag2025.de/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

cellcentric (2024): Mit Fokus und Geschwindigkeit in die nächste Phase. Online verfügbar unter <https://www.cellcentric.net/news/mit-fokus-und-geschwindigkeit-in-die-nachste-phase>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Bundestag (2021a): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung. UVPG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/uvpg/BJNR102050990.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Bundestag (2021b): Modellregionen für die energieintensive Industrie. WD 5 Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, und Landwirtschaft (081/21). Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/876572/WD-5-081-21-pdf.pdf>.

Deutscher Bundestag (2023): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU. Drucksache 20/7078. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/072/2007290.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Bundestag (2024a): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz). BImSchG, vom § 19 Vereinfachtes Verfahren. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/_19.html, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Bundestag (2024b): Preisentwicklung der gehandelten EU-CO₂-Zertifikate. WD 5: Wirtschaft, Energie und Umwelt. Sachstand. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/1025904/4fa16ff65aff4c820b7018ad2af8e91f/WD-5-129-24-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Bundestag: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. EnWG §118. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/_118.html, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Deutscher Wasserstoff-Verband DWV (2024): Stellungnahme des DWV zu den technischen Anforderungen für den Anschluss von Elektrolyseanlagen an das Stromnetz. Online verfügbar unter <https://dwv-info.de/positionspapiere/stellungnahme-des-dwv-zu-den-technischen-anforderungen-fuer-den-anschluss-von-elektrolyseanlagen-an-das-stromnetz/>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

Die Bundesregierung (2024): Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=18, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Döscher, Henning; Bittner, Nils; Weymann, Lukas; Stahlecker, Thomas; Schnabl, Esther; Zenker, Andrea (2024): H₂ Companion: Elektrolyse. Projekt. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/neue-technologien/projekte/h2-companion-elektrolyse.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Döscher, Henning; Weymann, Lukas; Schmaltz, Thomas; Endo, Chie; Schmoch, Ulrich (2023): H₂GO - Nationaler Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion. Projekt. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/neue-technologien/projekte/h2go.html#0_copy, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Doucet, Felix; Düsterlho, Jens-Eric von; Schäfers, Hans; Kicherer, Nina; Jensen, Nanke (2023): Grüner Wasserstoff für die Energiewende. Potenziale, Grenzen und Prioritäten. Teil 2: Der Gebäudesektor. Online verfügbar unter https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/16699/1/NRL-Studienreihe_Teil%20%20Geba%CC%88udesektor_20230220.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

dpa Niedersachsen (2024): Geplanter Wasserstoffausbau macht Landwirten Sorgen. Ressource Wasser wird knapp. Hg. v. Die ZEIT. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/news/2024-10/14/geplanter-wasserstoffausbau-macht-landwirten-sorgen>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

EMCEL GmbH; BBH Consulting AG; Reiner Lemoine Institut; umlaut energy GmbH; DIE KAVALLERIE GmbH (2023): Hy-NATuRe. Zukunft gestalten mit Wasserstoff. Abschlussbericht des HyExperts-Projekts der Landkreise Reutlingen und Tübingen. Online verfügbar unter <https://e-docs.tib.eu/files/e01fb25/1914922069.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

EnBW Investoren (2024): EnBW beteiligt sich mit Milliardeninvestition am nationalen Wasserstoff-Kernnetz. Investorenmitteilung. Online verfügbar unter <https://www.enbw.com/investoren/news-und-publikationen/milliardeninvestition-der-enbw-am-nationalen-wasserstoff-kernnetz.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

EWE AG (2024): Systemdienliche Elektrolyse für ein Gesamtenergiesystem mit niedrigeren Kosten für Gesamtdeutschland. Politische Standpunkte der EWE AG. Online verfügbar unter <https://www.lobbyregister.bundestag.de/media/5a/c2/358375/Stellungnahme-Gutachten-SG2409270023.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

EY (2023): Us-Konzerne liegen bei Forschungsausgaben deutlich vor Firmen aus Europa und Asien. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.ey.com/de_de/news-room/2023/05/us-konzerne-liegen-bei-forschungsausgaben-deutlich-vor-firmen-aus-europa-und-asien, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Fisher, J. Christopher; Nelson, Hugh H.; Allen, Janet K.; Kazempoor, Pejman; Mistree, Farrokh (2024): Analyzing hydrogen hub locations: Resources, energy, and social impact. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 70, S. 641–653. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.125.

Gilles, F.; Przezicka, P. (2022): Unlocking the hydrogen economy — stimulating investment across the hydrogen value chain. Investor perspectives on risks, challenges and the role of the public sector. European Investment Bank (EIB). Online verfügbar unter https://www.eib.org/files/publications/unlocking_the_hydrogen_economy_en.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

H2 GeNeSiS: Das Neckartal als Modellregion für Grünen Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://h2genesis.region-stuttgart.de/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

H2 Mobility (2025): Tankstellenübersicht mit Preisen. Unsere Tankstellen. Online verfügbar unter <https://h2-mobility.de/unsere-tankstellen/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

H2-Wandel: Die Leuchttürme. Tragende Projekte von H2-Wandel. Online verfügbar unter <https://h2-wandel.de/leuchttuerme/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Kalis, Michael (2019): Rechtsrahmen für ein H2-Teilnetz. Nukleus einer bundesweiten, öffentlichen Wasserstoffinfrastruktur. IKEM. Online verfügbar unter <https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2019/10/Rechtsrahmen-f%C3%BCr-ein-H2-Teilnetz.pdf>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2024): Wasserbedarf: Eingespart wird vor allem in der Wirtschaft. Umweltdaten Bericht 2024. Online verfügbar unter <https://umweltportal.baden-wuerttemberg.de/umweltdaten-bericht-2024/wasserbedarf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Lassen, Friederike; Börger, Raphael; André, Jannis; Muhs, Julian; Gebhardt, Phillip (2025): H2Five. Fünf vor 2030. Empfehlungen des Deutschen Wasserstoff-Verbandes für die 21. Legislaturperiode. Hg. v. Deutscher Wasserstoff-Verband DWV. Online verfügbar unter <https://dwv-info.de/wp-content/uploads/2025/01/H2Five-DWV-Empfehlungen.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Lee, Won Sang (2023): What can accelerate technological convergence of hydrogen energy: a regional perspective. In: *Front. Energy Res.* 11, Artikel 1162732. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1162732.

Lohmann, S. (2025): Local acceptance of green hydrogen projects in German hydrogen model regions: Insights from the multi-site and multi-year H2-Companion survey. Manuscript in preparation.

Lohmann, Sophie; Caspari, M. (2023): Wer will Wasserstoff? Akzeptanz von Wasserstofftechnologien in Deutschland und Baden-Württemberg.

Luderer, Gunnar; Bartels, Frederike; Brown, Tom; Aulich, Clara; Benke, Falk; Fleiter, Tobias et al. (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045.

Makedos, Ioannis (2014): The Collaboration of SMEs through Clusters as Defense against Economic Crisis. In: *Economics Research International* 2014, S. 1–9. DOI: 10.1155/2014/407375.

MDR Sachsen-Anhalt (2025): Intel-Aus trifft Magdeburg. Milliarden-Investition und 3.000 Jobs geplätzt. Online verfügbar unter <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/magdeburg/magdeburg/intel-stoppt-chipfabrik-investitionsstopp-112.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Merten, Frank; Scholz, Alexander (2023): Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarfen für die CO2-neutrale Transformation. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e. V.

Studienbericht. Hg. v. Wuppertal Institut. Online verfügbar unter https://epub.wuppertal-institut.org/frontdoor/deliver/index/docId/8344/file/8344_Wasserstoffkosten.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Mohr, Stephan; Schmidt-Achert, Tapio; Ziemsky, Valerie; Pichlmaier, Simon (2025): Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht. Discussion Paper.

Müller, Martin (2025): KfW-ifo-Fachkräftebarometer: Juni 2025 - Schwache Konjunktur lässt Fachkräftemangel weiter sinken. Hg. v. KfW Research. Online verfügbar unter https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzerntemen/Research/PDF-Dokumente-KfW-ifo-Fachkr%C3%A4ftebarometer/KfW-ifo-Fachkraeftebarometer_2025-05.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

NDR Info (2025): Die Probleme von Northvolt. Ist das Werk bei Heide in Gefahr? Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Die-Probleme-von-Northvolt-Ist-Werk-bei-Heide-in-Gefahr,northvolt524.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Neukirch, Mario (2016): Protests against German electricity grid extension as a new social movement? A journey into the areas of conflict. In: *Energ Sustain Soc* 6 (1). DOI: 10.1186/s13705-016-0069-9.

NOW GmbH (2022): Genehmigungsleitfaden Wasserstoff-Tankstellen. Online verfügbar unter https://www.klima-plattform.de/fileadmin/unk/KlimaGuide/Leitf%C3%A4den/241028_Genehmigung-leitfaden_H2-Tankstellen_NOW.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

OECD/Eurostat (2018): Oslo Manual. Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. 4. Aufl. Online verfügbar unter https://www.oecd.org/en/publications/oslo-manual_9789264013100-en.html.

Passow, Anne (2025): Bundesrechnungshof: Risiken zu Northvolt wurden systematisch unterschätzt. Hg. v. NDR. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/bundesrechnungshof-risiken-zu-northvolt-wurden-systematisch-unterschaetzt,northvolt-142.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2025.

Plattform H2BW (2023a): Genehmigung und Überwachung von Elektrolyseuren zur Herstellung von Wasserstoff in Baden-Württemberg. Leitfaden. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Genehmigung-und-Ueberwachung-Elektrolyseure-zur-Herstellung-von-Wasserstoff.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Plattform H2BW (2023b): Landesweite Abfrage zeigt höheren Wasserstoffbedarf ab 2025. Online verfügbar unter <https://www.plattform-h2bw.de/service/aktuelle-meldungen/meldungen-detail/landesweite-abfrage-zeigt-hoeheren-wasserstoffbedarf-ab-2025>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Power-to-X-Allianz (2025): Stellungnahme zu den geplanten Kürzungen der Fördermittel: Der Haushaltsentwurf gefährdet die Zukunft der Wasserstoffindustrie. Online verfügbar unter <https://www.ptx-allianz.de/stellungnahme-zu-den-geplanten-kurzungen-der-fordermittel-der-haushaltsentwurf-gefahrdet-die-zukunft-der-wasserstoffindustrie/>, zuletzt geprüft am 12.09.2025.

prognos; sphaera (2022): Analyse der aktuellen Situation des H2-Bedarfs und -Erzeugungspotenzials in Baden-Württemberg. Hg. v. e-mobil BW. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW_Wasserstoffbedarf_und_-Erzeugungspotenzial.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Rao, Swaroop; Schlomann, Barbara; Grimm, Anna; Plötz, Patrick; Dütschke, Elisabeth; Schleich, Joachim et al. (2024): Evaluation der „Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)“. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/E/evaluation-der-richtlinie-zur-foerderung-des-absatzes-von-elektrisch-betriebenen-fahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Rehfeldt, Matthias; Bußmann, Simon; Fleiter, Tobias; Rissman, Jeffrey (2024): Direct electrification of industrial process heat. An Assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Study. Hg. v. Agora Industry. Online verfügbar unter https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-20_IND_Electrification_Industrial_Heat/A-IND_329_04_Electrification_Industrial_Heat_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Risius, Paula; Tiedemann, Jurek; Küper, Malte; Flake, Regina (2025): Fachkräftemangel: Nadelöhr für den Wasserstoffhochlauf? Fachkräftesituation entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft (IW). Online verfügbar unter <https://www.iwkoeln.de/studien/paula-risius-jurek-tiedemann-malte-kueper-regina-flake-nadeloehr-fuer-den-wasserstoff-hochlauf.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Sabel, Hermann; Weiser, Christoph (2008): Dynamik im Marketing: Umfeld—Strategie—Struktur—Kultur: Springer.

Salzgitter AG (2025): Weiterer SALCOS-Baustein: Grundsteinlegung für eine der größten Anlagen Europas zur Produktion von grünem Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/weiterer-salcos-baustein-grundsteinlegung-fuer-eine-der-groessten-anlagen-europas-zur-produktion-von-gruenem-wasserstoff-23447.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Schulte, Simon; Sprenger Tobias; Schlund, David (2021): Perspektiven auf den Wasserstoffmarkthochlauf. Stakeholderanalyse mit Fokus Deutschland. EWI Policy Brief. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI). Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/04/EWI_Policy_Brief_Perspektiven-auf-den-Wasserstoff-markthochlauf_20210401-1.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Schunck, Stephanie (2025): RWE und TotalEnergies vereinbaren wegweisenden Langzeit-Abnahmevertrag für grünen Wasserstoff. Hg. v. RWE AG. Online verfügbar unter <https://www.rwe.com/presse/rwe-ag/2025-03-12-rwe-und-totalenergies-vereinbaren-langzeit-abnahmevertrag-fuer-gruenen-wasserstoff/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Schwarz, Magnus (2024): Sichere Abnahme: H2-Produzent unterzeichnet Fünfjahresvertrag. Online verfügbar unter <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/sichere-abnahme-h2-produzent-unterzeichnet-fuenfjahresvertrag/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Sovacool, Benjamin K.; Hess, David J.; Cantoni, Roberto; Lee, Dasom; Claire Brisbois, Marie; Jakob Walnum, Hans et al. (2022): Conflicted transitions: Exploring the actors, tactics, and outcomes of social opposition against energy infrastructure. In: *Global Environmental Change* 73, S. 102473. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2022.102473.

Specht, Jan Martin; Fabianek, Paul (2022): Vergleich von Wasserstoff- und Elektromobilität. Technische, ökonomische, soziale und ökologische Aspekte. Hg. v. Kopernikus-Projekt ENSURE. Online verfügbar unter https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/2378/live/lw_datei/fcn_2022_vergleich_von_wasserstoff-_und_elektromobilit-C3-A4t_final_02.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Stahlecker, Thomas; Schnabl, Esther; Baumann, Wiebke; Ulmer, Nico; Lohmann, Sophie; Christ, Catrice; :unav (2025): Die baden-württembergischen Modellregionen Grüner Wasserstoff im Kontext Bildung & Qualifizierung. DOI: 10.24406/publica-4657.

Stratmann, Klaus (2025): Stahlhersteller sagt Wasserstoffprojekt in Milliardenhöhe ab. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/arcelor-mittal-stahlhersteller-sagt-wasserstoffprojekt-in-milliardenhoehe-ab/100136073.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2025.

Tagesschau (2025): ArcelorMittal stoppt Pläne für "grüne" Stahlproduktion. Klima-Vorzeigeprojekt abgesagt. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/arcelor-mittal-absage-wasserstoff-100.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

thyssenkrupp (2025): Wasserstoff: Energieträger für die Zukunft. Online verfügbar unter <https://www.thyssenkrupp.com/de/wasserstoff>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Werwitzke, Cora (2025): Cellcentric sichert sich Areal für Großserienfertigung in Weilheim. Brennstoffzelle. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2025/01/14/cellcentric-sichert-sich-areal-fuer-grossserienfertigung-in-weilheim/>, zuletzt geprüft am 01.08.2025.

Wietschel, Martin; Riemer, Matia; Thomann, Jana; Breitschopf, Barbara; Fragoso, Joshua; Wachsmuth, Jakob et al. (2024): HYPAT Abschlussbericht: Karlsruhe.

Wietschel, Martin; Weißenburger, Bastian; Rehfeldt, Matthias; Lux, Benjamin; Zheng, Lin; Meier, Jonas (2023): Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland: Methodik und Ergebnisse: Fraunhofer ISI.