



WASSERSTOFF IN DER INDUSTRIE

Zwischen Aufbruch und Blockade

Astrid Saidi, Robin Jaede, Henry Riedl
Sandra Meyer-Ghosh, Simon Güntner

Energiesystem im Umbruch:
Akteur:innen der Transformation im Dialog – Teil 1

Zwischen Aufbruch und Blockade

Energiesystem im Umbruch:

Akteur:innen der Transformation im Dialog – Teil 1

Astrid Saidi, Robin Jaede, Henry Riedl

Sandra Meyer-Ghosh, Simon Güntner

Dezember 2025

Abstract

Die Energiewende ist nicht nur eine technologische Transformation, sondern erfordert einen Umbau des gesamten Energiesystems. Damit dieser möglichst reibungslos gelingt, müssen die Perspektiven, Interessen und Erwartungen ganz unterschiedlicher Akteur:innen frühzeitig in die Transformationsprozesse einfließen. Das Energiewende-Verbundprojekt Norddeutsches Reallabor (NRL) bringt deshalb relevante Stakeholdergruppen zusammen und verknüpft Einzelperspektiven zu einem gesamtsystemischen Blick.

In der im Jahr 2024 durchgeführten Veranstaltungsreihe der NRL Transformation Labs kamen Akteur:innen der Energiewende zusammen, um gemeinsam über Treiber und Hemmnisse für den Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien zu diskutieren. Zwei der Labs beschäftigten sich mit der Erzeugung von grünem Wasserstoff sowie mit dessen Einsatz in der Industrie. Die Analyse der dort geführten Diskussionen liegt in diesem Bericht vor.

Sie verbindet zwei Auswertungsstränge: In einer Inhaltsanalyse wurden treibende und hemmende Einflussfaktoren identifiziert. Argumentationen zu Regulatorik und Wirtschaftlichkeit dominieren die Nennungen: So werden vor allem zu strenge Anforderungen seitens der Regulatorik und fehlende Geschäftsmodelle moniert.

Parallel wurden die Zusammenhänge der genannten Einflussgrößen im Rahmen einer Szenarioanalyse betrachtet. Es ergab sich aus NRL-Sicht nur ein wünschenswertes Szenario, das zum Markthochlauf führen würde. Die Analyse zeigt damit, dass sich einzelne Stellschrauben untereinander stark blockieren, so dass eventuelle Anpassungen immer das Gesamtsystem im Blick haben müssen.

Ausgehend von diesen Ergebnissen schließt der Bericht mit ersten Handlungsempfehlungen aus den NRL Transformation Labs zur Unterstützung des Wasserstoff-Markthochlaufs.

1	EINLEITUNG Mehrdimensionale Transformationsprozesse	5
2	HINTERGRUND Das NRL als Impulsgeber der industriellen Transformation	8
	Integrativer Forschungs- und Diskursansatz	9
3	DIE NRL TRANSFORMATION LABS Akteur:innen der Energiewende im Zukunftsdialog	11
	Ablauf der Transformation Labs	14
4	METHODE Doppelter Auswertungspfad	17
	Methodisches Vorgehen der Inhaltsanalyse	17
	Methodisches Vorgehen der Szenarioanalyse	18
5	INHALTSANALYSE Wirkungsketten sichtbar machen	21
	Auswertung: Hürden und Treiber des Hochlaufs	21
	Diskussionsverlauf: Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Perspektiven	25
6	SZENARIOANALYSE Wasserstoff im Hemmnis-Kreislauf	30
	Szenarioportfolio: Fehlende Mittelwert-Szenarien	30
	Auswertung: Kein Hochlauf ohne Wirtschaftlichkeit	33
7	Fazit	44
8	Handlungsempfehlungen	46
9	Literaturverzeichnis	51

Über die Autor:innen:

Der hier vorliegende Bericht entstand im Rahmen des Teilvorhabens „Industrielle Transformation und gesellschaftliche Teilhabe“ des Norddeutschen Reallabors (NRL), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird. Die an der Studie beteiligten Autor:innen sind Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen am Competence Center für Energiewende (CC4E) der HAW Hamburg.



Vorbemerkung

Die Studienreihe „Energiesystem im Umbruch: Akteur:innen der Transformation im Dialog“ entstand im Rahmen des Energiewende-Verbundprojekts Norddeutsches Reallabor (NRL). Sie basiert auf den Ergebnissen der NRL Transformation Labs, einer mehrteiligen Veranstaltungsreihe, in der Akteur:innen aus Industrie, Energiewirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Gesellschaft ihre Perspektive auf die gegenwärtigen Treiber und Hemmnisse der Transformation zur Klimaneutralität diskutierten. Allen Lab-Teilnehmer:innen sei an dieser Stelle für ihre Bereitschaft zur Teilnahme ausdrücklich gedankt.

Organisiert und ausgewertet wurde die Veranstaltungsreihe vom Competence Center für Energiewende (CC4E) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Entsprechend der Themensetzung der einzelnen Transformation Labs erscheinen im Rahmen der Studienreihe in lockerer Folge diese Veröffentlichungen:

STUDIENREIHE TEIL 1

Wasserstoff in der Industrie: Zwischen Aufbruch und Blockade

STUDIENREIHE TEIL 2

Industrielle Abwärmenutzung (Arbeitstitel)

STUDIENREIHE TEIL 3

Wasserstoffmobilität (Arbeitstitel)

EXKURS

Gesellschaftliche Teilhabe (Arbeitstitel)

Mehrdimensionale Transformationsprozesse

Charakteristisch für die Energiewende ist ihre zunehmende Komplexität und Mehrdimensionalität. Aufgabe der wissenschaftlichen Forschung ist es, Zugang zu dieser Komplexität zu schaffen, Transformationspfade zu untersuchen und Handlungsmöglichkeiten sichtbar zu machen. So entsteht ein belastbarer Wissensbestand, auf dessen Grundlage Politik, Wirtschaft und Gesellschaft fundierte Entscheidungen treffen können.

Allerdings weist die Forschung zu den gegenwärtigen Herausforderungen der Energiewende und insbesondere zu innovativen Ansätzen der Sektorenkopplung wie dem Einsatz von grünem Wasserstoff bislang vor allem eine industrielle Prägung auf: Im Mittelpunkt stehen technologische, ökonomische oder regulatorische Fragen, die den Markthochlauf ebendieser Technologien aus industrieller Perspektive beleuchten. Mit dem Fortschreiten der Transformation wird jedoch zunehmend deutlich, dass die Betrachtung technologischer Aspekte allein nicht ausreicht. Die Problemlagen werden systemischer und vielschichtiger: Bei der industriellen Transformation sind nicht nur die notwendigen Technologien anspruchsvoll, auch deren Integration in ein Gesamtsystem und nicht zuletzt ihre **Einbettung in gesellschaftliche Logiken, Perspektiven, Interessen, Erwartungen und Praktiken** fügen weitere Ebenen der Komplexität hinzu.

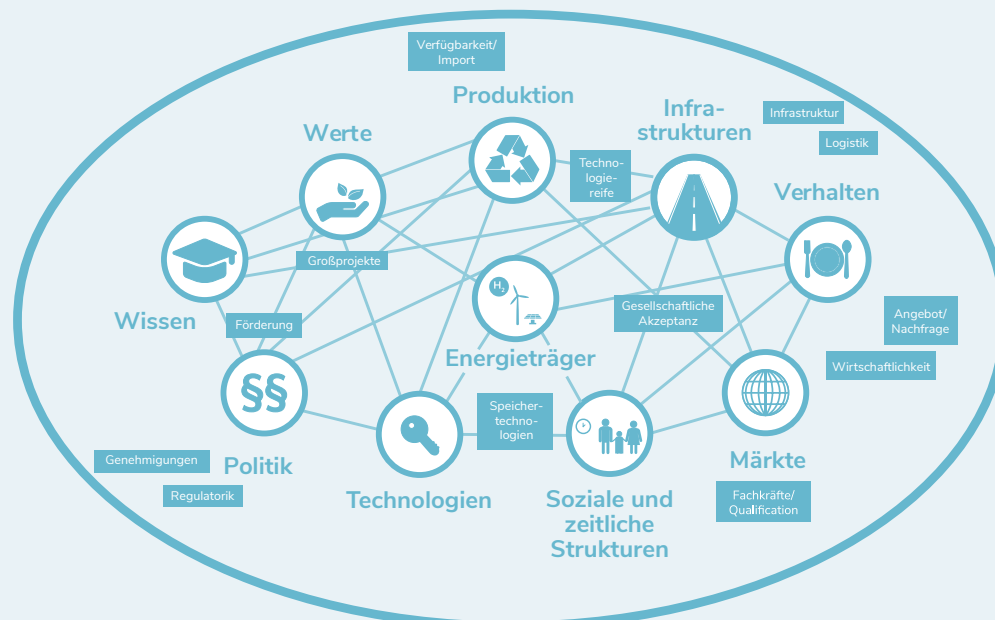


Abbildung 1: Soziotechnisches System. Eigene Darstellung in Anlehnung an Umweltbundesamt (2018), S. 13

Der Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien muss als ein vielschichtiger Prozess gesehen werden, der nur als Gesamtheit verstanden werden kann. Soziotechnische, -ökonomische und -kulturelle Systeme stehen miteinander in Beziehung und beeinflussen sich wechselseitig (Geels 2019; Umweltbundesamt 2018, 2020; Jaede, Meyer-Ghosh & Saidi 2025).

Ein Modell des Umweltbundesamts (Umweltbundesamt 2020) illustriert diese Verwobenheit, indem es die Interdependenzen zwischen sozioökonomischen, soziotechnischen und soziokulturellen Faktoren abbildet (Umweltbundesamt 2018, S. 12; Jaede, Meyer- Ghosh & Saidi 2025).

Soziotechnische Systeme sind dabei durch die jeweils dominierenden Technologien geprägt, während sozioökonomische Systeme (z. B. Energie, Mobilität) sich durch Märkte oder ihre Funktionen auszeichnen und soziokulturelle Systeme (z. B. Gesundheits-, Ernährungs- oder Bildungssystem) (Umweltbundesamt 2020, S. 37) Aspekte gesellschaftlichen Zusammenlebens in sozialer und kultureller Hinsicht umfassen (z. B. Werte und Verhalten).

Im Zentrum des hier leichtangepassten² Modells stehen die in dieser Studienreihe betrachteten Sektorenkopplungstechnologien. Auf sie wirken Technologien und Produktionsprozesse und die dafür benötigte Infrastruktur ebenso wie ökonomische und gesellschaftliche Faktoren. Das geordnete Zusammenspiel der Systemelemente benötigt u. a. politische Regelungen, z. B. in Form von Gesetzen und Genehmigungsverfahren. Damit wird die Bedeutung eines gesamtsystemischen Ansatzes bei der Erforschung von Transformationsprozessen deutlich.

In der Energiewende wirken all diese Entwicklungen zusammen und bedingen sich gegenseitig. Daher benötigt der Prozess hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft das Wissen und die Teilhabe ganz unterschiedlicher Akteur:innen. So lässt sich nicht-intendierten Nebenfolgen einer isolierten oder rein technik-logischen Entwicklung vorbeugen.

Die aktuell ambivalente Haltung zur Energiewende in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft birgt dabei sowohl neue Chancen als auch altbekannte Hürden. **Einerseits können im Zusammenspiel mit einer Industrie, welche die Energiewende in der Regel befürwortet und die eigene Transformation zu einem klimaneutralen Wirtschaften vorbereitet, innovative Technologien an einem frühen Zeitpunkt in der Diffusion begleitet werden.** Andererseits lässt sich eine abnehmende Priorisierung des Themas in Politik und Gesellschaft beobachten. Zugleich sorgen Regierungswechsel, eine schwierige wirtschaftliche Lage und unklare Rahmenbedingungen für Zurückhaltung der Industrie bei langfristigen, großen oder risikoreichen Projekten.

Eine nachhaltige und breit akzeptierte Transformation kann daher nur gelingen, wenn relevante Stakeholdergruppen der Energiewende frühzeitig in den Transformationsprozess eingebunden werden – nicht nur technisch, sondern auch diskursiv. So bietet sich die Chance, ihre Wissensbestände für die notwendigen Weichenstellungen der Energiewende zu erschließen und zugleich mögliche Zielkonflikte frühzeitig zu adressieren. Erst durch das Zusammenbringen verschiedener Perspektiven können somit diffusionsfördernde, aber auch hemmende Faktoren verlässlich identifiziert werden.

1 Vgl. Näheres dazu FN 4.

Die hier vorliegende Studie will ebendies tun: Sie richtet ihren Blick auf den von der Bundesregierung angestrebten Wasserstoff-Markthochlauf und betrachtet ihn aus einer sozialwissenschaftlichen Perspektive, um ein multidimensionales Bild möglicher Marktentwicklungen zu geben und dabei das Spannungsfeld zwischen industrieller Transformation und gesellschaftlicher Teilhabe auszuleuchten. Zurückgegriffen wurde für die Studie auf das Wissen einer Vielzahl von Akteur:innen aus dem Umfeld des Energiewende-Verbundprojekts Norddeutsches Reallabor (NRL), in dessen Rahmen die vorliegende Studie entstand.

Das NRL als Impulsgeber der industriellen Transformation

Das Norddeutsche Reallabor (NRL) ist ein länderübergreifendes Energiewende-Verbundprojekt, das neue Wege zur Klimaneutralität aufzeigen will. Dazu werden Produktions- und Lebensbereiche mit besonders hohem Energieverbrauch schrittweise defossilisiert und auf erneuerbare Energieträger umgestellt – insbesondere in der Industrie, aber auch in der Wärmeversorgung und im Mobilitätssektor.

Hinter dem Norddeutschen Reallabor stehen mehr als 50 Partner aus Industrie, Energiewirtschaft, Wissenschaft und Politik. Als Energiewende-Allianz arbeiten sie eng zusammen, um nachhaltige Innovationen zu schaffen und den Industriestandort Norddeutschland zu stärken. Die dafür gewählte Modellregion umfasst die Bundesländer Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern sowie Bremerhaven. Ziel des Projekts ist es, einen Transformationspfad zu erproben, mit dem es gelingen kann, die CO₂-Emissionen im Norden bis 2035 um 75 Prozent zu reduzieren.

Dazu werden im Norddeutschen Reallabor Elektrolyseure mit einer Erzeugungskapazität von 15 MW betrieben. Der grün erzeugte Wasserstoff dient unter anderem dazu, fossile Energieträger in industriellen Prozessen durch Wasserstoff bzw. dessen Folgeprodukte zu ersetzen. Im Mobilitätssektor werden Wasserstoff-Tankstellen und Brennstoffzellen-Fahrzeuge in unterschiedlichen Nutzungsszenarien erprobt. Außerdem werden im NRL mehrere Projekte umgesetzt, die eine Abwärmenutzung in einem Umfang von 700 GWh pro Jahr ermöglichen. Mit den im Projektzeitraum geplanten Vorhaben können bis zu 330.000 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr eingespart werden. Das Großprojekt hat eine Laufzeit von sechs Jahren (04/2021–03/2027). Als Teil der Förderinitiative „Reallabore der Energiewende“ wird das NRL mit rund 30 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Weitere Fördermittel werden durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV) bereitgestellt.

Eine Besonderheit des Projekts ist sein Rundum-Blick auf die Energiewende: Neben den geplanten Erprobungsvorhaben zur CO₂-Reduktion werden auch Querschnittsthemen berücksichtigt. In unterschiedlichen Forschungsvorhaben befassen sich die NRL-Partner mit der volkswirtschaftlichen und der gesellschaftlichen Dimension des geplanten Transformationspfades hin zur Klimaneutralität. Die Betrachtung von Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Erprobungs- und Forschungsvorhaben der NRL-Partner steht im Zentrum des Norddeutschen Reallabors.

Integrativer Forschungs- und Diskursansatz

Das Teilvorhaben „Industrielle Transformation und gesellschaftliche Teilhabe“ (TV 3.1) begleitet die technologischen Projekte, die im Rahmen des NRL umgesetzt wurden, mit sozioökonomischen Fragestellungen. Es wird verantwortet vom Competence Center für Energiewende (CC4E), einer interdisziplinären Forschungseinrichtung an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg). Im Projekt wird erforscht, wie die industrielle Nutzung und damit der Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien am Beispiel von Wärme, Mobilität und Industrie durch eine gezielte Beteiligung relevanter Stakeholder:innen in der Projektregion unterstützt werden kann. Ziel ist es, ihr Wissen durch partizipative und diskursive Forschungsmethoden systematisch zu erfassen und effektiv miteinander zu verzahnen, um zu einer schnellen und zugleich breit akzeptierten Transformation des Energiesystems beizutragen, also die Transformationspfade so zu gestalten, dass sie sowohl wirksam als auch gesellschaftlich anschlussfähig sind.

Im Ergebnis soll ein mehrdimensionales Gesamtbild zu den gegenwärtigen Treibern und Hemmnissen der aktuellen Transformationsprozesse entstehen. Es kann dabei helfen, Barrieren frühzeitig zu erkennen, passende Lösungsansätze zu erarbeiten und somit mittelbar den Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien in der norddeutschen Projektregion zu beschleunigen.

Um diesen Forschungszielen gerecht zu werden, verfolgt das NRL-Teilvorhaben methodisch einen integrativen Forschungs- und Diskursansatz. Er lässt sich in fünf Phasen gliedern.

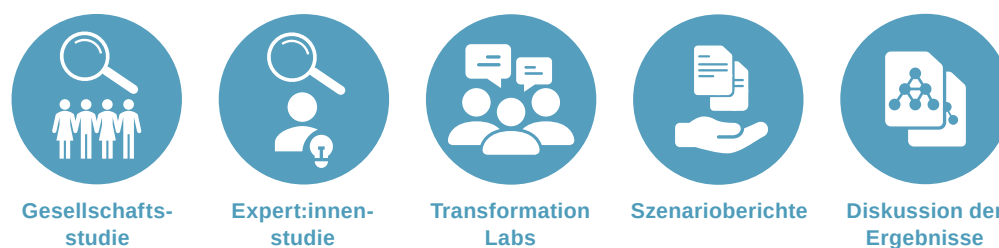


Abbildung 2: Die fünf Phasen des Forschungsprozesses im NRL-Teilvorhaben 3.1 „Industrielle Transformation und gesellschaftliche Teilhabe“

Zu Beginn wurde zum einen eine repräsentative Gesellschaftsstudie zu Einstellungen gegenüber Wasserstofftechnologien und ihren Anwendungsfeldern in der Projektregion des NRL durchgeführt (Arndt 2022). Sie gab wertvolle Einblicke in die Stimmungen der Gesellschaft zur Energiewende, insbesondere in Hinblick auf den Einsatz von Wasserstoff als Schlüsseltechnologie. Zum anderen wurden qualitative Interviews mit Akteur:innen aus dem NRL und dessen Umfeld zu den Treibern und Herausforderungen des Markthochlaufs geführt und als Expert:innenstudie veröffentlicht (Arndt & Saidi 2022).²

² Beide Studien sind über die NRL-Website unter www.norddeutsches-reallabor.de/presse#studien abrufbar.

Aus ihr ließen sich erste Erkenntnisse zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Transformation ableiten, die als Wissensbasis für die inhaltliche Konzeption der NRL Transformation Labs dienen. Die Transformation Labs bilden den methodischen Schwerpunkt des Vorhabens und werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

Aus den Auswertungen der Transformation Labs resultiert eine mehrteilige Studienreihe, deren erster Teil hier vorliegt. Sie liefert Szenarien zu möglichen Marktentwicklungen und zeigt Handlungsoptionen auf, um den Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien in Norddeutschland zu unterstützen. Im Rahmen des NRL werden diese Ergebnisse weiterverwertet, zur Diskussion gestellt sowie der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht.

Akteur:innen der Energiewende im Zukunftsdialog

Hinter den NRL Transformation Labs steht eine vierteilige Veranstaltungsreihe, die im Jahr 2024 vom Competence Center für Energiewende (CC4E) der HAW Hamburg durchgeführt wurde.

Dazu wurden im Vorfeld vier zentrale Technologiebereiche identifiziert, die an die Erprobungsprojekte des Norddeutschen Reallabors anknüpfen: „Industrielle Abwärme und kommunale Netzplanung“, „Wasserstofferzeugung, -transport und -speicherung“, „Wasserstoffnutzung in der Industrie“ und „Straßenbasierte Wasserstoffmobilität“. Zu diesen Themen wurde jeweils ein eigenes Transformation Lab durchgeführt.

Die Transformation Labs wurden bewusst als Raum für einen offenen, breiten Diskurs konzipiert, in dem Erkenntnisse über die Prozesse und Rahmenbedingungen des Markthochlaufs von Sektorenkopplungstechnologien offengelegt und mögliche Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Akteur:innen sichtbar werden.

Dieser Ansatz trägt damit den zentralen Forschungsfragen des NRL-Teilvorhabens „Industrielle Transformation und gesellschaftliche Teilhabe“ Rechnung, das hinter den Transformation Labs steht: Es hat den Auftrag, mittels sozialwissenschaftlicher Methoden zu eruieren, welche Faktoren sich begünstigend auf die frühe Adoption von den im NRL erprobten Sektorenkopplungstechnologien auswirken und ob sich Barrieren für den Hochlauf sowie Konflikte in den unterschiedlichen Perspektiven und Zielsetzungen der Stakeholder erkennen lassen, denen dann ggf. frühzeitig begegnet werden kann (vgl. TVB 3.1, S. 5).



Abbildung 3: Teilnehmende des Transformation Labs „Wasserstofferzeugung, Transport & Speicherung“ am 11.09.2024, Foto: Louis Fraser/CC4E

Kreis der Teilnehmer:innen

Zu den Transformation Labs wurden ausgewählte Akteur:innen aus Industrie, Wissenschaft und Verwaltung themenspezifisch eingeladen, um über innovative Ansätze der Sektorenkopplung in Norddeutschland zu diskutieren. Als Stakeholder:innen der Energiewende wurden sie miteinander ins Gespräch gebracht, um besser zu verstehen wo die Hemmnisse, die Interessenkonflikte, aber auch die Treiber der Energiewende liegen und wie ein schneller Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien gelingen kann.

Die Einladung zu den Transformation Labs erfolgte auf Basis von umfassenden sektorenspezifischen Stakeholderlisten, die im Vorfeld erstellt wurden. So wurden per Internet- und Literaturrecherche Ansprechpartner:innen und Kontaktdaten bei Unternehmen, Forschungsorganisationen, Behörden und Ministerien, Kammern, Verbänden und anderen Interessenvertretungen, Beratungsfirmen und zivilgesellschaftlichen Gruppen identifiziert, die einen erkennbaren Bezug zu dem jeweiligen Themenfokus der Transformation Labs und nach Möglichkeit auch einen Bezug zu Norddeutschland als Modellregion aufwiesen. Ergänzt wurden die Listen durch Empfehlungen aus dem NRL-Kreis und anderen Branchenkontakten. Dabei wurden sowohl die Leitungsebene als auch das ausführende Management bzw. die Mitarbeiterebene inkludiert.³

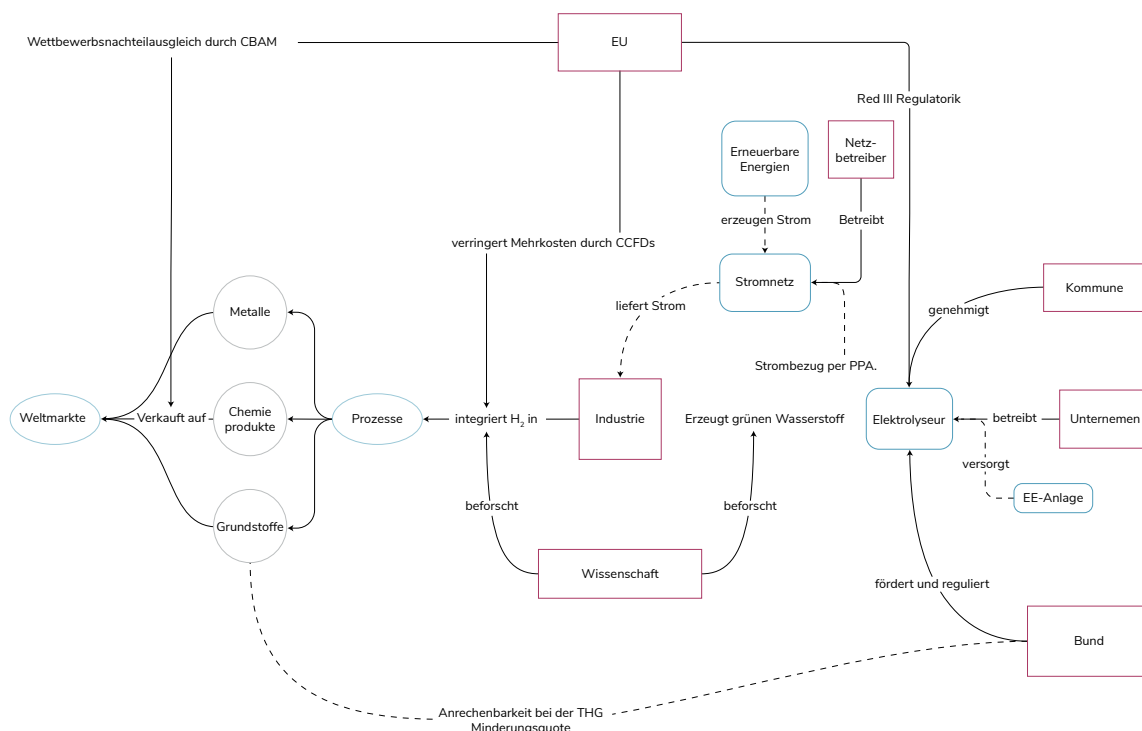


Abbildung 4: Kartierung des Stakeholder-Netzwerks zur Erzeugung und industrieller Nutzung von grünem Wasserstoff, eigene Darstellung

³ Allerdings zeigte sich in der Vorbereitung und der Durchführung der Transformation Labs auch, dass durch die gewählten Ansprachewege kaum Repräsentant:innen der Zivilgesellschaft erreicht werden konnten. Um auch die gesellschaftliche Perspektive auf die Transformation einbinden zu können, wurde im Rahmen des NRL-Teilvorhabens im April 2025 ein Zukunftsworkshop zum Thema „Energiewende und gesellschaftliche Teilhabe“ durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen dieser Reihe in einem gesonderten Studienbericht veröffentlicht.

Im Ergebnis enthielten die Stakeholderlisten je nach Lab zwischen 100 und 150 Kontaktadressen. Die ermittelten Stakeholder:innen wurden schriftlich über Zweck und Ausrichtung des jeweiligen Transformation Labs und den Projektkontext NRL informiert und schriftlich sowie telefonisch eingeladen. Die daraus folgenden Anmeldezahlen lagen bei ca. 25-35 Teilnehmer:innen pro Lab, teilgenommen haben letztlich zwischen 18-26 Personen pro Veranstaltung.



Abbildung 5: Moderierter Diskussionstisch im Transformation Lab „Wasserstoffherzeugung, Transport & Speicherung“ am 11.09.2024, Foto: Louis Fraser/CC4E

Der Kreis der Teilnehmenden in den Transformation Labs zu „Wasserstoffnutzung in der Industrie“ (11.06.2024) und „Wasserstoffherzeugung, -transport und -speicherung“ (11.09.2024) unterschied sich in seiner Zusammensetzung durch die jeweilige Themensetzung. So waren beispielsweise im Lab zur industriellen Wasserstoffnutzung Vertreter:innen von Stahl- und Aluminium erzeugenden Unternehmen anwesend, ebenso wie Vertreter:innen von Energieversorgern. Am Lab zur Wasserstoffherzeugung hingegen nahmen eher wasserstoffproduzierende Unternehmen, Anlagenhersteller zur Wasserstoffherzeugung sowie Unternehmensvertreter:innen aus dem Bereich Transport und Speicherung teil. An beiden Transformation Labs beteiligten sich ebenso Vertreter:innen mit entsprechenden Tätigkeitsfeldern in Behörden und Ministerien, Verbänden und Forschungs-/Wissenschaftseinrichtungen.

Dennoch wurde in beiden Workshops gleichermaßen angemerkt, dass die Trennung beider Bereiche im aktuellen Zustand des Markthochlaufs nur bedingt sinnvoll ist. De facto schließen sich viele derzeitige Erzeugungsprojekte an ein konkretes Nutzungsvorhaben in der Industrie an, so dass der Markthochlauf der notwendigen Technologien für Erzeugung und Verbrauch aktuell im Gesamtsystem schwer trennbar ist. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse beider Transformation Labs zusammen ausgewertet und fließen gemeinsam in diesen Bericht ein.

Ablauf der Transformation Labs

Die jeweils sechsstündigen Transformation Labs waren wie folgt aufgebaut: Nach einer einführenden Information zum Teilvorhaben und seinem Forschungsinteresse und den bisherigen Erkenntnissen gab es einen Referenvortrag zum jeweiligen Thema, mit dem Ziel, den gemeinsamen Diskurs anzuregen. Das Lab zur Wasserstoffnutzung in der Industrie wurde eingeleitet von Marleen Marks, Teamleiterin Projektentwicklung Wasserstoff bei der HAZwei GmbH (einem ehemaligen Joint Venture von Avacon und Hansewerk), die über Genehmigungsverfahren und Abnahmeproblematiken bei der geplanten Errichtung eines Großelektrolyseurs im Rahmen des NRL sprach. Das Lab zur Wasserstofferzeugung begann mit zwei Impulsverträgen zu NRL-Vorhaben: Marcel Schröder von der Stadtreinigung Hamburg sprach über die Integration eines Elektrolyseurs in die Biogaserzeugungsprozesse am Biogas- und Kompostwerk Bützberg, Anna Heuschmann vom Fraunhofer IWES berichtete über die Erfahrungen mit dem Elektrolyseur-Testfeld des Hydrogen Lab Bremerhaven, einem dem NRL assoziierten Projekt.

Die anschließenden Diskussionen folgten der „World-Cafe“-Methodik (Steier, Gyllenpalm, Brown und Bredemeier 2008), die an den konkreten Forschungsbedarf angepasst wurde. An drei Thementischen konnten Treiber und Hemmnisse für den Markthochlauf der jeweils behandelten Sektorenkopplungstechnologie diskutiert werden.

Aus den Expert:inneninterviews der ersten Forschungsphasen wurden dazu im Vorwege Einflussgrößen identifiziert, die wesentliche Auswirkungen auf den Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien haben: Regulatorik, Genehmigungsverfahren, Förderung, Infrastruktur und Logistik, Verfügbarkeit, Speichertechnologien, Technologiereife, Wirtschaftlichkeit, Angebot und Nachfrage, Großprojekte, Fachkräfte sowie gesellschaftliche Akzeptanz.⁴

Die zuvor identifizierten Einflussgrößen waren die Grundlage für die nun folgenden Stakeholder-Diskussionen in den Transformation Labs. Zugleich bildeten sie die Basis für die Auswertungskategorien der folgende Inhaltsanalyse (Kapitel 5) und begründeten die Faktoren für die Szenarioanalyse (Kapitel 6). Dieser Rückgriff auf Ergebnisse aus den früheren Phasen des Forschungsprozesses ermöglichte eine Überprüfung und Ergänzung der gewonnenen Erkenntnisse und trug damit dem iterativen Forschungsprozess Rechnung, der für das Teilvorhaben angedacht war.

Die Teilnehmenden wählten nach der Einführung und den Hintergrunderläuterungen zum Projekt und zum methodischen Vorgehen „aus der Reihe der aus den Experteninterviews gewonnenen Einflussgrößen diejenigen drei, die zentral für die Thementische sein sollten, um eine strukturierte Diskussion mit

4 Zum Teil decken sich diese Faktoren mit dem in der Einleitung vorgestellten Modell des Umweltbundesamtes, sind aber spezifisch an die Forschungszwecke des Norddeutschen Reallabors angepasst. Es wurden entsprechende Faktoren integriert, die auf den Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien einwirken – die also die industrielle Nutzung von Wasserstoff unterstützen oder auch hemmen können.

Anknüpfungspunkten zu den restlichen Einflussgrößen zu ermöglichen. Die übrigen Faktoren wurden auf einem Brownpaper auf den Tischen in einem Netz um die zentralen Faktoren herum angeordnet. Somit wurde visuell unterstrichen, dass die Teilnehmenden die Interdependenzen und deren konkrete Mechanismen im soziotechnischen System herausstellen sollen“ (Jaede, Meyer-Ghosh, Saidi 2025, S. 447).

Die Workshops waren so aufgebaut, dass die Stakeholder:innen in wechselnden Konstellationen in die Diskussion kamen, um so einen möglichst vielfältigen Austausch zu fördern. Diskutiert wurde in drei Runden à 45 Minuten. Die Teilnehmer:innen sollten aus ihrer individuellen Perspektive fördernde und hemmende Faktoren benennen und als Gruppe deren Wechselwirkungen bestimmen. Die Diskussionspunkte wurden auf den bereitgestellten Papier-tischdecken schriftlich festgehalten und die Positionen zueinander und im Netzwerk auch visuell verortet (Jaede, Meyer-Ghosh, Saidi 2025, S. 448). Dadurch war es möglich, in den Gesprächsrunden auf verschriftlichte Argumente und Aussagen aus den Vorrunden Bezug zu nehmen.



Abbildung 6: Interaktion mit dem Multitouchdisplays im Rahmen des Transformation Labs „Wasserstoffnutzung in der Industrie“ am 11.06.2024, Foto: Louis Fraser/CC4E

Die Moderator:innen eröffneten die jeweilige Diskussionsrunde am Tisch mit einem kurzen Abriss der bisherigen Erkenntnisse sowie den o.g. Fragen nach hemmenden oder fördernden Faktoren und den wahrgenommenen Interdependenzen als „Aufgabenstellung“ für die Diskussion. Sie hatten zudem die Funktion, die Teilnehmenden bei der Verschriftlichung ihrer Wortbeiträge in Kurzform zu unterstützen, um so den Rückbezug auf die genannten Aspekte während der Diskussion zu ermöglichen und damit Einstiegspunkte für die anschließende Diskussionsrunde mit anderen Teilnehmer:innen am Tisch zu geben. Die Diskussionen in den beiden Transformation Labs fanden überwiegend in einem sachlichen Stil statt, d.h. es wurde jeweils auf die vorangegangenen Wortmeldungen reagiert, diese unter Umständen präzisiert, mit eigenen Beispielen ausgeführt, hinterfragt, ergänzt oder durch Hinzufügen anderer Aspekte in eine neue Richtung gelenkt. Vereinzelt gab es auch Stellung-

nahmen mit einem konfrontativen Charakter, insbesondere dann, wenn in Wortmeldungen Zuweisungen von Zuständigkeiten konnotiert waren. Zum Ende jeder Runde wurden die Teilnehmenden gebeten, eine Einschätzung zu der Priorisierung der diskutierten Einflussgrößen und Argumente zu geben. Diese wurden dann zusammengefasst im Plenum am Ende des Workshops vorgestellt und das Feedback der Teilnehmenden dazu eingeholt.

Die Teilnehmer:innen diskutierten aus ihrer beruflichen Rolle und ihrer persönlichen Erfahrung heraus relevante Faktoren und beschrieben deren Wirkungsweise auf den am Tisch diskutierten Kernfaktor sowie die Zusammenhänge zwischen den Faktoren. Dabei wurde deutlich, dass die Zusammenhänge häufig mehrdimensionaler Art sind, dass sich also mehrere Einflussgrößen in einem komplexen Gefüge aus Wirkungsketten beeinflussen und daher in ihrer Auswirkung nicht isoliert betrachtet werden sollten.

Doppelter Auswertungspfad

Um die Diskussionsergebnisse aus den beiden zuvor beschriebenen beiden Transformation Labs zu Wasserstoff-Erzeugung und -Einsatz in der Industrie vollumfänglich zu dokumentieren und sie sozialwissenschaftlich auswerten zu können, wurden alle Gesprächsrunden – nach Zustimmung der Teilnehmenden – per Diktiergerät aufgezeichnet.

Zusammen mit den schriftlichen Notizen der Teilnehmenden auf den Brown-paper-Tischdecken ermöglichte dieser Ansatz eine ausführliche Erfassung der Diskussionsinhalte und Argumente. Die Audioaufnahmen wurden softwaregestützt transkribiert und für die weiteren Auswertungsschritte in MAXQDA importiert. MAXQDA ist eine Software, die die Auswertung qualitativer Daten wie z.B. Aufzeichnungen von Interviews, Fokusgruppen oder Diskussionsrunden unterstützt. Jede Diskussionsrunde eines Transformation Labs bildet ein Dokument in MAXQDA, in dem der Personen zugeordnete Gesprächsverlauf wörtlich dargestellt wird.⁵

Die Transkripte der Transformation Labs dienten als Datengrundlage für die beiden miteinander verzahnten Auswertungspfade: die Inhaltsanalyse und die Szenarioanalyse.

Methodisches Vorgehen der Inhaltsanalyse

Die in den Transformation Labs zur Diskussion gestellten Einflussgrößen, abgeleitet aus den Expert:innen-Interviews, bilden die Auswertungskategorien der Inhaltsanalyse mit MAXQDA (vgl. dazu Rädiker & Kuckartz 2019). Jede Kategorie wurde dabei in die Argumentationsrichtungen „treibend“, „hemmend“ oder „sonstige Wirkung“ unterschieden. Diese Differenzierungen bilden die Subkategorien in MAXQDA. Die im Diskussionsverlauf durch die Teilnehmer:innen genannten Beschreibungen und Bewertungen des aktuellen Hochlaufprozesses wurden aus dem Textmaterial der einzelnen Wortmeldungen heraus den Kategorien und Subkategorien zugeordnet, indem sie entsprechend markiert bzw. codiert wurden. Im weiteren Textverlauf wird daher auch von Treibern und Hemmnissen gesprochen.

Auf die eingangs beschriebene Weise lassen sich sowohl der Argumentationsverlauf zwischen den Teilnehmenden als auch die Wirkungsketten der Faktoren nachvollziehen und – auf Basis einer Quantifizierung in Form von Nennungshäufigkeiten und durch ihre inhaltliche Formulierung – die Relevanz der Faktoren hinsichtlich ihrer Wirkrichtung einordnen und interpretieren.

⁵ Da es in jedem Transformation Lab in der Regel drei Thementische mit jeweils drei Diskussionsrunden gab, enthält die MAXQDA-Datei pro Transformation Lab i. d. R. neun Dokumente. Wenn im Veranstaltungsverlauf Teilnehmende nicht bis zum Ende bleiben konnten, wurde ein Tisch z. B. vor Beginn der dritten Runde aufgelöst und die verbleibenden Teilnehmer:innen auf die beiden anderen Tische aufgeteilt, um einen regen und vielfältigen Diskussionsverlauf zu unterstützen. Leider gab es im ersten Transformation Lab einen technischen Defekt an einem Aufnahmegerät, so dass die ersten beiden Runden eines Tisches nicht aufgezeichnet werden konnten.

Die Software MAXQDA bietet dabei unterschiedliche Analysemöglichkeiten z. B. in Form von Häufigkeitsauszählungen auf unterschiedlich tiefen Ebenen der vorgenommenen Kategorisierung und Codierung oder Kreuztabellen. Damit lassen sich Überschneidungen von Faktoren und Argumenten, die Bezugnahme oder Entgegnung auf Ausführungen der Vorredner:innen verdeutlichen und so die Schnittstellen zwischen Perspektiven und Argumenten unterschiedlicher Akteur:innen hervorheben. So wird auch deutlich, dass die vorliegende Auswertung einem Mixed-Methods Ansatz folgt und keine rein qualitative oder quantitative Analyse darstellt.⁶ Die Detail-Ergebnisse der inhaltlichen Auswertung werden in Kapitel 5 dargestellt.

Methodisches Vorgehen der Szenarioanalyse

Auf Basis der in MAXQDA integrierten Transkripte wurden im Nachgang der Transformation Labs in einem softwaregestützten Prozess, der Cross Impact Balance Analyse (CIB), Szenarien für die Zukunft des Markthochlaufs von Wasserstoffherzeugung und dessen industrieller Nutzung konstruiert.

Grundsätzlich werden in einer Szenarioanalyse die Interdependenzen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt, die Aussagen über mögliche Zukünfte erlauben (Kosow & León 2015, S. 219; Kosow & Gaßner 2008, S. 10). Die im NRL zugrunde gelegten Faktoren für die Szenarioberechnung lehnen sich, wie in Kapitel 3 beschrieben, wiederum an die Einflussgrößen an, die aus den Experteninterviews hervorgegangen sind. Anhand der Aussagen und Einschätzungen der Teilnehmenden an den Transformation Labs wurden Interdependenzen zwischen diesen Faktoren aufgezeigt und Wirkungsketten möglicher zukünftiger Entwicklungen gebildet.

Zum genauen methodischen Vorgehen: Für jeden Einflussfaktor wurden anhand aller Segmente des Transkriptes, in denen dieser besprochen wurde, die verschiedenen Ausprägungen identifiziert, in denen sich dieser Faktor nach Auffassung der Stakeholder in Zukunft ausdrücken könnte (z. B. kann der Faktor Genehmigung die Ausprägung „beschleunigt“ oder „langsam“ annehmen, siehe Abbildung 7). Diese Ausprägungen wurden mit Hilfe der Software SzenarioWizard in einer Wechselwirkungsmatrix anhand der Aussagen von stark fördernd (+3) bis stark hemmend (-3) zueinander bewertet (Weimer-Jehle 2023, S. 31).⁷ Die Software rechnet daraufhin sämtliche Kombinationen an Ausprägungen aus und identifiziert Szenarien, die in sich „konsistent“ sind. Sie weisen also plausible interne Zusammenhänge auf und ihre Zukunftspfade sind in sich stimmig und nicht widersprüchlich (Kosow & Gaßner 2008, S. 29).

⁶ Zu der Unterscheidung sowie den Stärken und Schwächen der verschiedenen Ansätze vgl. Kelle 2017.

⁷ So fördert die Ausprägung „beschleunigt“ des Faktors Genehmigungen die Ausprägung „gezielt“ des Faktors Förderung leicht (Wirkung von +1) (siehe Abbildung 7).

	RG	RG	RG	GN	GN	FÖ	FÖ	FÖ	IF	IF	IF
	klar	unklar	strikt	besch	lang	gez	dsch	konk	ausbau	kern	kein
F 1 Regulatorik:											
klar und stabil				2	0	1	-2	-2	0	2	0
unklar				0	3	-1	2	1	-2	-1	1
zu strikt				0	2	-1	2	0	-2	-1	0
F 2 Genehmigungen:											
beschleunigt	0	-1	0			1	-1	0	1	2	0
langsam	0	0	0			0	0	0	-2	-1	0
F 3 Förderung:											
gezielt	0	0	0	0	0				2	0	0
Förderdschungel	0	0	0	0	0				0	0	0
Förderkonkurrenz	0	0	0	0	0				0	0	0
F 4 Infrastruktur:											
großflächiger Netzausbau	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kernnetz	0	0	0	0	0	0	0	0			
kein H ₂ -Netz	0	0	0	0	0	0	0	0			

Abbildung 7: Beispielhafte Wechselwirkungsmatrix aus der Software SzenarioWizard (Screenshot).
Lesart: Die Ausprägung der linken Faktoren hat eine Wirkung auf die Ausprägung der oberen Faktoren.

Die Konsistenz eines Szenarios bemisst sich dabei aus den Konsistenzen der in ihm enthaltenen Faktor-Ausprägungen. Diese leiten sich wie folgt her: Für die in einem Szenario aktive Ausprägung eines Faktors werden die Wirkungen der jeweils anderen aktiven Ausprägung der übrigen Faktoren zu einer Wirkungssumme aufaddiert. Da negative Werte hemmende Wirkungen anzeigen, ist eine Ausprägung mit einer kleinen (und insbesondere negativen) Wirkungssumme wenig logisch und der Wechsel zu einer anderen Ausprägung würde die Plausibilität des Szenarios erhöhen. So ergibt sich für die Ausprägung „großflächiger Netzausbau“ des Faktors Infrastruktur eine maximale Wirksumme von +3 (orange).⁸ Für dieselben Ausprägungen der anderen Faktoren (rot) ist die Wirksumme für die Ausprägung „Kernnetz“ +4 und für die Ausprägung „kein H₂-Netz“ 0. Der Konsistenzwert berechnet sich nun aus dem Abstand der Wirkungssumme der aktiven Ausprägung gegenüber der höchsten Wirkungssumme aller nichtaktiven Ausprägungen. Die Konsistenzwerte der genannten Ausprägungen liegen somit bei -1, +1 und -4.

Ein Szenario als Ganzes wird anhand der Konsistenz des niedrigsten Konsistenzwertes der in ihm enthaltenen Ausprägungen errechnet. Empirisch übersetzt heißt das, dass der Einflussfaktor, der das „schwächste Glied“ eines Szenarios ist, mindestens einen Konsistenzwert von 0 haben muss, damit ein Szenario als Ganzes konsistent ist – da sonst naheliegt, dass eine andere Ausprägung dieses Faktors plausibler wäre (Weimer-Jehle 2023, S. 50 ff).⁹ Somit wäre in diesem Beispiel nur das Szenario mit der Infrastruktur-Ausprägung „Kernnetz“ wirklich logisch (blau).¹⁰

Der Mehrwert einer Szenarioanalyse liegt darin, dass sie eine kollektive Perspektive statt Einzelperspektiven abbilden kann. Die einzelnen Stakeholder:innen können mit ihrer jeweiligen Expertise zur Systemarchitektur beitragen (vgl. Weimer-Jehle 2015, S. 246), ohne selbst jedes Einzelteil überblicken zu müssen. So entsteht ein kohärenter Zugang zum Wissen über den Transfor-

⁸ Dieses Beispiel berücksichtigt nur die in Abbildung 1 abgebildeten Faktoren.

⁹ Ausnahme: Manchmal gibt es nur Szenarien mit Konsistenzwerten unter 0, das kann mitunter auch analysiert werden.

¹⁰ Auch die Ausprägungen der anderen Faktoren haben einen positiven Konsistenzwert. Somit ist das Szenario in der Tat auch als Ganzes konsistent.

mationsprozess, ohne dass alle Zusammenhänge gleichzeitig kognitiv verarbeitet werden müssen (vgl. Weimer-Jehle 2015. S. 246). Zudem dienen die Szenarien als „Bibliothek“, die anhand klarer Codeschemata die Stakeholder-Aussagen rückverfolgbar macht und so ermöglicht, von der systemischen Ebene auf die zugrundeliegenden Stakeholder-Aussagen zurückzuschließen.

Wirkungsketten sichtbar machen

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden für die hier vorliegende Studie die beiden Transformation Labs zur Anwendung von Wasserstoff in der Industrie (11.06.2024) sowie zu Wasserstofferzeugung, -transport und -speicherung (11.09.2024) gemeinsam ausgewertet. Um die Inhaltsanalyse vorzubereiten, wurden dafür in MAXQDA 821 Textstellen mit Argumenten der Lab-Teilnehmer:innen vercodet (vgl. zur Systematik Kapitel 4).

Werden einzelne Themen oder Argumente deutlich öfter diskutiert als andere, dann kann das als ein Indiz für deren Relevanz angesehen werden.¹¹ Vergleicht man also die Häufigkeit, mit der die Diskutant:innen bestimmte Themen adressieren, ist der – mit deutlichem Abstand – am meisten genannte Faktor die **Regulatorik**, gefolgt von **Wirtschaftlichkeit**. Darauf folgt der Faktor **Infrastruktur**, dessen Bedeutung auch in der Erörterung der Szenario-Tableau-Ergebnisse im nachfolgenden Kapitel hervorgehoben wird, sowie – und das ist etwas überraschender – der Faktor **Akzeptanz**. Warum Akzeptanz aus Sicht der Teilnehmenden beider Labs eine relevante Position einnimmt, wird im weiteren Auswertungsverlauf erläutert.

Auswertung: Hürden und Treiber des Hochlaufs

Insgesamt nennen die Teilnehmenden beider Transformation Labs mehr Hemmnisse (diese machen etwa 60 Prozent der Nennungen aus) als Treiber.

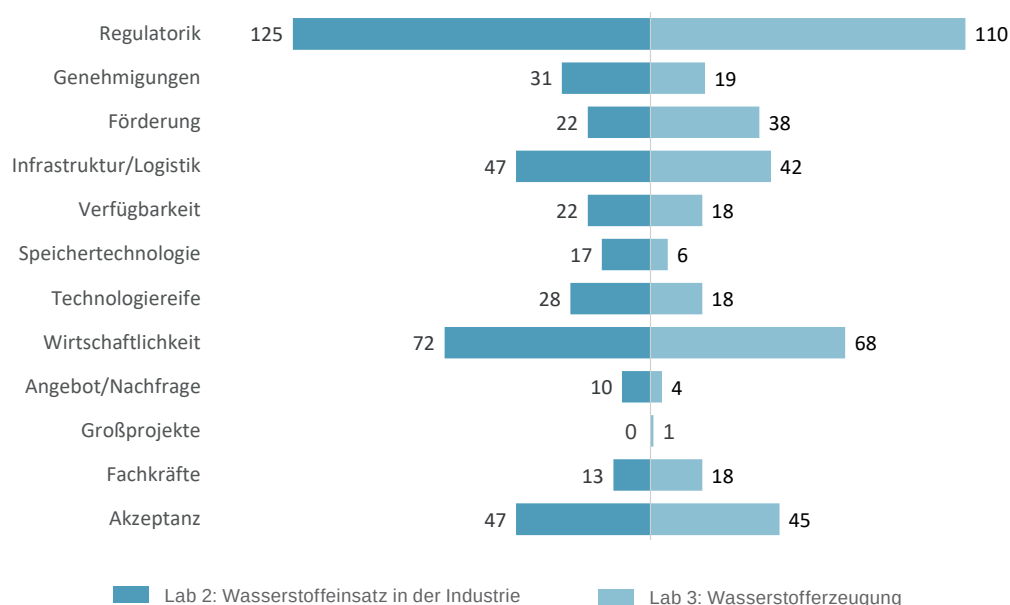


Abbildung 8: Nennungen der Faktoren für Lab 2 (Wasserstoffeinsatz in der Industrie) und Lab 3 (Wasserstofferzeugung) im Vergleich

¹¹ Durch den Fokus auf eine Einflussgröße als bestimmendes Thema für die Diskussion am Tisch (siehe Kapitel 3) kann es zu einer Verzerrung der Ergebnisse der Häufigkeitsauszählung kommen. Auch die unterschiedliche Beteiligung der Teilnehmenden am Tisch beeinflusst die Häufigkeit einer bestimmten Position.

Betrachtet man die Nennungen differenziert nach den beiden Transformation Labs, so zeigt sich ein relativ ausgeglichenes Bild. Lediglich die Faktoren **Förderung, Speichertechnologien, Genehmigungen** und **Technologiereife** lassen Unterschiede erkennen. So wird der Faktor Förderung von den Teilnehmenden des Transformation Labs zur Wasserstofferzeugung öfter thematisiert. Speichertechnologien sowie Genehmigungen und Technologiereife werden dagegen von den Teilnehmer:innen zum Einsatz von Wasserstoff in der Industrie häufiger genannt. Förderung ist im Prozess des Markthochlaufs für die Wasserstoff erzeugenden Unternehmen besonders relevant, während Speichertechnologien Einfluss auf die Kosten und Flexibilität der Wasserstoff einsetzenden Unternehmen nehmen können.

In beiden Transformation Labs werden vor allem zu strenge **regulatorische Anforderungen** als hemmend für den Markthochlauf gesehen, ebenso wie – in Bezug auf die **Wirtschaftlichkeit** – ein fehlendes oder unklares Geschäftsmodell, was wiederum auch eine fehlende Investitionssicherheit inkludiert. Diese beiden Hemmnisse dominieren die Top Ten der Nennungen insgesamt.

Hürde Regulatorik: zu strenge Anforderungen	21
Hürde Wirtschaftlichkeit: fehlendes Geschäftsmodell/Investitionssicherheit	19
Treiber Akzeptanz: Wissen, Kommunikation	18
Treiber Regulatorik: Einsatzgebiete/Regionen H ₂ definieren	14
Hürde Wirtschaftlichkeit: fehlende (Banken-)finanzierung	12
Treiber Regulatorik: Planungssicherheit	11
Hürde Infrastruktur/Logistik: Infrastruktur unfertig (z.B. H ₂ -Leitung)	10
Hürde Akzeptanz: Bezahlbarkeit	10
Hürde Fachkräfte: fehlende Qualifizierungen alle Ebenen	10
Hürde Regulatorik: fehlende Planungssicherheit/Verlässlichkeit Politik	10

Tabelle 1: Top 10 Nennungen Hürden und Treiber

Der unmittelbare Zusammenhang zwischen den beiden Hemmnissen wird in der folgenden Aussage eines Teilnehmers deutlich:

„Man muss nicht gleich am ersten Tag alles grün haben, sondern es ist eine Transformation von 20 Jahren. [...] Und wenn man sozusagen alles nur aufbürdet am Anfang, in der hohen Anforderung, gleich am Anfang, bevor man noch nicht mal transformiert hat, dann macht es eben keiner, weil es nicht wirtschaftlich ist.“ (L2T1R1, 63)¹²

12 Zur besseren Verständlichkeit wurden die wörtlichen Beiträge sprachlich geglättet. Die Angaben in Klammern geben Auskunft, in welchem Rahmen das Zitat geäußert wurde: L verweist auf die Nummer des durchgeführten Labs, T auf den dortigen Diskussionstisch, R bezeichnet die jeweilige Diskussionsrunde. Die Zahl nach dem Komma verweist auf die Gesprächssequenz in MAXQDA.

Neben diesem eher allgemein formulierten Aspekt, einer zu strengen Anforderung – „von Anfang an alles grün zu haben“ – finden sich auch konkreter formulierte Hemmnisse wie z. B. die regulatorische Anforderung in der RED II (englisch: Renewable Energy Directive, kurz RED) – und in etwas angepasster Form auch in der RED III – nach der sogenannten Stundengleichheit (Kriterium Gleichzeitigkeit) der Wasserstoffproduktion und der Erzeugung von grünem Strom. Auch die als Hemmnis empfundene vorgeschriebene Mindestquote von etwa 40 Prozent für grün erzeugten Wasserstoff bis 2030 lässt sich in diese Kategorie der „zu strengen **Regulatorik**“ einordnen, ebenso wie das Kriterium der Zusätzlichkeit, also dass der eingesetzte Strom aus einer neuen, zusätzlich errichteten Anlage stammen soll. Mit dieser Kritik wird die Novelle der 37. BImSchV¹³ und damit die Komplexität des Zusammenspiels von nationalem und EU-Recht angesprochen. Denn die 37. BImSchV dient auch der Umsetzung der RED II¹⁴ und RED III¹⁵ in nationales Recht. Ursprünglich wurden mit der BImSchV klimafreundliche Kraftstoffe und damit die Dekarbonisierung des Verkehrssektor gefördert. Mit der Neufassung erweitert sich der Anwendungsbereich auf den Einsatz und die Erzeugung von grünem Wasserstoff in der Industrie. Die in der Verordnung genannten Kriterien werden von einigen Teilnehmer:innen als Hemmnis für den Markthochlauf bzw. die **Wirtschaftlichkeit** gesehen:

„[...] als Erzeuger haben wir die Situation, dass wir ab 2030 stundengleich Wasserstoff produzieren müssen, also zum gleichen Zeitpunkt muss der erneuerbare Strom da sein. Und das führt dazu, dass der Stromeinkauf immer teurer wird, je mehr Betriebsstunden wir abdecken wollen. Das heißt, wir könnten ja technisch – und auch wirtschaftlich würden wir gerne – den Elektrolyseur 8600 Betriebsstunden oder jedenfalls so viel wie möglich betreiben. Das würde auch den Preis auf ein normales Maß bringen. Aber weil wir ja den Strom stundengleich dann brauchen, müssen wir den entsprechend einkaufen. Das macht es teuer. [...] Das ist eine regulatorische Vorgabe, die große Auswirkungen auf eine Wirtschaftlichkeit hat.“ (L3T1R3, 38)

Kritisiert werden – wie oben dargestellt – die strengen Grünstromkriterien, die hohen Wasserstoffquotenanforderungen und zudem die unterschiedlichen Anreize für die Sektoren – bei der zum Zeitpunkt der Lab-Durchführung der Mobilitätssektor bevorzugt wird. Dies wird als Einschränkung empfunden, die andere Transformationsbereiche und Sektoren ausgrenzt.

„Also, wenn ich mir das angucke, in der 37. Novelle, habe ich doch die Anhänger der Zweige, die sozusagen anrechnen können und die da nicht genannt sind. Für die ist doch die Wasserstoff-Anwendung jetzt eigentlich gestorben. Wirtschaftlich.“ (L2T2R1, 26)

In Bezug auf den Faktor **Wirtschaftlichkeit** dominiert in den Gesprächen vor allem das, was fehlt: ein tragfähiges Geschäftsmodell, die Finanzierung und die Planungssicherheit. Im Spannungsfeld zwischen **Regulatorik** und **Wirtschaftlichkeit** wird in diesem Kontext auch ein Dissens zwischen den Perspektiven der Stakeholder:innen sichtbar: zu starke oder zu häufige An-

¹³ 37. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Neufassung April 2024)

¹⁴ EU-Richtlinie: Renewable Energy Directive II (2018-2023)

¹⁵ EU-Richtlinie: Renewable Energy Directive III (seit 2024 in Kraft)

passungen beeinträchtigen die ebenfalls dringend geforderte Planbarkeit und Verlässlichkeit. Und so votieren einige Teilnehmer:innen dafür, „jetzt ins Doing zu kommen“, und mahnen auch die Notwendigkeit einer unternehmerischen Risikobereitschaft an. Als unterstützende Maßnahmen werden zudem eine klare Definition und Priorisierung der Einsatzgebiete von Wasserstoff genannt:

„Und dann würde es auch eher Sinn machen, sich auch auf Sektoren zu fokussieren, wo es dann schon absehbar ist, dass es da Sinn macht.“ (L3T1R2, 36)

Auch wenn die Nennung von Hemmnissen die Diskussionen der Teilnehmenden dominieren, werden auch fördernde Aspekte gesehen. So finden sich in der Häufigkeitsauszählung auch fördernde Ausprägungen der Faktoren **Akzeptanz** und **Regulatorik** auf den ersten Plätzen. In diesem Kontext zeigt sich auch, dass mit den fördernden Ausprägungen der Faktoren Möglichkeiten umrissen werden, wie den Hemmnissen entgegengewirkt werden kann. So wird beispielweise in der Anpassung der Kriterien für „grünen Strom“ in der Regulatorik ein möglicher Treiber gesehen, der der fehlenden Wirtschaftlichkeit etwas entgensetzt.

Insgesamt stammen die häufigsten genannten fördernden Aspekte prioritär aus den Bereichen **Regulatorik**, **Förderung** und **Genehmigung**. Daneben werden auch Aspekte des Faktors **Akzeptanz** und der **Wirtschaftlichkeit** selbst genannt. An diesem Punkt werden im Übrigen auch Unterschiede zwischen den Transformation Labs deutlich: Im Vergleich sehen die Teilnehmenden des Transformation Labs zu Wasserstoffanwendungen in der Industrie vor allem den Transfer von Wissen und Know-how zwischen den für die Genehmigung zuständigen Behörden als einen relevanten Treiber, gefolgt von einem weltweiten CO₂-Preis. Der Aspekt „Transfer von Wissen und Know-how“ wird im Lab zu Wasserstofferzeugung gar nicht, ein weltweiter CO₂-Preis zumindest seltener genannt. Bei den genannten Hemmnissen sind die Differenzen zwischen den beiden Labs weniger ausgeprägt. Während also überwiegend Konsens hinsichtlich der Problembereiche besteht, werden fördernde Aspekte, also Lösungsmöglichkeiten, eher in unterschiedlichen Bereichen gesehen. Das lässt sich u. a. vor dem Hintergrund der eher regionalen, nationalen oder globalen Ausrichtung und Verbreitung der jeweiligen Unternehmen interpretieren. Die vertretenen Unternehmen im Bereich der Wasserstoffanwendung gehören z. T. zu global agierenden Konzernen, bei den Wasserstoff erzeugenden Firmen oder den Energieversorgern hat der regionale oder nationale Markt und damit die entsprechenden regulatorischen Rahmenbedingungen eine stärkere Bedeutung.

Im Hinblick auf mögliche Handlungsempfehlungen ergibt sich daraus eine gewisse Herausforderung: **Es muss vermutlich sehr genau hingeschaut werden, welche Maßnahmen für bestimmte Akteurskreise unterstützend wirken können – ohne damit wiederum Störfaktoren für andere Marktteilnehmer:innen zu generieren.** In Klimaschutzverträgen bzw. entsprechenden Anreizsystemen sehen Teilnehmer:innen beider Labs beispielsweise eine geeignete sinnvolle **Förderung**. Bürgschaften zur Absicherung

und zur erleichterten Kreditaufnahme bei Banken für Investitionen in Wasserstoffvorhaben werden hingegen von den Teilnehmenden aus dem Lab zur Wasserstofferzeugung als relevant erachtet, während dieses Instrument im Lab zu Wasserstoff in der Industrie keine Erwähnung fand.

Diskussionsverlauf: Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Perspektiven

Betrachtet man den Gesprächsverlauf im Kontext der oben erwähnten fördernden Aspekte, so fällt auf, dass die Einführung eines weltweiten CO₂-Preises vor allem dann im zeitlichen Zusammenhang genannt wird, wenn im Gespräch die wichtigsten Hürden bei der **Wirtschaftlichkeit** diskutiert werden: die Preise im Allgemeinen (Systemkosten, H₂-Preis, OPEX (i. e. Betriebskosten)), ein fehlendes oder unklares Geschäftsmodell ebenso wie eine fehlende Planungssicherheit bzw. die fehlende Kalkulierbarkeit der Kosten. Damit wird die gewünschte Reichweite einer Gegensteuerung deutlich: Aufgrund der Wettbewerbssituation der Schlüsselindustrien für einen Wasserstoffhochlauf geht es im Idealfall um eine global, mindestens aber EU-weit wirksame Maßnahme. Ein höherer CO₂-Preis im EU-Emissionshandel soll einerseits Anreize setzen, in klimafreundliche Technologien, also z. B. Wasserstoff, zu investieren. Andererseits sind energieintensive Industrien wie z. B. die Stahl- oder Chemieindustrie, die in einem internationalen Wettbewerb stehen, von höheren Preisen besonders betroffen, da Kostensteigerungen nicht einfach auf die Produkte umgelegt werden können, wenn außerhalb der EU wiederum keine oder eine niedrigere CO₂-Bepreisung gilt. Ein Teilnehmer formuliert dies so:

„Ja, der globale CO₂-Preis. Also, wenn China, USA, Indien... Wenn die auch auf einem vergleichbaren Level wären, dann hat man ein Level Playing Field und dann kann man auch im internationalen Wettbewerb bestehen.“ (L2T1R1, 39)

Weitere Themen sind der **Fachkräftemangel** sowie fehlende Qualifizierungen der Fachkräfte, die als eine zentrale Hürde betrachtet werden, die sich z. B. auch im Bereich von **Genehmigungen** und der fehlenden Umsetzung „beschleunigter Verfahren“ als Hemmnis erweisen und insbesondere von einzelnen Vertreter:innen der Unternehmensseite angemahnt werden. Andererseits gibt es auch Verständnis für die Komplexität der Aufgaben in den Behörden und Ministerien, die trotz Personalengpässen und regulatorischen Änderungen, nach Möglichkeit rechtssicher beurteilen sollen. In der Kontextanalyse wird hier neben Bürokratieabbau und einer Vereinfachung der Regularien die Idee einer Zusammenarbeit zwischen Behörden und Unternehmen explizit als Lösungsmöglichkeit genannt, bei der die beteiligten Akteure sich nicht als Gegner sehen, sondern als Partner bei der Umsetzung und dem Vorantreiben der Transformation:

„Und vielleicht könnte man ja so was auch für Wasserstoff machen, dass gemeinschaftlich mit behördlichen Akteuren und Akteuren aus der Wirtschaft analysiert wird: Wo sind so die kritischen Dinge? Und da sozusagen Task Forces draufpackt, die dann prioritär kritische Themen vielleicht gemeinsam bearbeiten.“ (L3T1R3, 45)

Neben dem zentralen Faktor **Wirtschaftlichkeit** wird die Relevanz des H₂-Kernnetzes bzw. der Verteilnetze und der damit verbundenen **Verfügbarkeit** von Wasserstoff betont. Dies bezieht sich auf die allgemeine Kritik, dass die **Infrastruktur** im Kontext von Wasserstofftechnologien, also primär das Kernnetz und die notwendigen **Speicherlösungen**, unfertig seien. Spezifischer werden die Entfernung zu den Netzanschlusspunkten, die Entflechtungsvorgaben für Netzbetreiber und die als nicht zukunftsweisend betrachtete Netzplanung problematisiert. Dabei zeigt sich, dass die Unternehmensvertreter:innen mit Blick auf Wirtschaftlichkeit und fehlende Infrastruktur z. T. unternehmensindividuelle Hemmnisse adressieren, wie z. B. Kosten für den Leitungsbau zum nächsten Netzanschlusspunkt, während Behördenvertreter:innen eher eine volkswirtschaftliche Perspektive auf die Rentabilität einnehmen.

„Und da kommen wir zu dem Thema Infrastruktur. Wie wir angefangen haben zu planen, kostete das Projekt rund 16-17 Millionen. Wir sind inzwischen bei 26-27 Millionen. Aufgrund der Kostensteigerungen, aufgrund von Verzögerungen durch Lieferengpässe. [...] Wir haben für unser Projekt, der vier Megawatt Elektrolyseur, haben wir eine Förderung bekommen von 45 % und Abfüllstationen. [...] Aber was diese Infrastruktur vom Park zum Netzverknüpfungspunkt bedeutet, das können die meist gar nicht greifen. Das sind Millionen. Und wie gesagt, das kann man nur in einem gemeinschaftlichen Projekt machen. Und das betrifft ja nicht nur den Norden, es betrifft ja alle. Und das ist ein Hemmnis für den Ausbau der erneuerbaren Energie, wenn das wirtschaftlich dann eng wird.“ (Sprecher:in = H₂-Produktion, L3T3R2, 22)

„Angenommen, das wäre so, dass der Staat die Leitung nur dafür baut, das ändert ja nichts an der Rentabilität des Gesamtprojekts. Wenn es für das Einzelprojekt nicht rentabel ist, dann wird es ja sozusagen dadurch, dass ich von staatlicher Seite aus das Kabel da hinlege, wird das Projekt ja trotzdem volkswirtschaftlich gesehen nicht rentabel.“ (Sprecher:in = Behörde, L3T3R2, 25)

Während Problembereiche wie Entflechtungsvorgaben und entfernte Netzanschlusspunkte vor allem die Wirtschaftlichkeit und Investitionsbereitschaft hemmen, wird mit der Kritik an der Zukunftsfähigkeit der Planung die zeitliche Dimension adressiert: Denn nicht nur Planung und Genehmigung von Infrastrukturvorhaben sind enorm zeitaufwändig, auch die Umsetzung, der Bau benötigt Zeit. Muss aufgrund unzureichender Planung nachgebessert und ergänzt werden, steigert dies nicht nur die Kosten, sondern es verlängert auch den Prozess an sich:

„...und das Nächste ist dieses Grundverständnis, dass es eben dieser Infrastruktur bedarf. Ich kann auch nicht Fahrrad fahren, wenn kein Fahrradweg da ist. Und dass dieses langfristiger zu planen ist als ein industrieller Investitionshorizont, [der] ist in der Regel zwei Jahre. Wenn Sie innerhalb von zwei Jahren Ihre Anlage nicht reinvestiert kriegen, maximal fünf Jahre, dann werden Sie das Ding nicht anpacken. Infrastruktur rechnet sich aber erst über 20 Jahre, braucht aber mindestens zehn Jahre Vorlauf, und das ist einfach ein Unterschied.“ (L2T3R2, 28)

Die zwei Kernhemmnisse des Hochlaufs aus Sicht der wirtschaftlichen Akteur:innen sind also, dass aktuell weder eine ausreichende Infrastruktur vor-

handen ist noch die begründete Aussicht auf eine solche besteht und zudem bislang kein wirtschaftliches Geschäftsmodell existiert.

Unterscheidet man bei der Analyse der genannten Treiber und Hemmnisse danach, ob diese seitens der Unternehmen genannt wurden, die grünen Wasserstoff einsetzen (wollen), oder ob sie seitens der Erzeugerseite fallen, werden Unterschiede sichtbar.

	H₂ Anwendung	H₂ Erzeugung
Treiber Regulatorik: klare Leitlinien definieren	3	1
Treiber Regulatorik: Planungssicherheit	2	4
Hürde Regulatorik: zu strenge Anforderungen	2	4
Hürde Regulatorik: unklare strukturpolitische Richtung	2	2
Hürde Regulatorik: fehlende Planungssicherheit/ Verlässlichkeit Politik	1	4
Hürde Regulatorik: Kriterium Strompreis regelmäßig anpassen	0	4
Hürde Regulatorik: Rahmen, unklares Vergütungsmodell (H ₂ -Speicher)	0	4
Hürde Genehmigungen: zu lange Dauer	3	2
Treiber Förderung: Flexible, krisenstabile Förderung	4	0
Treiber Förderung: Klimaschutzverträge/Anreizsysteme	1	3
Treiber Förderung: Förderprogramm H ₂ /Ely (Konkurrenzfähigkeit)	3	2
Hürde Infrastruktur/Logistik: Infrastruktur unfertig (z.B. H ₂ -Leitung)	2	3
Treiber Wirtschaftlichkeit: (weltweiter) CO ₂ Preis	3	2
Hürde Wirtschaftlichkeit: fehlendes oder unklares Geschäftsmodell/ Investitionssicherheit	2	4
Hürde Wirtschaftlichkeit: Preiserhöhungen	1	3
Treiber Akzeptanz: Wissen, Kommunikation	3	2
Hürde Akzeptanz: Bezahlbarkeit	1	3

Tabelle 2: Nennungen von Treibern und Hürden nach anwendenden und erzeugenden Akteuren

Kritik an der bestehenden **Regulatorik** wird primär von der Erzeugerseite geäußert, z. B. hinsichtlich zu strenger Anforderungen, der fehlenden Planungssicherheit, einer fehlenden regelmäßigen Anpassung des Strompreises und des Rahmens für ein Vergütungsmodell zur Wasserstoffspeicherung. Die zu lange Dauer von **Genehmigungen** und unklar definierte Leitlinien werden dagegen eher von der Anwenderseite angemahnt.

Übereinstimmend wird von beiden Seiten, also von Teilnehmer:innen aus der Wasserstoffanwendung wie aus der Wasserstofferzeugung, die unfertige **Infrastruktur** als Hürde eingestuft. Eine globale CO₂-Bepreisung sowie eine EU-weite Förderung von Wasserstoffprojekten/-erzeugung werden hingegen als unterstützende Maßnahmen für die Konkurrenzfähigkeit der betroffenen Unternehmen angesehen.

„Aber [wir] würden auch gerne zukünftig noch weitere Projekte umsetzen. Und das wird wahrscheinlich nicht ohne Förderung gehen, weil die Wirtschaftlichkeit aktuell noch nicht gegeben ist. Es gibt zum Beispiel auf EU-Ebene Förderprogramme von der EU Hydrogen Bank. Es haben aber gar keine deutschen Projekte den Zuschlag bekommen, weil eben in anderen europäischen Ländern die Strompreise geringer sind. Und deswegen ist es eben sehr wichtig, wenn der Wasserstoffhochlauf nicht abgewürgt werden soll, dass da noch weitere Förderprogramme auch auf deutscher Ebene gestartet werden für Wasserstofferzeugung.“ (L3T1R2, 21)

Auf die Bedeutung des Faktors **Akzeptanz** wurde bereits mehrfach hingewiesen. Auch in der eingangs dargestellten Abbildung (Nr. 8) zeigt sich, dass der Faktor Akzeptanz nach Regulatorik und Wirtschaftlichkeit zusammen mit Infrastruktur/Logistik den dritten Platz in der Häufigkeitsauszählung einnimmt und zudem von den Teilnehmer:innen der beiden Transformation Labs gleichermaßen thematisiert wird. An diesem Aspekt wird deutlich, dass die industrielle Transformation auch in den weniger sichtbaren Anwendungsfeldern von Wasserstoff ohne gesellschaftliche Teilhabe – als wichtige Voraussetzung für Akzeptanz – nicht vorankommt.

So werden z. B. in der Verständlichkeit der komplexen Systemzusammenhänge, in den Kosten der Transformation ohne einen wirklichen sozialen Ausgleich und in den noch deutlich steigenden Belastungen des Um- bzw. Ausbaus der **Infrastruktur** wesentliche Hürden für die Transformation gesehen. Eine wirksame Gegenmaßnahme, und in diesem Punkt sind sich die Teilnehmenden einig, kann nur in einer deutlich veränderten Kommunikation liegen, die vor allem das positive „Wofür“ der Belastungen hervorhebt, transparent und glaubwürdig den Fahrplan der Transformation vermittelt und neben einer verstärkten Ausbildung und Wissensvermittlung in den relevanten Bereichen auch Beteiligungsformen für Bürger:innen schafft.



Abbildung 9: Häufigkeitszählung der Nennungen mit Akzeptanzbezug in den Labs zur Wasserstoffherzeugung sowie zu dessen Einsatz in der Industrie 2024, ca. 47 Teilnehmende, Angaben=Nennungen

Die Auswertung der beiden Transformation Labs zur Wasserstoffherzeugung und -anwendung macht deutlich, dass **Wirtschaftlichkeit** in der Diskussion der Teilnehmer:innen zum Thema Markthochlauf eine zentrale Rolle einnimmt – insbesondere das Fehlen von Finanzierungsmöglichkeiten, tragfähigen Geschäftsmodellen und Planungssicherheit. Deutlich wird aber auch, dass Wirtschaftlichkeit nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern im Zusammenwirken mit **regulatorischen Hürden** (wie zu strenge Anforderungen und komplexe Vorgaben) gesehen werden muss. Auch die noch **“unfertige” Infrastruktur, lange Genehmigungsprozesse** und eine fehlende Zukunftsfähigkeit der Planung werden als Hemmnis für den Hochlauf gesehen, der die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff beeinträchtigt.

Unterschiede zwischen den Perspektiven von Wasserstoff erzeugenden und anwendenden Unternehmen zeigen, dass **Fördermaßnahmen** und **regulatorische Anpassungen** differenziert betrachtet werden müssen, um nicht an anderer Stelle ein neue Hemmnisse zu erzeugen.

In der Diskussion formulierten die Teilnehmer:innen durchaus auch Lösungsansätze – wie etwa die Einführung eines globalen CO₂-Preises, gezielte Förderprogramme und eine verbesserte Zusammenarbeit zwischen Behörden und Unternehmen.

Die Vielzahl der genannten Faktoren zeigt, dass der Markthochlauf von Wasserstofftechnologien ein überaus komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Einflussgrößen ist: von Wirtschaftlichkeit über Regulatorik bis hin zu Infrastruktur und Akzeptanz spielen ganz verschiedene Voraussetzungen eine Rolle. In der folgenden Szenarioanalyse wird systematisch betrachtet, wie die einzelnen Faktoren zusammenhängen und sich wechselseitig bedingen oder beeinflussen.

Wasserstoff im Hemmnis-Kreislauf

Die vorangehende Inhaltsanalyse hat gezeigt, welche Themen und Einflussfaktoren die Diskussion in den Transformation Labs dominierten. Dies kann ein Fingerzeig auf die wichtigsten Stellschrauben für den Markthochlauf sein. Es ist jedoch unerlässlich, genauer auf das Zusammenspiel dieser Faktoren zu blicken, um das soziotechnische System rund um die Einführung von Wasserstofftechnologien in der Industrie in seiner Ganzheit erfassen und seinen derzeitigen Zustand analysieren zu können.

Mittels einer Cross-Impact-Balance-Analyse (vgl. Kapitel 4 Methode) werden im Folgenden Abhängigkeiten, Wirkungsketten und Sachzwänge der identifizierten Faktoren greifbar zu machen. Die aus den Diskussionen in den Transformation Labs herausgearbeiteten Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren für den Markthochlauf bilden die Basis für verschiedene Szenarien, die mögliche Zukünfte abbilden. Sie helfen dabei, mögliche Entwicklungspfade und deren zugrundeliegende Wirkungsketten des Hochlauf aufzuzeigen und können damit als Entscheidungsgrundlage dienen, um einen Transformationsprozess ggf. mit Maßnahmen in Richtung einer gewünschten Entwicklung zu unterstützen und nicht-intendierte Nebenfolgen zu verhindern (vgl. Jaede, Meyer-Ghosh & Saidi 2025, S. 449).

Die Teilnehmenden in den Transformation Labs beschrieben dezidiert aus ihrer jeweiligen Perspektive, welche Bedingungen und Entwicklungen den Markthochlauf behindern oder auch begünstigen. Das im Folgenden gezeigte Szenarioportfolio beschreibt damit die Bandbreite der möglichen Zukunftsentwicklungen (Weimer-Jehle 2023, S. 59), wie sie – basierend auf den von den teilnehmenden Stakeholdern in den Transformation Labs getätigten Aussagen – zustande kommen könnten.

Die Betrachtung der sich ergebenden Szenarien muss immer unter Berücksichtigung der expliziten oder impliziten Normativität erfolgen: Sie können nicht als objektive Wahrheit gelten, sondern stehen immer unter dem Vorzeichen der Haltung der teilnehmenden Stakeholder, aber auch des zugrunde gelegten Forschungsinteresses. Da das Norddeutsche Reallabor und seine Teilvorhaben explizit das Ziel verfolgen, den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien zu unterstützen, werden die Szenarien folglich auch vor diesem Hintergrund ausgewertet: Der schnelle, reibungslose Hochlauf wird als wünschenswertes Ziel definiert.

Szenarioportfolio: Fehlende Mittelwert-Szenarien

Für die Auswertung der Transformation Labs zu Wasserstofferzeugung und -einsatz in der Industrie gibt die Software insgesamt fünf konsistente Szenarien aus. Diese im Vergleich zu vielen anderen Szenarioanalysen recht niedrige Anzahl begründet sich darin, dass in der Matrix eine große Anzahl negativer Zusammenhänge formuliert ist. Das heißt nicht, dass diese inhaltlich

negativ sind, sondern, dass viele Ausprägungen andere hemmen.¹⁶ So ergeben sich insgesamt nur wenige Szenarien, die in ihrer Wirkungssumme positiv sind, schließlich können Szenarien nur dann als logisch plausibel gelten, wenn sie einen Konsistenzwert von mindestens 0 aufweisen.¹⁷ Insbesondere mit Blick auf das Ziel eines Markthochlaufs von Wasserstoff muss festgestellt werden, dass kaum Zusammenhänge vorliegen, die doppelt positiv sind, d. h. einen positiven Wert in der Matrix aufweisen und die damit in den auf den Hochlauf begünstigenden Ausprägungen eines Faktors positiv wirkend sind.

Dennoch sind die generierten Szenarien in ihrer Kombination aussagekräftig. Die geringe Anzahl der ausgegebenen Szenarien spiegelt zwei Umstände des Markthochlaufs von Wasserstoffnutzung in der Industrie und Wasserstoffherzeugung, so, wie die eingebundenen Stakeholder:innen ihn beschreiben, wider: Erstens ist er noch nicht sehr dynamisch, sodass die Lab-Teilnehmenden insgesamt nur wenige starke Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren formuliert haben. Viele der für die Zukunft prognostizierten Zusammenhänge wurden daher vorsichtiger formuliert, insbesondere bei fördernden Ausprägungen. Zweitens spricht dieser Umstand dafür, dass die innere Beschaffenheit des soziotechnischen Systems des Markthochlaufs aktuell in einem Teufelskreis gefangen ist, bei dem viele der untersuchten Faktoren sich nicht nur wechselseitig, sondern in Zirkelbeziehungen hemmen – ein Faktor beeinflusst den jeweils nächsten, so dass ein Hemmnis-Kreislauf entsteht.

Hochlauf-Szenario	Blockade-Szenarien			
Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 5
F 1 Regulatorik: klar und stabil	F 1 Regulatorik: unklar	F 1 Regulatorik: zu strikt	F 1 Regulatorik: unklar	
F 2 Genehmigungen: beschleunigt	F 2 Genehmigungen: langsam			
F 3 Förderung: gezielt	F 3 Förderung: Förderdschungel		F 3 Förderung: Förderkonkurrenz	F 3 Förderung: Förderdschungel
F 4 Infrastruktur: großflächiger Netzausbau	F 4 Infrastruktur: kein H2-Netz			
F 5 Verfügbarkeit: gegeben	F 5 Verfügbarkeit: unklar			
F 6 Speichertechnologien: schneller Ausbau	F 6 Speichertechnologien: schleppender Ausbau			
F 7 Technologiereife: Fragen geklärt	F 7 Technologiereife: Erprobungszustand			
F 8 Wirtschaftlichkeit: gegeben	F 8 Wirtschaftlichkeit: unklar			
F 9 Fachkräfte: gezielte Ausbildung	F 9 Fachkräfte: gleichbleibender Mangel			
F 10 gesellschaftliche Akzeptanz: Beteiligung	F 10 gesellschaftliche Akzeptanz: Vor-Ort Widerstand			F 10 gesellschaftliche Akzeptanz: Kosten

Abbildung 10: Szenario-Tableau zu Lab 2 und 3 (Screenshot aus ScenarioWizard)

Von den fünf Szenarien, die die Software ausgibt, ergibt sich lediglich ein einziges Hochlauf-Szenario (vgl. Szenario 1, Abbildung 10). Zwar sind auch die Szenarien 2 bis 5 in sich konsistent und beschreiben damit eine mögliche, aber nicht wünschenswerte Zukunft, weil sie nicht zu einem Hochlauf von Wasserstofftechnologien führen würden. Aus der Perspektive des NRL,

¹⁶ Beispielsweise kann eine klare stabile Regulatorik einen Förderdschungel hemmen (Wirkung von -2, aber aus NRL-Sicht wünschenswert).

¹⁷ Siehe Kapitel 3.

das ja den Hochlauf anstrebt, müssen sie also eher als Blockade-Szenarien bezeichnet werden. Der Kontrast des Hochlauf-Szenarios zu ebendiesen vier Blockade-Szenarien, von denen sich das Hochlauf-Szenario ebenso in jeder einzelnen Ausprägung unterscheidet, zeigt jedoch deutlich, dass das wünschenswerte Hochlauf-Szenario noch weit von der Realität entfernt ist.

Dass keine „Mittelweg“-Szenarien existieren, heißt nicht, dass diese unmöglich sind, sondern dass die aktuelle Sicht der Stakeholder auf das Gesamtsystem auf eine festgefahrene Situation hinweist. Die Zusammenhänge im Status Quo sind von den Stakeholdern so beschrieben worden, dass die Ausprägungen der verschiedenen Faktoren so miteinander verzahnt sind, dass „Mittelweg“-Szenarien auf dieser Datenbasis in sich keine logische Konsistenz haben. Auch dieser Umstand spricht dafür, dass sich einzelne Faktoren nicht in die angestrebte Richtung eines Wasserstoffhochlaufs entwickeln können, solange andere sie beeinflussende Faktoren unverändert bleiben.

Aus dem Hochlauf-Szenario lassen sich die Bedingungen für einen erfolgreichen Markthochlauf, ableiten. Wichtigste Erkenntnis ist dabei, dass dieses Szenario sich nicht nur von den Blockade-Szenarien, sondern auch vom Status Quo nicht nur in einzelnen, sondern in nahezu allen Faktoren unterscheidet. Keine der im Hochlauf-Szenario enthaltenen Ausprägungen stimmen so mit dem gegenwärtigen Stand des Markthochlaufs überein.

Dieser Umstand weist auf einen kritischen Zeitpunkt im Markthochlauf hin: Offenbar wird er nicht an einzelnen Stellen gebremst, sondern das Gesamtsystem befindet sich aus Sicht der Teilnehmenden in einem unvorteilhaften Zustand, weil die Faktoren so ineinander verschränkt sind, dass sie wünschenswerte Entwicklungen des Markthochlaufs blockieren. Die Stakeholder:innen konnten in den Labs zwar benennen, wie ihr jeweiliger Idealzustand für einzelne Einflussfaktoren des Markthochlaufs aussehen müsste, jedoch ist ihren Ausführungen folgend derzeit kein Weg dorthin erkennbar, der nicht die vollständige Veränderung aller untersuchten Faktoren beinhaltet. Kein Szenario weist darauf hin, dass es zukünftig ein Gesamtsystem des Markthochlaufs geben wird, in dem nur einzelne Faktoren förderliche Entwicklungen nehmen. Somit muss aus dem Szenarioportfolio geschlossen werden, dass der Markthochlauf nur dann erfolgen kann, wenn alle Faktoren und ihre jeweiligen Wechselwirkungen – die im Folgenden explizit herausgearbeitet werden – gleichzeitig in den Blick genommen werden und Maßnahmen entwickelt werden, die das Gesamtsystem aus seinem Stillstand lösen. Wirtschafts- und energiepolitische Strategien sollten diesen Umstand berücksichtigen, damit isolierte Einzelmaßnahmen nicht wirkungslos bleiben oder nicht-intendierte Nebeneffekte zur Folge haben.

Die Auflösung eines solchen gesamtsystemischen Dilemmas ist möglich, indem die Faktoren identifiziert und bearbeitet werden, die einerseits einen breiten Einfluss auf andere Faktoren und somit starke Effekte auf das Gesamtsystem haben und andererseits direkte Möglichkeit zur Einflussnahme durch die koordinierenden Akteure, beispielsweise die Politik, bieten. Im Folgenden

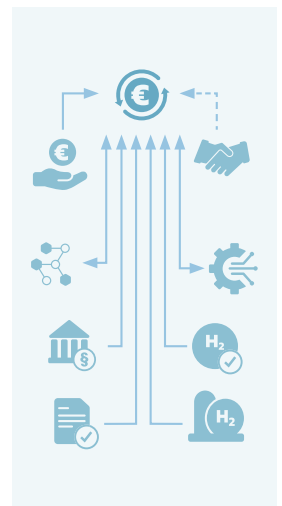
konzentriert sich die Analyse daher auf das Bündel der Blockade-Szenarien¹⁸ und die Mechanismen, die das soziotechnische System des Markthochlaufs wechselseitig hemmen.



Abbildung 11: In den Labs diskutierte Einflussfaktoren für den Markthochlauf

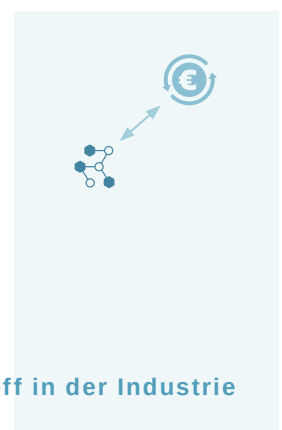
Auswertung: Kein Hochlauf ohne Wirtschaftlichkeit

Wie bereits hervorgehoben, wird die **Wirtschaftlichkeit** von Wasserstofftechnologien von allen Stakeholder:innen einstimmig als „Muss-Faktor“ identifiziert. Da die Akteure im Markthochlauf in der Mehrzahl kommerzielle Unternehmen sind, ist ein Hochlauf ohne Profitabilität nicht vorstellbar. Dabei wird Wirtschaftlichkeit den Aussagen der Lab-Teilnehmenden zufolge von einer Vielzahl anderer Einflussgrößen direkt beeinflusst, hat aber selbst nur verhältnismäßig wenig Einfluss auf andere Faktoren. **Wirtschaftlichkeit kann somit als Zielfaktor des Markthochlaufs verstanden werden.** Die Analyse kann also darauf ausgerichtet werden, die Konfigurationen der übrigen Einflussgrößen zu untersuchen, die zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit von Wasserstofftechnologien führen, und gleichzeitig diejenigen, die unerwünschte Outcomes liefern, daraufhin zu untersuchen, wie sie eine positive ökonomische Entwicklung hemmen.



Wie gezeigt, ist die am zweithäufigsten genannte Hürde ein fehlendes Geschäftsmodell beziehungsweise die fehlende Investitionssicherheit (siehe Tabelle 1, S 22). Der Weg zu einem perspektivischen Geschäftsmodell hängt dabei neben einer großen Unklarheit der zukünftigen Wasserstoffpreise auch an einer Vielzahl der anderen Faktoren, die interdependent auf die Wirtschaftlichkeit und aufeinander wirken. Dieser Mangel an wirtschaftlicher Perspektive bedingt auch ein anderes häufig genanntes Hemmnis: die mangelnde Bereitschaft von Banken, Projekte zu finanzieren.

Daher ist der Blick auf **Wirtschaftlichkeit** essenziell, um die für sie fördernden Ausprägungen anderer Faktoren, insbesondere die der **Infrastruktur**, zu untersuchen. Wie auch die Inhaltsanalyse im vorangehenden Kapitel zeigen die Szenarien wenig überraschend, dass eine kritische Interdependenz



¹⁸ Da sich die Blockade-Szenarien in sich stark ähneln, ist es sinnvoll, sie für die Analyse gemeinsam zu betrachten.

zwischen diesen beiden Faktoren existiert: Ohne (Pipeline-)Infrastruktur kann in Elektrolyseuren erzeugter grüner Wasserstoff nicht zur Industrie transportiert werden. Geschäftsbeziehungen sind also in diesem Stadium kaum möglich, da der Transport per Trailer für den Wasserstoffbedarf der Industrie in den seltensten Fällen eine Option ist. Da es aktuell aber keine realistische Preisvorhersage für grünen Wasserstoff gibt, ist der Bau der benötigten H₂-Netze – sowohl des Kernnetzes als auch möglicher Verteilnetze – von erheblichen wirtschaftlichen Unsicherheiten gezeichnet.

„Die Spanne, die Leute aufrufen für Wasserstofferzeugung, ist groß. Es gab diese Wasserstoff-Auktion von der EU, wo auch Fördermittel ausgeschrieben wurden, und dann sind dabei irgendwo auch die Informationen herausgekommen, was die Leute an Wasserstoff-Gestehungskosten für ihr Projekt angeben. Das schwankt in Deutschland von 4,50 € oder 5 € und etwas bis 26 €. [...] Da ist einfach noch so viel Volatilität und ein bisschen Willkür wahrscheinlich drin in dem, wie man die Wirtschaftlichkeit ansetzt, dass man gar nicht sagen kann, das ist wirtschaftlich und das nicht.“ (L3T1R2, 68)

Da anders als in der Vergangenheit Infrastruktur nicht mehr direkt von staatlichen Stellen umgesetzt wird, muss, um dieses Impasse zu überwinden, eine Planungssicherheit für die infrastrukturenschaffenden Akteure gegeben sein.

Dieses Wirkungspaar wiederum ist stark von dritten Faktoren beeinflusst: Hier identifizieren die Stakeholder insbesondere **Regulatorik** und **Förderung** als zentral und attestieren ihnen einen hemmenden Effekt auf den Infrastrukturausbau (vgl. auch Kapitel 5).

Die erhebliche Relevanz des Faktors Infrastruktur wird in den vier Blockade-Szenarien widergespiegelt: alle vier verzeichnen die Ausprägung „kein H₂-Netz“. Zwar kann nicht umgekehrt daraus geschlossen werden, dass ein bestehendes Wasserstoffnetz allein zu einer wünschenswerten Entwicklung der **Wirtschaftlichkeit** führt, jedoch lässt sich Infrastruktur hierin deutlich als Faktor identifizieren, bei dem eine gezielte Einwirkung hin zu erwünschten Entwicklungen einen erheblichen wünschenswerten Effekt haben könnte. Mit den Plänen der Bundesregierung für das Wasserstoff-Kernnetz gibt es bereits politische Impulse, um diese Situation zu überwinden, indem konkrete Regulatorik geschaffen wird, die die Umrüstung von Erdgas- sowie den Neubau von Wasserstoff-Pipelines regelt und Instrumente bereitgestellt, die den Akteuren wirtschaftliche Sicherheit geben sollen.

„Das ist für die Wasserstoffnetze, dieses Amortisationskonto. Aber die Importterminals, die werden privat gebaut. [Andere Person:] Man muss ja auch sagen, das ist jetzt ja eine Maßnahme von der Bundesregierung, um das zu erreichen, was die EU mal vorgeschrieben hat.“ (L2T2R2, 27)

Dennoch sind die Wirtschaftlichkeitsperspektiven der Erzeugungs- und Industrienutzungsvorhaben so lange unsicher, wie die Umsetzung der Pläne nicht konkret absehbar ist. Die Formulierung einer Teilnehmerin unterstreicht die Dringlichkeit solcher Entscheidungen:



„Die Investitionsentscheidungen müssen jetzt getroffen werden. Und wenn man irgendwelche Marker für in zwei, drei, vier oder auch fünf Jahren setzt, dann ist es eigentlich schon zu spät. Weil jetzt müssen die Planungen halt anfangen, damit wirklich die ersten Leitungen vom Kernnetz nachher 2027/28 da sind.“ (L2T3R1, 60)

Investitionsentscheidungen auf Erzeuger- und Nutzer-Seite werden somit noch einige Jahre von Unsicherheiten behaftet bleiben. Die wechselseitige Hemmung von Wirtschaftlichkeit und Infrastruktur ist eines von mehreren Beziehungsgeflechten, die im Gesamtsystem den Markthochlauf aktuell blockieren.

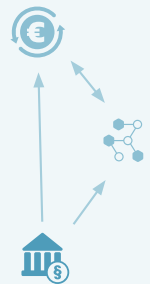
Auch darüber hinaus zeigt sich in der Analyse, dass **Regulatorik** einen breiten Einfluss auf die übrigen Faktoren ausübt, insbesondere auch – wie bereits diskutiert – auf **Wirtschaftlichkeit** und **Infrastruktur**. Die Analyse zeigt, dass Regulatorik in den Transformation Labs mit Abstand als häufigste Hürde genannt wird, häufiger noch als der Zielfaktor Wirtschaftlichkeit. Neben zu strenger Regulatorik zeigt die Szenarioanalyse, dass insbesondere auch unklare regulatorische Rahmenbedingungen einen starken hemmenden Effekt auf eine große Anzahl als anderer Faktoren haben, darunter direkt und indirekt Wirtschaftlichkeit.

So identifizieren diverse Stakeholder die „unklare Regulatorik“ als Hemmnis für die Wirtschaftlichkeit, weil die Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff (zum Zeitpunkt der Durchführung der Transformation Labs) noch keine vollständige Planungssicherheit haben, beispielsweise in Bezug auf die Anrechenbarkeit auf CO₂-Quoten. Insbesondere wird moniert, dass zwar mit der RED III von der EU grundsätzliche Kriterien festgelegt wurden, unter welchen Bedingungen Wasserstoff als „grün“ gilt, die Anrechenbarkeit aber zum Zeitpunkt des Labs nur für den Verkehrssektor und somit nicht für Industrien wie Stahl, Kupfer oder ähnliches im nationalen Recht umgesetzt sind (vgl. 37 BlmschV).¹⁹ Ohne belastbare rechtliche Rahmenbedingungen sind Wirtschaftlichkeitsprognosen jedoch weiterhin unsicher, sodass viele Akteure ihre Investments zurückhalten.

Gleichzeitig werden die Kriterien zur Anerkennung von grünem Wasserstoff in mehreren Punkten als zu strikt erachtet. Unter anderem werden die Strombezugs-kriterien angeführt, die aus Sicht der Stakeholder die Erzeugung von grünem Wasserstoff wesentlich verteuern und so auch die Wirtschaftlichkeitsperspektive der Nutzung in der Industrie verschlechtern.

„Beim Thema Strombezug – wir haben auch unseren Elektrolyseur-Plan – haben wir extra an einem Punkt im Netz, wo er grünen Strom bezieht, also wo viel Offshore-Windstrom ankommt, angesetzt. Also, wir stehen da wirklich voll hinter und wollen grünen Strom produzieren. Aber

19 Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung zeigt sich ein anderer Sachstand: So gilt die RED III in Deutschland für alle Sektoren. Mit der aktuellen Novelle wurden verbindliche und spezifische Zielvorgaben sowie Mindestquoten für den Einsatz von EE und RFNBO-Wasserstoff auch für die Industrie, den Wärme- und Gebäudesektor sowie den Energiesektor eingeführt. Für die Industrie gibt es zum Beispiel eine verpflichtende Quote für erneuerbaren (RFNBO-)Wasserstoff im industriellen Verbrauch (42 % bis 2030, 60 % bis 2035) (siehe z. B. hier: (Mohr 2025) abzurufen unter <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/mindestanteile-fuer-gruenen-wasserstoff-in-der-industrie-die-folgen-der-red-iii/> (letzter Zugriff am 07.11.2025)).



diese RED-II-Kriterien oder allgemein Stromkriterien für grünen Wasserstoff – die sind halt sehr streng – führen dazu, dass der Strompreis sich stark erhöht für uns. Und da werben wir schon mal dafür, dass diese Kriterien auch noch mal überarbeitet werden, dass man halt schaut, kann man das beispielsweise an den Börsenpreis irgendwie koppeln.“ (L3T3R3,18)

Auch die von der EU angestrebten Quoten zur Nutzung von grünem Wasserstoff in der Industrie sind laut den an den Labs teilnehmenden Stakeholdern sehr ambitioniert.

„Ich finde, also ein Thema, was ich gerade jetzt auf Seiten der Regulatorik total relevant finde, das bei uns auch viel diskutiert wird, ist diese Mindestquote für grünen Wasserstoff in der Industrie, die in der neuen Erneuerbare-Energien-Richtlinie vorgeschrieben wird, die besagt, dass 40 % des Wasserstoff bis 2030 grün sein sollen. Von dem Wasserstoff, der aktuell also eingesetzt wird, ist das schon eine riesige Menge. Wir haben das mal runtergerechnet: Wenn man jetzt 5000 Volllast-Stunden annimmt statt jetzt 7000, dann sind wir da bei sieben Gigawatt Elektrolyseleistung und zehn wollen wir bis 2030 haben. [...] Und da ist ja noch nicht mal klar, ob das schaffbar ist eigentlich.“ (L2T2R2, 30)

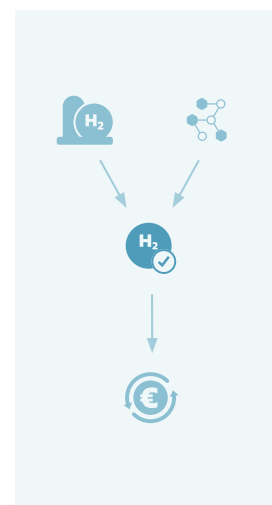
Um diese Quoten zu erreichen, müssten schon vor der Fertigstellung des Kernnetzes verlässliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit Akteure in Wasserstofferzeugung und industrielle Nutzung investieren.

Auf der Nutzungsseite ist **Verfügbarkeit** ein wichtiger Faktor, da Prozesse nur dann umgerüstet werden können, wenn durch den Ausbau von **Infrastruktur** und **Speichertechnologien** sichergestellt ist, dass zum anvisierten Zeitpunkt auch grüner Wasserstoff in ausreichender Menge, Qualität und Stabilität verfügbar ist, um den Betrieb und seine **Wirtschaftlichkeit** zu gewährleisten. Insbesondere für die Erzeugung wäre ein längerfristiges Fortbestehen des Status Quo problematisch, da die Abnehmerseite ihren qua Regulatorik bestehenden Bedarf an grünem Wasserstoff höchstwahrscheinlich noch stärker als ohnehin auf Importe fokussieren würde, wenn es für lokale Erzeugungsprojekte keine Planungssicherheit gäbe und Verfügbarkeit aus der lokalen Erzeugung unsicher bliebe. Erzeugungsprojekte wiederum würden durch diese Entwicklung noch stärker beeinträchtigt, weil sie nur mit Abnahmegarantien Kredite bekämen.

Eine Entwicklung hin zu einer eindeutigeren Regulatorik wird in den Transformation Labs durchaus gewürdigt.

„Die großen Brocken haben wir jetzt eigentlich hinter uns. Ich meine, wir haben jetzt jahrelang gewartet und alle waren auf hold und jetzt wissen wir, was grüner Wasserstoff bzw. RFNBO ist. Wir wissen recht viel. So langsam braucht man sich nicht mehr hinter der Regulatorik verstecken und kann auch ins Doing kommen. Also große Teile der Unsicherheiten sind ja schon mal draußen.“ (L3T3R3, 13)

Dementsprechend besteht in der regulatorischen Festlegung der sektorspezifischen Einsatzgebiete von Wasserstoff der insgesamt zweithäufigste Treiber, direkt gefolgt von einer klaren Regulatorik, die flexibel auf spezifische Herausforderungen in der Praxis reagieren kann.



Gleichzeitig muss aber diese **Regulatorik** auch von der abstrakten Ebene der Verordnungen in die konkrete Manifestation in Projekten übersetzt werden. Essenziell ist hier, dass **Genehmigungen** anhand dieser Regulatorik für konkrete Vorhaben erteilt werden müssen. Auch wenn die Regulatorik in naher Zukunft eindeutiger werden sollte und sich von Stakeholdern als „zu strikt“ monierte Regeln lockern, bleiben die Genehmigungsverfahren ein Bottle-neck. Diese werden aktuell nahezu unisono als zu langsam beschrieben, was einen negativen Effekt auf die **Wirtschaftlichkeit** hat, weil Projekte dadurch viel Zeit verlieren. Insbesondere die Unsicherheit in der Bereitstellung der notwendigen **Infrastruktur** ist nach Ansicht der Stakeholder zu erheblichen Teilen auf zu langsame und komplizierte Genehmigungsverfahren zurückzuführen.

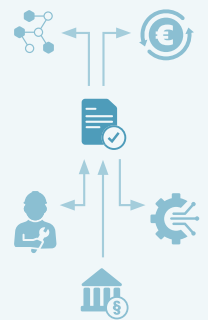
Für den Engpass der Genehmigungsverfahren werden von den Stakeholdern wiederum vor allen zwei Ursachen gesehen: Ein eklatanter **Fachkräftemangel** in den entsprechenden Behörden, sowohl auf Bundes-, Landes- als auch kommunaler Ebene sowie Defizite in der **Technologiereife**, da die Genehmigungen für Elektrolyseure, Infrastruktur, Speichertechnologien und teilweise auch für Industrieprozesse, in denen grüner Wasserstoff andere Energieträger substituiert, in vielen Behörden zum ersten Mal erteilt werden und noch keine Erfahrungen und Wissensbestände darüber vorliegen.

„Bei den Genehmigungen, ich kenne auch ein bisschen die Behördenwelt – Thema Fachkräfte – sind das Eine die Qualifikationen, aber auch die Kapazitäten. Es ist einfach viel, viel zu wenig Personal da, um diese Antragsflut zu bewältigen, die da jetzt auf die Behörden zurollt in den nächsten zehn Jahren – sei es für die Erzeugung der Erneuerbaren, also erstmal das Ausgangsprodukt Grünstrom, sei es für Industrieanlagen, Änderungen, Fuel Switch usw. Der BDI, der hat das irgendwie mal ausgerechnet. Ich habe die Zahl nicht mehr im Kopf, aber es ist eine Verzigfachung der Antragsverfahren der letzten Jahrzehnte und wie sollen die alle bewältigt werden...“ (L2T2R2, 35)

Die Engpässe in den Genehmigungen wiederum verstärken den Fachkräftemangel, da Unternehmen für die Erfüllung regulatorischer Vorgaben und die Kommunikation mit den Genehmigungsbehörden und die Berichterstattung über die Erfüllung der Auflagen Personal abstellen müssen, während die Erprobung der Genehmigungsverfahren in den Behörden Kapazitäten bindet.

„Aber es hat eine unwahrscheinliche Arbeit gekostet, wirklich jedes kleine Detail zu dokumentieren. Nur um ein Beispiel zu nennen: Wir hatten ursprünglich unseren Förderantrag mit einem größeren Elektrolyseur geplant. Die Ausschreibung hat uns eigentlich kein brauchbares Ergebnis gebracht. Wir mussten eine neue Runde starten und hatten am Ende das, was wir wollten, mit anderthalb Jahren Verspätung. Und wir haben jede kleine Regel eingehalten, damit man später nicht sagen kann – wenn die Wirtschaftsprüfer kommen: Wir hätten irgendwie eine Formalie nicht eingehalten. Das Ergebnis war gut, aber es hat einen unwahrscheinlichen Aufwand gekostet.“ (L3T1R3, 16)

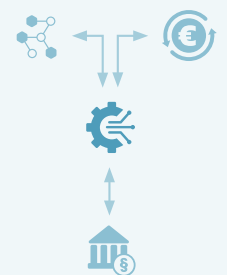
Diese Komplexität macht den Zugang zur Wasserstoffherzeugung zum aktuellen Zeitpunkt insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) nahezu unmöglich. In der Industrie sind Nutzungsvorhaben aufgrund der lang-



fristigen Verfahren und des daraus resultierenden hohen Personalaufwands zunehmend unattraktiv.

Infrastruktur, Regulatorik und Genehmigungsverfahren bilden also bereits – konditioniert von diversen anderen Faktoren – ein Teilwirkungsgeflecht, dass zum aktuellen Zeitpunkt vor allem hemmend wirkt. In den nicht-wünschenswerten Szenarien lässt sich ablesen, dass unklare Wirtschaftlichkeit mit dem Ausbleiben eines Wasserstoffnetzes und langsamen Genehmigungsverfahren einhergeht sowie in drei Szenarien mit unklarer und in einem Szenario mit zu strenger Regulatorik.

Ebenfalls in dieses Hemmnis-Geflecht eingebunden ist die **Technologie-reife**. Dabei stehen weniger die konkreten Technologien im Vordergrund, auch wenn teilweise noch offene Fragen bestehen, sondern – neben den oben angesprochenen Genehmigungsverfahren – die gesamtsystemische Integration. Das Ineinandergreifen verschiedener Technologien in teilweise kaum oder gar nicht erprobten **Regulatorik**-Rahmen erfordert von Akteuren bei der Umsetzung viel Zeit, was wiederum die **Wirtschaftlichkeitsperspektive** mindern kann. Da die grundlegende Infrastruktur bisher noch nicht geschaffen ist und damit kaum eine Möglichkeit für Marktbeziehungen unter Realbedingungen gegeben ist, bleiben auch unternehmerische Erfahrungen wie Vertragsgestaltung oder Vertriebsmodelle größtenteils unerprobt und die Wirtschaftlichkeitsperspektive unklar. In den negativen Szenarien weist die Technologiereife durchgehend die Ausprägung „Erprobungszustand“ auf, ein Zustand, der sowohl Wirtschaftlichkeit, Infrastruktur, Regulatorik hemmt als auch von ihnen reflexiv gehemmt wird.



Die aus NRL-Sicht positive Ausprägung „Skaleneffekte“ des Faktors Technologiereife ist die einzige, die im wünschenswerten Szenario nicht die aus NRL-Sicht bestmögliche Ausprägung erreicht. Dies spricht einerseits dafür, dass der Markthochlauf (zunächst) auch ohne Skaleneffekte erfolgen kann, andererseits bedeutet dies auch, dass die Stakeholder zum aktuellen Zeitpunkt noch keinen Pfad beschreiben konnten, der in einer in sich logischen Wirkungskette Skaleneffekte beinhaltet. Tatsächlich stabilisieren diese Ausprägung lediglich zwei andere Ausprägungen: großflächiger Infrastrukturausbau und gezielte Förderung. Skaleneffekte können demnach eher als Folge des Markthochlaufs denn als eine seiner Bedingungen aufgefasst werden.

Vor allem fehlende Erfahrung in Hinblick auf **Technologiereife** und die damit einhergehende Wirtschaftlichkeitslücke könnten über **Förderung** überbrückt werden. Dabei existieren in den Carbon Contracts for Difference (CCFD) bereits Instrumente, die für eine Implementierung von Wasserstoff in Industrieprozesse Mehrkosten ausgleichen, allerdings sind diese lediglich für Großprozesse geeignet und für viele Stakeholder daher keine Option.



Auf der Erzeugungsseite sind Elektrolyseure aktuell von Netzentgelten befreit, der Zeitraum bis 2030 wird allerdings von vielen Stakeholdern als zu kurz angesehen, um größere Projekte mit langfristiger Perspektive zu planen.

Förderung ist zudem eng mit **Regulatorik** und **Genehmigungen** verzahnt und fügt der Planung von Projekten weitere Komplexität hinzu. Viele Stakeholder monieren einen „Förderdschunzel“, weil Förderbedingungen eng an unübersichtliche Regulatorik und verzögerte Genehmigungsverfahren gekoppelt sind oder sich Friktionen mit neu verabschiedeten Regularien ergeben. Somit ist zwar theoretisch oft möglich, die Wirtschaftlichkeitslücke von Projekten mit Förderinstrumenten zu überbrücken, die Unsicherheit, ob, wie und wann diese ausgezahlt bzw. angerechnet werden, hemmt aber dennoch die Planungssicherheit erheblich.

Ebenfalls führen viele Stakeholder an, dass die Förderkonkurrenz innerhalb der gesamten Wasserstoffwirtschaft oft nachteilig für Teile der industriellen Nutzung ist, weil in der THG-Minderungsquote für den Verkehrssektor und die ihm zuarbeitenden Grundstoffindustrien eine effektivere und regulatorisch klarere Förderung existiert und diese Akteure somit eine höhere Zahlungsbereitschaft für grünen Wasserstoff besitzen als industrielle Akteure, die nicht für den Verkehrssektor produzieren.

Auch merken viele Stakeholder an, dass viele Industrieprodukte in der Regel weltweit an Börsen gehandelte Commodities sind und somit kein Spielraum besteht, die Mehrkosten durch den Einsatz von grünem Wasserstoff an den Kunden weiterzureichen, sodass ein Wettbewerbsnachteil gegenüber weiterhin fossil produzierenden Industrien außerhalb Europas entstehen kann. Für den Import in den europäischen Markt sind solche Nachteile zwar teilweise durch den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) ausgeglichen, der auf Nicht-EU-Importe die in der EU geltenden Emissionspreise aufschlägt, für den Export hat dieser aber keine Relevanz.

Aktuell adressieren die Förderinstrumente darüber hinaus vor allem große Industrien. Dies wird von den Stakeholdern zwar grundsätzlich als richtig erachtet, um zunächst die größten Emittenten anzugehen, allerdings müssten mittelfristig auch Möglichkeiten für KMU geschaffen werden, an der Transformation teilzuhaben.

„Die [Förderprogramme bei der EU] sind dann so ausgelegt schon in Beantragung, dass dann Firmen sagen „Wir würden da super reinpassen, aber was da alles gefordert wird an Bilanzen usw., können wir einfach nicht verstehen. Wir sind raus.“ (L3T1R3, 21)

Würde man beispielsweise lediglich die Förderung für H₂-Projekte erhöhen, wäre dadurch noch lange keine Wirtschaftlichkeit sichergestellt, vor allem nicht langfristig. Die Förderung ist auch nach Ansicht der Stakeholder geeignet, um eine Wirtschaftlichkeitslücke zu überbrücken, gleichzeitig muss sich das Gesamtsystem im Förderzeitraum so entwickeln, dass Planungssicherheit für nicht-geförderten Betrieb gegeben oder zumindest absehbar ist.

„Die Frage ist, wie es dann ausgestaltet wird, weil von den Firmen gesagt wird: „Es soll dezidiert keine dauerhafte Förderung sein.“ Denn die verstehen, dass es ja keinen Sinn macht, auf Dauer die Industrie zu fördern. Aber doch eben gerade in dieser Zeitphase der Umstellung.“ (L2T1R2, 107)

Teilweise wird diese Unsicherheit nicht ausschließlich direkt von der Regulatorik auf die Wirtschaftlichkeit ausgeübt, sondern sie beeinflusst andere Faktoren, die ihrerseits wiederum auf die Wirtschaftlichkeit einwirken. So ist beispielsweise die **Regulatorik** zur Vergütung von **Speichertechnologien** ein Hemmnis für den Ausbau von Speicherlösungen. Diese wiederum werden aber im Gesamtsystem benötigt, um einen sicheren durchgehenden Betrieb der Industrieanlagen sicherzustellen und die flexible Fahrweise von Elektrolyseanlagen zu ermöglichen. Speicher sind notwendig, damit dieses System flexibel funktioniert und **Verfügbarkeit** nicht nur abstrakt, sondern konkret und lokal für die Akteure sichergestellt ist. Da die **Infrastruktur** in Form des Kernnetzes zum aktuellen Planungsstand zu großen Teilen auf die Backup-Kraftwerke ausgelegt sein wird, sind Speicher nach Ansicht der Stakeholder essentiell, um die (Pipeline)-Infrastruktur so zu ergänzen, dass auch in Zeiten hoher Nachfrage nach grünem Wasserstoff, Prozesssicherheit gewährleistet ist.

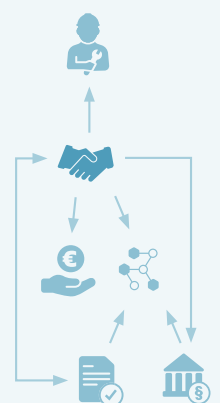
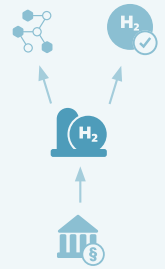
„Und das Kernnetz ist ja zu 75 % der Leistung für Kraftwerke ausgelegt. Das darf man nicht vergessen. Wir reden jetzt immer von der Industrie oder vielleicht auch ein bisschen Verkehr. Aber das große Netz ist eben hauptsächlich auch mit für die Kraftwerke ausgelegt. Und ich denke, wenn man Blackouts vermeiden möchte, dann braucht man diese Backup-Kraftwerke. Und das wären ja dann auch so Schlüsselfaktoren für die Nachfrage.“ (L3T1R2, 75)

Eine besondere Rolle nimmt, wie in Kapitel 5 erwähnt, der Faktor **gesellschaftliche Akzeptanz** ein. Als einer der wenigen Faktoren übt er einen direkten Einfluss auf diejenigen Faktoren, die erstens einen breiten Einfluss auf das Gesamtsystem haben und zweitens von den Stakeholdern als diejenigen identifiziert wurden, an denen die Politik selbstständig ansetzen könnte aus – Regulatorik, Förderung und Genehmigungsverfahren. Die Präferenzen der Bevölkerung, die auch kontextabhängig unterschiedlich sein können, haben einen latenten Einfluss auf die obigen Faktoren, weil die Politik versucht, gesellschaftliche Präferenzen – oder zumindest die politische Vorstellung davon – in ihnen abzubilden.

Allerdings spielen die hier betrachteten industriellen Nutzungen von grünem Wasserstoff und Wasserstoffherzeugung im Alltag der allermeisten Bürger:innen eine sehr geringe bis gar keine Rolle. Diese Distanz kann problematisch für die Transformation sein, weil die Akzeptanz einer Technologie und ihrer Folgen häufig von der persönlichen Betroffenheit beeinflusst sind.

Anders als bei der Wasserstoffmobilität – bei der Bürger:innen potenzielle Endkund:innen sind – sind industrielle Großprozesse in komplexe Lieferketten eingebunden, deren Endprodukte für die Endkund:innen selten einen Rückschluss auf diese Prozesse – oder gar die in ihnen verwendeten Energieträger – zulassen. Diese Distanz kann in Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz ein Nachteil sein.

Die Stakeholder sind nahezu einhellig der Meinung, dass Beteiligung an den jeweiligen Prozessen die Akzeptanz der Technologien erhöht. Da es aber



nur wenige Anknüpfungspunkte gibt, an denen diese Beteiligung ansetzen kann, haben es die Erzeugung und die industrielle Nutzung von grünem Wasserstoff schwerer als beispielsweise die Wasserstoffmobilität, die diese Beteiligung direkt über Kundenbeziehungen umsetzen kann. Im Hinblick auf **Förderung** manifestiert sich dieses Problem nach Ansicht der Stakeholder in einer möglichen Förderkonkurrenz mit der Wasserstoffmobilität. So kann durch den direkteren Bezug die Wasserstoffmobilität einen Vorteil erlangen, weil die Politik Förderprioritäten auch nach dem wahrgenommenen gesellschaftlichen Interesse gestaltet und die Kommunikation von politischer Seite ebenso die gesellschaftliche Wahrnehmung der Technologien beeinflusst. Ein Teilnehmer plädiert daher für eine deutliche Klärung und Kommunikation der Einsatzgebiete von grünem Wasserstoff seitens der Politik – auch im Sinne der Stärkung der gesellschaftlichen Akzeptanz.

„Ich glaube, dass – weil die Politik gerade alles in Wasserstoff machen will, auch Autos und Heizungen – da das Bild vermittelt wird, es kommen fortschrittliche Wasserstoffautos. Und wenn sich dann immer mehr herausstellen wird, wo tatsächlich der Einsatz zum Tragen kommen wird, und dass grüner Wasserstoff in erster Linie Industrierohstoff sein wird, dann kann man vielleicht auch klarer kommunizieren, was die Vor- und Nachteile sind. Und vielleicht, wenn es wirklich die Erzählung ist: „Wir machen unsere Industrie grün!“, vielleicht kommt dadurch auch die Akzeptanz besser voran.“ (L2T3R2, 20)

Konkret wird die gesellschaftliche Akzeptanz ebenfalls im Verhältnis zur **Infrastruktur**, allerdings vornehmlich als Hemmnis. Der Ausbau von Netzen und die damit einhergehenden lokalen Belastungen durch Baustellen und Eingriffe in Ökosysteme und Landschaftsbilder stellen lokale Betroffenheit her und können zu starken Vor-Ort-Widerständen führen. Diese sind insbesondere deswegen relevant, weil sie einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf kommunale **Genehmigungsverfahren** haben können, wenn Bürger:innen gegen konkrete Projekte protestieren. Anders als die Industrieanlagen wie auch Elektrolyseure werden insbesondere großflächige ausgebaute Verteilnetze mitunter auch in Gegenden gebaut werden, in denen sich Widerstand von Anwohner:innen formieren könnte. Hier muss bei einem zügigen Ausbau immer berücksichtigt werden, dass eine mögliche Vereinfachung in Sachen **Regulatorik** und Beschleunigung von Genehmigungsverfahren die gesellschaftliche Akzeptanz mitdenken muss.

So argumentieren die Transformation Lab-Teilnehmenden, dass eine deutliche Verkürzung von Genehmigungsverfahren – die grundsätzlich positive Effekte auf den Infrastrukturausbau hätte – bei allen Vorteilen auch in der Bevölkerung den Eindruck erwecken könnte, wichtige Belange wie Umweltschutz oder Gefahrenabwägung würden nicht mehr ausreichend berücksichtigt. Gleichzeitig können aber auch zu lange Genehmigungsverfahren negativ auf die gesellschaftliche Akzeptanz wirken, weil sie den Eindruck erwecken, die Technologie und ihr Hochlauf würden keinerlei Fortschritte machen.

Gesellschaftliche Akzeptanz kann aber auch ein Treiber für eine Vielzahl der Faktoren im Gesamtsystem sein. So sehen die Stakeholder Potential darin, über Beteiligung einen breiten Diffusionseffekt auf andere Faktoren auszulö-

sen. Beispielsweise könne dem **Fachkräftemangel** entgegengewirkt werden, wenn Wasserstoffthemen stärker in die Verbände, Handwerksinnungen und Universitäten kommuniziert werden, sodass das Interesse an spezifischen Ausbildungen und Studiengängen steigt.

„Und deswegen sind wir schon wieder bei diesem Thema, dass die Ausbildung von Wasserstoffexperten, also über Universitäten genauso wie beim Handwerk, gefördert werden muss. [...] Das spezifische Wissen von entsprechenden Schulungen oder gewissen Unterweisungen beim Personal in der breiten Masse wirklich anzuwenden; das wird unheimlich nötig sein.“ (L3T1R3, 42)

Auch die Vorbehalte aufgrund steigender Kosten könnten nach Ansicht der Stakeholder möglicherweise reduziert werden, wenn die Gesellschaft besser über die industriellen Prozesse, deren Transformation und ihren Bezug zur Lebensrealität der einzelnen Bürger:innen informiert wären, sodass die mangelnde Bereitschaft von Endkund:innen, höhere Preise zu zahlen, womöglich zumindest teilweise abgebaut werden könnte. Insofern empfiehlt eine Teilnehmerin eine größere Offenheit im Umgang mit diesem Thema:

„Und ich finde für Steuerzahler muss auch vermittelbar sein, was da passiert, weil das kommt alles bei den Endkund:innen irgendwie an! Nur was heißt das denn für mich persönlich, für meinen Haushalt? Die Haushaltskosten sind gestiegen und durch diesen ganzen Infrastrukturausbau glaube ich schon, dass Menschen auch Befürchtungen haben, das tägliche Leben wird echt extrem teuer.“ (L3T1R1, 105)

Insgesamt zeigt sich ein Wirkungsgeflecht, das komplexe Interdependenzen zwischen den Faktoren aufweist. So hängt die Wirtschaftlichkeit von Sektorenkopplungstechnologien nicht von einzelnen Faktoren ab, sondern ist mit allen Faktoren direkt oder indirekt verwoben. Impulse, beispielsweise von der Politik, müssen diese Verflechtung berücksichtigen. **Die Szenarien zeigen, dass eine Verbesserung einzelner Faktoren nicht ausreichen kann, um den erwünschten Markthochlauf zu erreichen. Stattdessen sind sie Abbild davon, dass aus Stakeholdersicht im aktuellen Zustand nur eine Veränderung mehrerer Faktoren in Kombination miteinander das Gesamtsystem aus seiner Blockade lösen kann.**

Neben dem hier untersuchten System gibt es weitere Faktoren, die nicht mit in die Analyse einbezogen werden konnten. Dabei handelt es sich vor allem um Vorketten-Faktoren, die nicht nur, aber auch für Wasserstofferzeugung und industrielle Nutzung relevant sind. Wichtigste Größe ist hier der Strompreis, den viele Stakeholder als zu hoch einschätzen, um wirtschaftlich grünen Wasserstoff produzieren zu können. Dieser wird von den Faktoren im System nicht beeinflusst, hat aber erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung. Auch bei einem erfolgreichen Markthochlauf wird der Strompreis noch eine zentrale Rolle spielen.

Faktoren wie der Strompreis müssen selbstverständlich immer mit beachtet werden, sie gehören aber nicht zum interdependenten Kernsystem des Markthochlaufs. In der aktuellen Patt-Situation können besonders hohe Strompreise dennoch dazu beitragen, dass das Auflösen der Blockade erschwert wird.

Auf der anderen Seite kann der Strompreis aber durch seinen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit durchaus einen fördernden Impuls geben, wenn er mittelfristig sinkt oder in Form von subventionierten Industriestrompreisen gefördert wird.

Eine verbesserte Wirtschaftlichkeitsperspektive könnte ein möglicher „Entzündler“ sein, um die eingeschlafene Dynamik des Markthochlaufs wiederzubeleben, sodass sich die Faktoren im Gesamtsystem ineinandergreifend weiterentwickeln können.

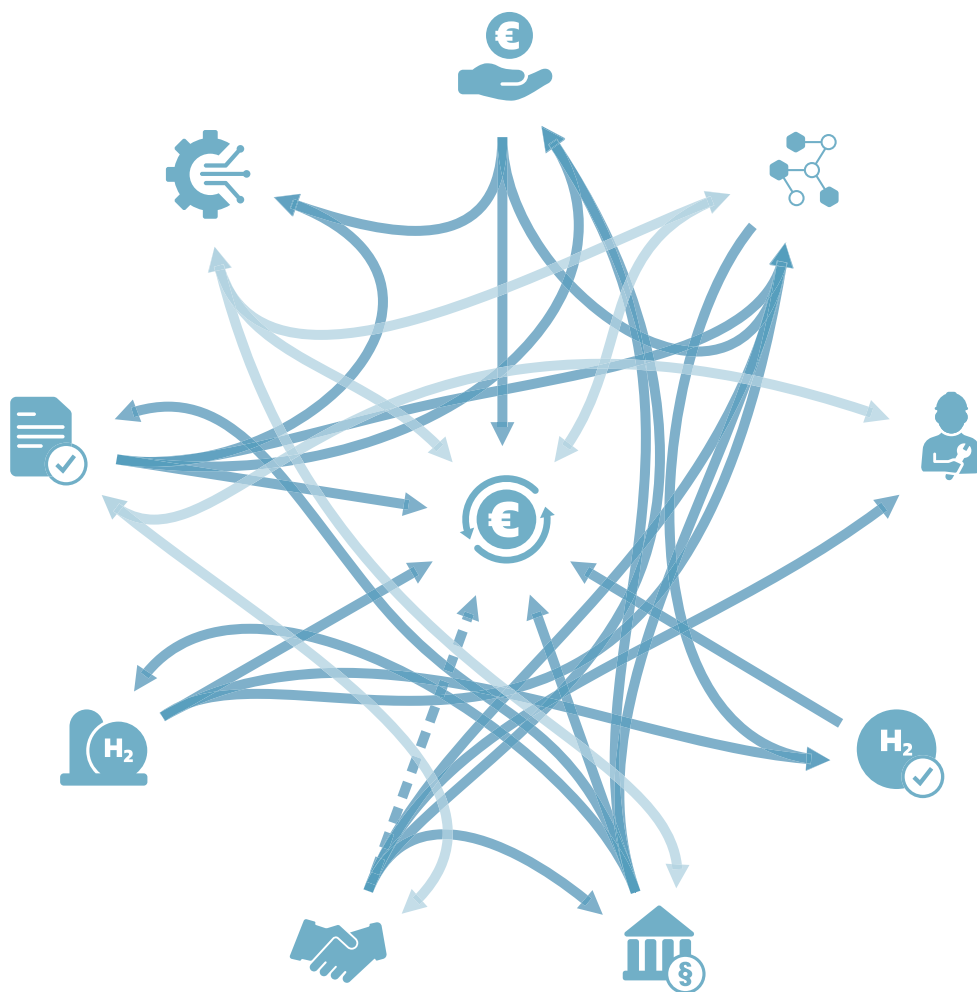


Abbildung 12: Wirkungsgeflecht gemäß der von den Lab-Teilnehmer:innen identifizierten Zusammenhänge der Einflussfaktoren für den Wasserstoffhochlauf

Fazit

Die vorliegende Studie ermittelte im Rahmen des Energiewende-Verbundprojekts Norddeutsches Reallabor (NRL) Treiber und Hemmnisse für den Wasserstoff-Markthochlauf. Grundlage hierfür war die Durchführung einer Inhaltsanalyse und einer Szenarioanalyse auf Basis von Stakeholder-Diskussionen, die in zwei NRL Transformation Labs zu „Wasserstoffanwendungen in der Industrie“ (11.06.2024) und zu „Wasserstoffherzeugung, -transport und -speicherung“ (11.09.2024) geführt wurden.

Die Ergebnisse beider Analysen zeigen, dass sich der Wasserstoffhochlauf sich zum Zeitpunkt der Durchführung der Labs an einem kritischen Punkt befand. Die gegenwärtigen energiepolitischen Entwicklungen lassen annehmen, dass sich die von den Stakeholder:innen wahrgenommene Brisanz aktuell eher noch zuspitzen würde. So führten die Aussagen der Lab-Teilnehmenden nur zu einem einzigen konsistenten Hochlauf-Szenario, das sich in allen Ausprägungen vom gegenwärtigen Status Quo unterscheidet.

Die nähere Analyse zeigte, dass insbesondere eine Wirtschaftlichkeitsperspektive für Unternehmen in der Transformation unerlässlich ist und damit eine zentrale Gelingensbedingung für den Wasserstoffhochlauf darstellt. Es wurde deutlich, dass das Erreichen von Wirtschaftlichkeit von nahezu allen anderen untersuchten Faktoren abhängt, gleichzeitig aber auch die generelle Voraussetzung für ein langfristiges Engagement der industriellen Akteure ist. Wirtschaftlichkeit ist daher der Zielfaktor, an dem sich zukünftige Strategien und Maßnahmen orientieren sollten. **Planungssicherheit und Flexibilität dürfen dabei keine Gegensätze sein, sondern dieses Spannungsfeld muss bei der Umsetzung des Wasserstoffhochlaufs sensibel ausbalanciert werden.**

Erschwerend für einen zügigen Hochlauf von grünem Wasserstoff und anderen Sektorenkopplungstechnologien wirkt allerdings der Umstand, dass dieser **Hochlauf keine lineare Struktur aufweist, sondern vielmehr ein komplexes Wirkungsgeflecht darstellt, in dem sich zahlreiche Faktoren gegenseitig beeinflussen.** Oftmals blockieren sich die identifizierten Einflussfaktoren in einem systemischen Zusammenspiel gegenseitig. Einzelne Maßnahmen haben so mitunter unbeabsichtigte Folgen in anderen Teilbereichen des Hochlaufs, indem sie ein neues Hemmnis an anderer Stelle erzeugen.

Eine wichtige Stellschraube in dem beschriebenen Wirkungsgeflecht ist die Infrastruktur: **Eine grundlegende Wasserstoff-Infrastruktur mit einem Kernnetz, ausreichend Speichermöglichkeiten, notwendigen Kraftwerken und Importterminals sowie alternativen Transportmöglichkeiten ist bisher noch nicht geschaffen. Damit können die Marktbeziehungen zwischen den Akteuren nicht unter Realbedingungen erprobt werden.** Dies hemmt wiederum die Bereitschaft der Industrie, entschiedener voranzugehen.

Notwendige Voraussetzung für einen großflächigen und zukünftige Entwicklungen mitdenkenden Infrastrukturausbau ist dabei auch die gesellschaftliche Akzeptanz. Im Ergebnis der Szenarioanalyse ist gesellschaftliche Akzeptanz einer der wenigen Faktoren, der direkten Einfluss auf Regulatorik, Förderung und Genehmigungsverfahren ausübt. Eine Politik, die Belastungen, die mit dem Umbau verbundenen sind, transparent und ehrlich vermittelt und dabei auch einen gerechten Ausgleich im Blick hat, gehört damit ebenfalls zu den Gelingensbedingungen eines erfolgreichen Hochlaufs.

Die Ergebnisse machen klar: **Ein erfolgreicher Wasserstoffhochlauf erfordert ein strategisches Zusammenspiel von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft** – mit gezielter Förderung, einer klaren und pragmatischen Regulatorik und der notwendigen gesellschaftlichen Akzeptanz. Dabei sollten nicht nur die großen Akteure, sondern auch die Herausforderungen, vor denen kleinere und mittlere Unternehmen im Hinblick auf den Zugang zu grünem Wasserstoff und den damit verbundenen Technologien stehen, im Blick behalten werden, um hier kein Ungleichgewicht zu zementieren.

Die Perspektiven, die die Stakeholder:innen in den NRL Transformation Labs diskutierten, und die daraus resultierenden Szenarien zeigen, dass die Transformation gesamtsystemisch angelegt sein muss. Ein Markthochlauf von Wasserstoff wird nicht durch Einzelmaßnahmen erreichbar sein, sondern muss die Perspektiven vieler Akteure berücksichtigen. Großprojekte wie das Norddeutsche Reallabor können dabei helfen, verschiedene Sichtweisen zusammenzubringen und das Wissen verschiedener Stakeholder:innen für den Transformationsprozess zu erschließen.

Handlungsempfehlungen

Basierend auf den in der vorangehenden Studie dargestellten Ergebnissen der beiden NRL Transformation Labs zur Wasserstofferzeugung und dessen Einsatz in der Industrie lassen sich erste Handlungsempfehlungen ableiten, die darlegen, wie der Markthochlauf von Sektorenkopplungstechnologien und insbesondere von grünem Wasserstoff sinnvoll unterstützt werden könnte.

Vor allem die von den Teilnehmenden formulierten Treiber im Kontext der diskutierten Einflussfaktoren stellen eine wichtige Quelle für eine solche Ableitung dar. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass seitens der Teilnehmenden überwiegend Konsens hinsichtlich der Problembereiche besteht, fördernde Aspekte – also Lösungsmöglichkeiten – dagegen in ganz unterschiedlichen Bereichen gesehen werden. Folglich sind einige der nachfolgenden Empfehlungen primär aus der Perspektive einzelner Akteurskreise abgeleitet und nicht repräsentativ für alle Transformation-Lab-Beteiligten. Bei der Konzeption und Umsetzung entsprechender Maßnahmen müsste insofern zunächst analysiert werden, welche Auswirkungen sich für andere Bereiche ergeben, damit sich hieraus nicht neue Störfaktoren ergeben. Anders formuliert: Das Beziehungssystem der Faktoren muss immer als Ganzes betrachtet werden. Eingriffe müssen so gestaltet sein, dass sie die Interdependenzen im System berücksichtigen, um nicht-intendierte Nebenfolgen zu vermeiden.

Im Fokus der hier dargelegten Handlungsempfehlungen steht die Balance zwischen regulatorischer Sicherheit und Planbarkeit für die beteiligten Akteure einerseits und notwendigen Anpassungen im Bereich von Regulatorik und Förderung andererseits. Diese Balance ist essentiell für die Unterstützung und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit als zentralem Faktor für den Wasserstoff-Markthochlauf.

Förderung schafft Anreize und reduziert Unsicherheiten

Bislang sind Schwierigkeiten bei Kreditaufnahmen durch Unternehmen im Kontext von Wasserstoffvorhaben vor allem durch die fehlende Kalkulierbarkeit eines Wasserstoffpreises begründet, so dass die Banken hierin keinen tragfähigen und förderfähigen Business Case erkennen und keine Kreditzusage erteilen.

- Bürgschaften – z. B. seitens der KfW – zur Absicherung von Investitionen sowie die Unterstützung für eine leichtere Kreditaufnahme bei Banken für geplante Investitionen in Wasserstoffvorhaben werden insbesondere von den Akteur:innen der Erzeugerseite als maßgebliche Unterstützung befürwortet.

Neben der finanziellen Förderung von Wasserstoffvorhaben im Bereich der Erzeugung sind Abnahmeverträge, Power Purchase Agreements (PPA), von

großer Bedeutung für die Sicherstellung der Finanzierung z. B. durch Kredite. Für die Abnehmerseite sind allerdings neben den Investitionskosten (CAPEX) vor allem auch die Betriebskosten (OPEX) relevant. Diese sind stark vom Strompreis getrieben. Hohe Preise für Grünstrom erhöhen die OPEX und mindern daher die Wirtschaftlichkeit bzw. Wettbewerbsfähigkeit. Dies wird auch für den nationalen Wasserstoffhochlauf insgesamt als wichtig erachtet, da aufgrund der niedrigeren Strompreise in den anderen europäischen Ländern z. B. im Rahmen einer Ausschreibung Förderzusagen der EU-Hydrogenbank vor allem für diese Länder erteilt wurden. Dadurch ergeben sich Nachteile für den deutschen Wasserstoffhochlauf.

- Der Aufbau langfristiger Abnahmeverträge (Power Purchase Agreements, PPAs) in Kombination bspw. mit Klimaschutzverträgen oder Carbon Contracts for Difference stellen im Bereich der staatlichen Förderung eine anerkannte wirksame und relevante Maßnahme dar, die aufrechterhalten bzw. ausgedehnt werden sollte.

Regulatorik/Genehmigungen zielgerichtet anpassen und trotzdem Planungssicherheit geben

Im Zusammenspiel von Regulatorik und Förderung stellt die Definition der sinnvollen Einsatzgebiete von grünem Wasserstoff einen wichtigen Ansatzpunkt dar. Dabei spielt auch die Diskussion um den richtigen Grad an Technologieoffenheit eine Rolle.

- Die energieintensiven Anwendungsbereiche, in denen fossile Energieträger, die zu hohen Treibhausgasemissionen führen und in denen eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist, sollten für den Einsatz von grünem Wasserstoff priorisiert werden. Das Kriterium des aktuell sinnhaften Einsatzes von grünem Wasserstoff wird als eine entscheidende Maßnahme angesehen. Hier sollte eine Priorisierung nicht mit dem Argument der Technologieoffenheit verzögert werden. Insbesondere könnte auch die finanzielle Förderung auf diese definierten Anwendungsbereiche fokussiert werden.

Bei den als notwendig erachteten Anpassungen – wie eben die Priorisierung von Anwendungsbereichen – ist aber auch die Balance hinsichtlich der Planungssicherheit bedeutsam:

- Ein stabiler regulatorischer Rahmen, der krisenfest ist und über den Zeitraum einzelner Legislaturperioden hinaus Gültigkeit hat, wird vor allem für die Planbarkeit von Investitionen, Prozessveränderungen und Infrastrukturmaßnahmen der Unternehmen als entscheidend angesehen.
- Eine moderate Nachbesserung der Regulatorik wird im Bereich der

Strombezugskriterien als wichtige Maßnahme für die Erreichbarkeit von Wirtschaftlichkeit betrachtet. So werden z. B. Anforderungen wie Gleichzeitigkeit, Nähe der Erzeugung und Zusätzlichkeit als „Hemmschuh“ für die Wirtschaftlichkeit erachtet. Neben der Abschwächung dieser Kriterien könnten auch längere Übergangsfristen zweckdienlich sein.

Ein weiterer Ansatzpunkt ergibt sich im Übergangsbereich zwischen Regulatorik und Genehmigungspraxis der zuständigen Behörden. Die langen Zeiträume im Bereich der Genehmigungen wirken sich hemmend auf Planbarkeit und Wirtschaftlichkeit aus. Dabei wird der Faktor Fachkräftemangel in den Behörden als eine Ursache geltend gemacht, verstärkt durch die Unsicherheiten infolge mangelnder Erfahrung bei der Anwendung neuer Regelungen.

- Um die Genehmigungspraxis im Hinblick auf eine verbesserte Planbarkeit und Dauer für die Unternehmen zu gestalten, wird die Schaffung von Grundlagenuntersuchungen und die Definition von klaren Leitlinien als geeignete Maßnahme beurteilt. So könnten Grundlagenuntersuchungen und Leitlinien eine Art „Präzedenzfälle“ schaffen, die in der Folge Personalkapazitäten freigeben und eine schnellere Genehmigung ermöglichen.
- Als unterstützende Maßnahme hierfür wird der bundeslandübergreifende Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen Behörden – gerade auch in Hinsicht auf eine veränderte Gesetzgebung und Genehmigungspraxis – als wirksam betrachtet.

Wirtschaftlichkeit herstellen und absichern

- Als essentiell für eine langfristige Planbarkeit, die die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflusst, sehen die Stakeholder:innen ein parteiübergreifendes Bekenntnis der Politik zur Energiewende an. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit würde eine einflussreiche Maßnahme in einem weltweiten CO₂-Preis gesehen, der allerdings nicht durch eine nationale Regelung erreichbar ist.
- Darüber hinaus wird in der Abpufferung der finanziellen Risiken durch CCFDs ein Anreiz für Unternehmen gesehen, im Sinne ihrer eigenen Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit mit der Umstellung auf grünen Wasserstoff entschiedener voranzugehen.
- Insgesamt wird die Absenkung des Strompreises als relevante Stell-schraube beurteilt, um den Hochlauf von grünem Wasserstoff zu unterstützen – oder bestenfalls zu beschleunigen. Die Stakeholder:innen aus den NRL Transformation Labs sehen dafür zwei Wege: den massiven Ausbau der Erneuerbaren zur Steigerung der Verfügbarkeit und/oder

eine Strompreisbrücke, bis ausreichend günstiger EE-Strom verfügbar ist. Beide genannten Maßnahmen werden als Möglichkeit gesehen, die OPEX zu senken.

Verfügbarkeit/Infrastruktur zeitnah zukunftsfähig ausbauen

Ein weiterer Faktor, der zentral auf die Wirtschaftlichkeit einzahlt, ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff und seinen Derivaten z. B. durch ausreichende Importmengen oder durch Speicherung. Nicht nur beeinflusst die verfügbare Menge an grünem Wasserstoff, Ammoniak, Methanol oder synthetischen Kraftstoffen das so wichtige Preisniveau, sie ist ebenfalls ein Baustein für die Unabhängigkeit im Energiebereich und erhöht die Flexibilität der Industrie, auf Bedarfe entsprechend zu reagieren, also beispielsweise Produktionsprozesse mit Blick auf den Bedarf und nicht mit Rücksicht auf Engpässe in der Verfügbarkeit zu steuern.

- Als maßgeblich für die Verfügbarkeit werden ausreichend Speichermöglichkeiten und ein großes Verteilnetz angesehen.

Für die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie werden nach Aussagen der Lab-Teilnehmenden bedingt durch die notwendigen Umwandlungsprozesse so hohe Mengen an grünem Wasserstoff benötigt, dass diese nicht vor Ort durch Elektrolyse produziert werden können, sondern hierfür Importe erforderlich sind.

- Für die Transformation der Produktionsprozesse in der Chemieindustrie, z. B. der Raffinerien, werden zeitnah deutsche Importterminals benötigt, um ausreichende Mengen an Derivaten von grünem Wasserstoff (wie Ammoniak oder Methanol) bereitstellen zu können.
- Für den Weitertransport von den Hafen-Importterminals ist der auf die entsprechenden Transformationsprozesse in der Industrie zeitlich abgestimmte (Aus-)Bau des Wasserstoffkernnetzes – also der Infrastruktur – zu den zentralen Chemiestandorten erforderlich.

Gesellschaftliche Akzeptanz schaffen und das *Wofür* und *Wie* transparent und ehrlich kommunizieren

Sehr einheitlich wurde seitens der Transformation Lab-Teilnehmenden die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende im Allgemeinen als wesentlich für einen erfolgreichen Wasserstoffhochlauf eingestuft. Insbesondere wurde gesellschaftliche Akzeptanz auch als notwendig für die erforderlichen Maß-

nahmen z. B. in der Infrastruktur auf dem Transformationspfad zur Erreichung der Klimaneutralität geltend gemacht.

- Als zentrale Maßnahme zur Erreichung gesellschaftlicher Akzeptanz wird eine gut gestaltete Öffentlichkeitsarbeit angesehen, die auch die schmerzhaften Punkte des Umbaus nicht ausspart, sondern transparent, glaubwürdig und wahrhaft über die erforderlichen Eingriffe und Veränderungen aufklärt, z.B. hinsichtlich der Energieträger, der Energiepreise, dem Arbeitsmarkt, der erforderlichen Qualifikationen und dem Zubau von Infrastruktur in allen Sektoren. Dabei spielt vor allem der Umbau von zentralen zu dezentralen Strukturen eine entscheidende Rolle, dessen positive Wirkung auf die Resilienz eines veränderten Energiesystems kommuniziert werden sollte.
- Befürwortet wird außerdem eine stärkere kommunale Beteiligung oder direkte Bürgerbeteiligung z. B. an Energiegenossenschaften. Solche Partizipationsformen erhöhen erfahrungsgemäß – so die Stakeholder:innen – das Wissen über die Transformation und steigern damit die Akzeptanz insbesondere auch für die vor Ort notwendigen Infrastrukturmaßnahmen.

Die hier genannten Handlungsempfehlungen wurden abgeleitet aus den Aussagen der Teilnehmenden der beiden NRL Transformation Labs zu „Wasserstoffanwendungen in der Industrie“ (11.6.2024) und zu „Wasserstoffherzeugung, -transport und -speicherung“ (11.09.2024). Die Ableitung fokussiert die Aussagen, die als unterstützend für den Markthochlauf von grünem Wasserstoff beurteilt worden sind und am häufigsten von den Teilnehmenden genannt wurden.

Deutlich wird, dass – wie in dieser Studie erläutert – die Unterstützung des Markthochlaufs gebunden ist an eine Wirtschaftlichkeitsperspektive für involvierte Unternehmen, was wiederum eng verzahnt ist mit einer angemessenen Regulatorik, zielgerichteter Förderung und Infrastrukturentwicklung sowie wirksamer und transparenter Kommunikation zur Unterstützung gesellschaftlicher Akzeptanz und Teilhabe.

Die hier dargelegten Handlungsempfehlungen unterstreichen nochmals das Kernergebnis der vorangehenden Analysen: In den Stakeholder-Diskussionen der NRL Transformation Labs wurde deutlich, dass der Markthochlauf von Wasserstoff nicht durch Einzelmaßnahmen erreichbar ist. Vielmehr ist ein ganzheitliches Verständnis des komplexen Wirkungsgeflechts unabdingbar, um die notwendige Transformation des Energiesystems sinnvoll zu unterstützen.

Literaturverzeichnis

Arndt, Pia (2022): Transformation und Gesellschaft: Ein Stimmungsbild – Studie zur Energiewende und der Akzeptanz von Wasserstoff; repräsentative Online-Erhebung 2022. Abrufbar unter: <https://norddeutsches-reallabor.de/presse/#studien>, (letzter Abruf 22.10.2025).

Arndt, Pia & Saidi, Astrid (2022): Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Einflussgrößen für eine gelingende Transformation des Energiesystems; Einblicke in die Perspektiven von Akteur* innen. Abrufbar unter: <https://norddeutsches-reallabor.de/presse/#studien>, letzter Abruf 22.10.2025).

Bundesministerium der Justiz (2024): Verordnung zur Neufassung der Siebenunddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote). Bundesgesetzblatt, 131. Abrufbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_37_2024/37 (letzter Abruf 22.10.2025).

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Amtsblatt der Europäischen Union, L 328, S. 82–209. Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj?locale=de> (letzter Abruf 22.10.2025).

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RED III). Amtsblatt der Europäischen Union, L 328, S. 1–62. Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413> (letzter Abruf 22.10.2025).

Mohr, Stephan (2025): Mindestanteile für grünen Wasserstoff in der Industrie: Die Folgen der RED III, FfE. Abrufbar unter: ffe.de/veroeffentlichungen/mindestanteile-fuer-gruenen-wasserstoff-in-der-industrie-die-folgen-der-red-iii (letzter Abruf 24.11.2025).

Geels, Frank W. (2019): Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 39, S. 187-201. DOI: 10.1016/j.cosust.2019.06.009 (letzter Abruf 22.10.2025).

Jaede, Robin, Meyer-Ghosh, Sandra & Saidi, Astrid (2025): Die „Transformation Labs“ – ein integrierter Nachhaltigkeitsforschungsprozess von Expert_innenbefragung bis Szenarioanalyse. *Methodenportfolio zur Aggregation komplexer Wissensbestände*, In: Leal Filho, Walter (Hg.): *Innovative Ansätze für die Nachhaltigkeitslehre und Forschung in der Hochschulbildung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 439-455.

Kelle, Udo (2017): Die Integration qualitativer und quantitativer Forschung – theoretische Grundlagen von „Mixed Methods“. *KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 69 (Suppl. 2), S. 39-61.

Kosow, Hannah & Gaßner, Robert (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswertungskriterien. IZT Werkstattbericht, 103, S. 1-89.

Kosow, Hannah & León, Christian D. (2024): Die Szenariotechnik als Methode der Experten- und Stakeholdereinbindung. In: Niederberger, Marlen, & Wassermann, Sandra (Hg.): Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung. Wiesbaden: Springer VS, S. 217-242. DOI: 10.1007/978-3-658-01687-6 (letzter Abruf 22.10.2025).

Rädiker, Stefan & Kuckartz, Udo (2019): Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Steier, Frederick, Gyllenpalm, Bo, Brown, Juanita & Bredemeier, Sabine (2008): World Café. Förderung der Teilhabekultur. In: Kersting, Norbert (Hg.): Politische Beteiligung. Einführung in dialogorientierte Instrumente politischer und gesellschaftlicher Partizipation. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 167-180.

Umweltbundesamt (2018): Transformative Umweltpolitik: Nachhaltige Entwicklung konsequent fördern und gestalten. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/transformative_umweltpolitik_nachhaltige_entwicklung_konsequent_foerdern_und_gestalten_bf.pdf (letzter Abruf 24.11.2025).

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Transformative Umweltpolitik: Ansätze zur Förderung gesellschaftlichen Wandels. Texte, 07/2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.18022.78404 (letzter Abruf 24.11.2025).

Weimer-Jehle, Wolfgang, Prehofer, Sigrid & Hause, Wolfgang (2015): Kontextszenarien der deutschen Energiewende: Eine Datenerhebung zur Analyse gesellschaftlich-politischer Rahmenbedingungen einer sozio-technischen Transformation. Abrufbar unter: <https://elib.uni-stuttgart.de/items/32a1ba68-d602-48b0-94d1-88fcc28dc667> (letzter Abruf 22.10.2025)

Weimer-Jehle, Wolfgang (2023): Einführung in die Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB). Wege zur qualitativen System- und Szenarioanalyse. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-41497-9 (letzter Abruf 22.10.2025).

Verantwortlich

Prof. Dr. Simon Güntner
*Professor für Sozialwissenschaften/
Sozialpolitik*
(NRL TV 3.1)

CC4E/HAW Hamburg
Raum 4.28
Alexanderstraße 1
20099 Hamburg

Autor:innen

Astrid Saidi
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
NRL TV 3.1

Robin Jaede
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
NRL TV 3.1

Henry Riedl
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
NRL TV 3.1

Dr. Sandra Annika Meyer-Ghosh
Teilvorhabenleiterin
NRL TV 3.1

Layout

Marc Weidemüller
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
NRL TV 3.1

Norddeutsches Reallabor

CC4E/HAW Hamburg
Steindam 96
20099 Hamburg

Norddeutsches Reallabor

Das Norddeutsche Reallabor (NRL) ist ein innovatives Verbundprojekt, das neue Wege zur Klimaneutralität aufzeigt. Dazu werden Produktions- und Lebensbereiche mit besonders hohem Energieverbrauch schrittweise defossilisiert – insbesondere in der Industrie, aber auch in der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Hinter dem im April 2021 gestarteten Projekt steht eine wachsende Energiewende-Allianz mit mehr als 50 Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Das Großprojekt hat eine Laufzeit von sechs Jahren (04/2021-03/2027). Dabei beträgt das Investitionsvolumen der beteiligten Partner rund 200 Mio. Euro. Als Teil der Förderinitiative „Reallabore der Energiewende“ wird das Projekt mit rund 30 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Weitere Fördermittel werden durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV) bereitgestellt. Das NRL versteht sich als ausbaufähige Plattform für weitere Projekte.

www.norddeutsches-reallabor.de

E-Mail: transformation-labs@norddeutsches-reallabor.de

Norddeutsches Reallabor

Teilvorhaben 3.1 “Industrielle Transformation und gesellschaftliche Teilhabe”

Verantwortlich

Prof. Dr. Simon Güntner
*Professor für Sozialwissenschaften/
Sozialpolitik*

CC4E/HAW Hamburg
Raum 4.28
Alexanderstraße 1
20099 Hamburg

Layout

Marc Weidemüller
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Autor:innen

Astrid Saidi
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Robin Jaede
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Henry Riedl
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dr. Sandra Annika Meyer-Ghosh
Projektleitung

Norddeutsches Reallabor

CC4E/HAW Hamburg
Steindam 96
20099 Hamburg

Norddeutsches Reallabor

Das Norddeutsche Reallabor (NRL) ist ein innovatives Verbundprojekt, das neue Wege zur Klimaneutralität aufzeigt. Dazu werden Produktions- und Lebensbereiche mit besonders hohem Energieverbrauch schrittweise defossilisiert – insbesondere in der Industrie, aber auch in der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Hinter dem im April 2021 gestarteten Projekt steht eine wachsende Energiewende-Allianz mit mehr als 50 Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Das Großprojekt hat eine Laufzeit von sechs Jahren (04/2021-03/2027). Dabei beträgt das Investitionsvolumen der beteiligten Partner rund 200 Mio. Euro. Als Teil der Förderinitiative „Reallabore der Energiewende“ wird das Projekt mit rund 30 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Weitere Fördermittel werden durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV) bereitgestellt. Das NRL versteht sich als ausbaufähige Plattform für weitere Projekte.

www.norddeutsches-reallabor.de

E-Mail: transformation-labs@norddeutsches-reallabor.de

