

Arbeitspapier

Energiewendeforschungs- Roadmap

für das Land Schleswig-Holstein

Wasserstoff



Transformationspfade zur Klimaneutralität 2040

Stand 09/2026

Inhalt

1. Executive Summary	2
2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap.....	3
3. Methodik „Visual Roadmapping“	5
3.1. Die vier Dimensionsebenen.....	6
3.2. Transformationspfade.....	7
4. Die vier Dimensionsebenen des Fokusfeldes Wasserstoff	8
4.1. Input: Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen.....	8
4.2. Output: Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse	9
4.3. Outcome: Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen.....	11
4.4. Impact: Impact und gesellschaftliche Missionen	12
4.5. Zusammenfassung der IOOI-Ebenen.....	14
5. Transformationspfade	14
5.1. Industrielle Erzeugung & Anwendung von H ₂	15
5.2. Maritime H ₂ Anwendung	16
5.3. H ₂ Methanisierung & PtX.....	18
5.4. H ₂ Speicherung	19
5.5. Systemdienliche Integration von H ₂ ins erneuerbare Energiesystem.....	21
5.6. Zwischenfazit.....	22
6. Handlungsoptionen.....	22
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	24

1. Executive Summary

Die Energiewendeforschungs-Roadmap für das Fokusfeld Wasserstoff beschreibt den Beitrag von Forschung und Innovation zur Erreichung der Klimaneutralität in Schleswig-Holstein bis zum Jahr 2040. Sie wurde im Rahmen eines partizipativen Prozesses unter Beteiligung der schleswig-holsteinischen Hochschulen und Forschungseinrichtungen erarbeitet und dient als strategischer Orientierungsrahmen für Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Die angewandten Methoden des Visual Roadmapping und der IOOI-basierten Wirkungslogik ermöglichen die systematische Verknüpfung langfristiger Transformationsziele mit den hierfür erforderlichen wissenschaftlichen, technologischen, infrastrukturellen und gesellschaftlichen Entwicklungsschritten.

Wasserstoff nimmt in Schleswig-Holstein eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung energieintensiver Industrien, der klimaneutralen Transformation des Verkehrssektors sowie der Integration erneuerbarer Energien ein. Die Roadmap zeigt auf, wie durch das Zusammenspiel von Forschung, Innovation und geeigneten Rahmenbedingungen ein leistungsfähiges Wasserstoffökosystem aufgebaut werden kann, das Versorgungssicherheit, wirtschaftliche Wertschöpfung und Klimaschutz gleichermaßen stärkt. Damit zeigt sie auf, wie Schleswig-Holstein seine Standortvorteile für den Aufbau einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft nutzen kann.

Die Roadmap identifiziert fünf beispielhafte Transformationspfade als zentrale Entwicklungslinien auf dem Weg zu einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft: industrielle Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff, maritime Wasserstoffanwendungen, Power-to-X und Wasserstoffderivate, Wasserstoffspeicherung sowie die systemdienliche Integration von Wasserstoff in das erneuerbare Energiesystem.

Gemeinsam zeigen sie auf, wie Forschung dazu beitragen kann, den Markthochlauf von Wasserstoff zu unterstützen, die Integration erneuerbarer Energien voranzubringen, Versorgungssicherheit zu stärken und regionale Wertschöpfung nachhaltig zu fördern.

Die Roadmap dient zugleich als Grundlage für die strategische Ausrichtung der Energiewendeforschung und die Weiterentwicklung von Fördermaßnahmen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene. Als dynamisches Instrument wird sie kontinuierlich fortgeschrieben und an neue wissenschaftliche, technologische und gesellschaftliche Entwicklungen angepasst.

2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap

Das [Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung](#) bei der EKSH hat unter Einbezug aller schleswig-holsteinischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen eine Energiewendeforschungs-Roadmap für das Fokusfeld Wasserstoff erarbeitet. Ziel der Roadmap ist es, die Forschungsaktivitäten im Land strategisch auszurichten und einen gemeinsamen Orientierungsrahmen für Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zu schaffen.

Schleswig-Holstein verfolgt das Ziel, bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen und sich gleichzeitig als international wettbewerbsfähiger Industriestandort zu etablieren. Mit dem Leitbild eines „klimaneutralen Industrielandes 2040“ definiert das Land eine langfristige Transformationsperspektive, in der Wasserstoff als zentraler Baustein für die Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Energiesystem fungiert. Die rechtliche Grundlage hierfür bildet das [Energiewende- und Klimaschutzgesetz Schleswig-Holstein](#), das die langfristigen Klimaschutzziele des Landes verankert und den Rahmen für den Transformationspfad zur Klimaneutralität setzt.

Die Roadmap orientiert sich dabei an den Zielen und Handlungsfeldern des [Klimaschutzprogramms 2030 Schleswig-Holstein](#), der [Fortschreibung der Wasserstoffstrategie Schleswig-Holstein](#), sowie den übergeordneten Bundeszielen der [Nationalen Wasserstoffstrategie](#), der [Importstrategie](#) und der [Systementwicklungsstrategie](#). Gemeinsam adressieren diese Strategien den beschleunigten Hochlauf von Wasserstoffangebot und -nachfrage, den Aufbau leistungsfähiger Transport- und Speicherinfrastrukturen, die Integration in ein erneuerbares Energiesystem sowie die Stärkung von Innovation, Wertschöpfung und Versorgungssicherheit in Schleswig-Holstein.

Neben den strategischen Zielsetzungen von Land und Bund stützt sich die Roadmap auf bestehende wissenschaftliche und forschungspolitische Vorarbeiten aus dem Bereich Wasserstoff. Hierzu zählen die seit 2021 veröffentlichten Expertenempfehlungen des [Forschungsnetzwerks Wasserstoff](#), das als bundesweite Plattform zur Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik fungiert und jährlich Empfehlungen für die strategische Weiterentwicklung der Wasserstoffforschung in Deutschland erarbeitet.

Darüber hinaus knüpft die Roadmap an die Aktivitäten des [Landeskompetenzzentrums Wasserstoffforschung Schleswig-Holstein](#) (HY.SH) an. Im Rahmen des HY.SH wurden von 2021 bis 2024 Forschungsarbeiten, Workshops und Dialogformate zur strategischen Weiterentwicklung der Wasserstoffforschung und Wasserstoffwirtschaft durchgeführt. Die Roadmap setzt diesen Austauschprozess fort und überführt die Ergebnisse erstmals in einen systematischen Roadmapping-Prozess.

Die Roadmaparbeit begann mit einem Online-Kick-off-Workshop im Juli 2025, in dem Forschende erste Themenfelder, Forschungsfragen und Entwicklungspfade für den Bereich Wasserstoff identifizierten. Diese Ansätze wurden anschließend durch eine Analyse der wissenschaftlichen Publikationen der Teilnehmenden aus den vergangenen fünf Jahren validiert und geschärft. Hierfür kam die Methodik der „Circular Tree Map“ zum Einsatz, mit deren Hilfe bestehende Forschungsschwerpunkte und Potenziale systematisch ausgewertet wurden.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Online-Forschungsdialog im Dezember 2025 gemeinsam diskutiert, ergänzt und weiter validiert. Im Februar 2026 folgte ein Forschungssymposium an der Fachhochschule Westküste in Heide, das sich gezielt mit der Methodik des Instituts für Innovation und Technik (iit) sowie der IOOI-Logik (siehe Kapitel Methodik) befasste. Die dort erarbeiteten Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Priorisierung der identifizierten Forschungsbedarfe sowie deren Zusammenführung zu Transformationspfaden.

Die Roadmap im Fokusfeld Wasserstoff ist das Ergebnis eines partizipativen Entwicklungsprozesses, in den die Expertise der Forschenden unmittelbar eingeflossen ist. Die Beiträge wurden systematisch gebündelt und in Transformationspfade zur Erreichung der Klimaneutralität überführt. Die Roadmap versteht sich dabei als dynamisches Instrument, das im Rahmen eines iterativen Prozesses kontinuierlich aktualisiert und fortgeschrieben wird.

Das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein setzt hierfür die Methodik des „Visual Roadmapping“ ein, um unterschiedliche Perspektiven, Bedarfe und Zukunftsvisionen aus Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zusammenzuführen und in eine gemeinsame strategische Ausrichtung zu überführen.

Die Roadmap dient den Forschenden als Orientierung für die strategische Ausrichtung ihrer Forschungsaktivitäten, den Hochschulleitungen als Grundlage für die Schwerpunktsetzung sowie Politik, Wirtschaft und Gesellschaft als Instrument zur Einordnung zukünftiger Forschungs- und Innovationsbedarfe.

Darüber hinaus verfolgt sie das Ziel, zusätzliche Fördermittel nach Schleswig-Holstein zu lenken. Hierzu werden die identifizierten Forschungsbedarfe in den Dialog mit der Förderkulisse auf Bundes- und EU-Ebene eingebracht, um deren Berücksichtigung in zukünftigen Förderprogrammen zu unterstützen. Gleichzeitig kann der Landesförderfonds Energiewendeforschung (LEF) seine Förderung gezielt an den in der Roadmap identifizierten technologischen Innovationen und wissenschaftlichen Erkenntnissen (Outputs) ausrichten und so die Umsetzung der priorisierten Forschungsthemen entlang der Transformationspfade unterstützen.

3. Methodik „Visual Roadmapping“

Das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein setzt die Methodik „Visual Roadmapping“ ein, um unterschiedliche Perspektiven, Bedarfe und Visionen aus Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zusammenzuführen. Damit dient die Roadmap den Forschenden selbst zur Ausrichtung ihrer Forschung, Hochschulpräsidien zur Schwerpunktsetzung sowie Energiepolitik, Wirtschaft und Gesellschaft zur Orientierung.

Visual Roadmapping ist ein **Orientierungsinstrument der strategischen Vorausschau**, mit dem komplexe Transformationsprozesse über längere Zeiträume hinweg strukturiert betrachtet werden können. Es wird eingesetzt, um **mögliche Transformationspfade** sichtbar zu machen, Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Themenfeldern zu verstehen und langfristige Zielbilder mit heutigen Entscheidungen in Beziehung zu setzen. Roadmapping zielt dabei nicht auf Prognosen, sondern auf **Orientierung und gemeinsame Verständigung**.

Roadmapping hilft dabei, **Komplexität handhabbar** zu machen, ohne sie zu reduzieren. Es zeigt auf, welche **Entwicklungen** zeitlich aufeinander aufbauen, wo **Abhängigkeiten** bestehen und an welchen Stellen gezielte Impulse besonders wirksam sein können. In der Energiewende, die durch Unsicherheiten, dynamische Rahmenbedingungen und vielfältige Akteurskonstellationen geprägt ist, unterstützt Roadmapping den Dialog über Prioritäten und mögliche Entwicklungspfade.

Gleichzeitig ist Roadmapping kein Umsetzungs- oder Maßnahmenplan. Die ausgearbeitete Roadmap ersetzt weder politische Entscheidungen noch detaillierte Fach- oder Investitionsplanungen. Sie abstrahiert bewusst von einzelnen Technologien und kurzfristigen Maßnahmen, um eine **konzeptionelle Gesamtsicht** zu ermöglichen. Ihr Mehrwert liegt darin, Lernprozesse zu strukturieren, unterschiedliche Sichtweisen zu integrieren und **strategische Orientierung** für die weitere Ausarbeitung zu geben. Dabei werden **notwendige Zwischenschritte** auf dem Weg zur Klimaneutralität 2040 sichtbar gemacht und der **Beitrag wissenschaftlicher Forschung** hervorgehoben, der erforderlich ist, um ambitionierte Zielsetzungen in **umsetzbare Transformationspfade** zu überführen.

Die Erstellung der Roadmap erfolgt durch die Kombination zweier methodischer Ansätze:

Backcasting

Von der Zielperspektive 2040 wird rückwärts analysiert:

- welche systemischen Veränderungen (Outcome) bis dahin erreicht sein müssen,
- welche technologischen und nicht-technologischen Ergebnisse (Output) benötigt werden,
- welche Rahmenbedingungen (Input) vorab zu schaffen sind.

Roadmapping

Vom heute aus werden zeitliche Sequenzen, Meilensteine, kritische Entscheidungen und Abhängigkeiten vorwärts kartiert, wobei der Status quo bestehende und zeitlich übergreifende Themen umschreibt. Die Kombination beider Methoden ermöglicht ein konsistentes Verständnis der notwendigen Transformationspfade. Die Zeitachse wird nicht kontinuierlich, sondern in 5-Jahres-Zeiträumen von z.B. 2030 bis 2035 angegeben.

3.1. Die vier Dimensionsebenen

Die Roadmap wird entlang einer Zeitachse von heute bis 2040 (Zielperspektive) entwickelt. Vertikal gliedert sie den Transformationsprozess in vier kohärente Dimensionsebenen, die sowohl den Forschungsprozess als auch den gesellschaftlichen Wandel abbilden.

Input

Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die Input Parameter für die Forschungslandschaft sind immanent wichtig für eine erfolgreiche Durchführung und Begleitung der Energiewendeforschung. Dies betrifft sowohl regulatorische Grundlagen und spezifische Anforderungen des Fokusfeldes Wasserstoff als auch förderpolitische Ausprägungen und Calls aus Land, Bund und EU. Diese Ebene wurde während der vorbereitenden Workshops zur Erstellung der Roadmap für das Fokusfeld Wasserstoff bisher nicht explizit bespielt und gefüllt, soll aber perspektivisch mit Inhalten gefüllt werden, wenn sich Ergebnisse und weitere Erkenntnisse der avisierten Output- und Outcome-Ebenen manifestieren. Dieser Prozess steht ganz im Licht des Backcasting-Ansatzes und paust die Anforderungen und Ausprägungen der Output, Outcome und Impact-Ebenen bis zur Input-Ebene durch. Diese Schritte werden in der iterativen Arbeit an den Dokumenten zur Roadmap erfolgen und innerhalb der Fokusfeldgruppe abgestimmt.

Output

Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse

Die vorliegende Roadmap macht deutlich, dass Klimaneutralität 2040 nicht allein durch den Ausbau einzelner Technologien erreichbar ist, sondern auf einer kontinuierlichen wissenschaftlichen Begleitung, Weiterentwicklung und Integration komplexer Energiesysteme beruht. Die Output-Ebene beschreibt dabei jene technologischen Innovationen, methodischen Ansätze und wissenschaftlichen Erkenntnisse, die notwendig sind, um politische Zielsetzungen, gesellschaftliche Erwartungen und wirtschaftliche Anforderungen in tragfähige Transformationspfade zu überführen. Die Wissenschaft übernimmt eine doppelte Rolle: Zum einen entwickelt sie neue technische, digitale und systemische Lösungen, zum anderen schafft sie die Wissensgrundlagen, um Wechselwirkungen, Zielkonflikte und Skalierungsfragen frühzeitig zu erkennen.

Die Output-Ebene bildet damit das zentrale Bindeglied zwischen heutigen Forschungsaktivitäten und den späteren Wirkungen auf Energiesystem, Wirtschaft und Gesellschaft.

Outcome

Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen

Die Outcome-Ebene der Roadmap zeigt, wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und politische Rahmenbedingungen in konkrete Wirkungen in Sektoren und Anwendungen übersetzen. Sie beschreibt den Übergang von ersten, vergleichbaren Effekten hin zu integrierten, flexiblen und resilienten Systemen. Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel von Technologien, Marktmechanismen und Akteursentscheidungen. Die Outcome Ebene macht sichtbar, wo die Transformation tatsächlich greift, entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette von der Erzeugung über Transport und Speicherung bis hin zur Anwendung in Industrie, Mobilität und Energiesystem, und wie Forschung dazu beiträgt, diese Entwicklungen systematisch zu ermöglichen und langfristig zu verstetigen.

Impact

Impact und gesellschaftliche Missionen

Die Impact-Ebene der Roadmap beschreibt die langfristigen gesellschaftlichen Wirkungen der Transformation und ihren Beitrag zur Zukunftsfähigkeit des Standorts Schleswig-Holstein. Sie zeigt, wie sich aus technologischen, institutionellen und sozialen Veränderungen eine neue klimaneutrale Normalität entwickelt. Forschung leistet dabei einen zentralen Beitrag, indem sie Wirkungen nachvollziehbar macht, Zielkonflikte sichtbar hält und belastbare Grundlagen für Entscheidungen schafft. Auf dieser Basis kann sich Schleswig-Holstein als wettbewerbsfähiger, klimaneutraler Industrie-, Energie- und Wirtschaftsstandort etablieren, der Bezahlbarkeit, Resilienz und ökologische Verantwortung dauerhaft miteinander verbindet.

3.2. Transformationspfade

Im Prozess des Roadmappings identifizierten die Forschenden und Koordinatorinnen und Koordinatoren der Fokusfelder zentrale Transformationspfade, die aufzeigen, wie wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen schrittweise zur Erreichung der Klimaneutralität in Schleswig-Holstein im Jahr 2040 beitragen können. Diese Transformationspfade strukturieren die komplexe Gesamtentwicklung in nachvollziehbare, zeitlich und kausal verknüpfte Entwicklungslinien und verdeutlichen das Zusammenspiel der verschiedenen Impulse. Das heißt wie sich technologische, infrastrukturelle, regulatorische und gesellschaftliche Entwicklungen innerhalb des Fokusfeldes bis 2040 entfalten müssen auf dem Weg zur Klimaneutralität.

Die entwickelten Transformationspfade sind bewusst nicht als abschließende oder vollständige Abbildung aller relevanten Forschungsbedarfe zu verstehen. Sie erheben keinen Anspruch darauf, sämtliche notwendigen Entwicklungen innerhalb eines Forschungsfeldes zu erfassen oder andere Handlungsbedarfe auszuschließen. Vielmehr identifizieren sie zentrale Entwicklungslinien, entlang derer wissenschaftliche Beiträge in Schleswig-Holstein wirksam zur Umsetzung der Energiewende beitragen können.

4. Die vier Dimensionsebenen des Fokusbereiches Wasserstoff

Ausgehend vom heutigen Stand bis zur angestrebten Zukunftsperspektive 2040 wird die Roadmap entlang einer Zeitachse entwickelt. Der Transformationsprozess wird dabei in vier aufeinander abgestimmte Dimensionsebenen gegliedert, welche die Dynamik des Forschungsprozesses ebenso wie die gesellschaftliche Transformation erfassen und den Weg von regulatorischen Rahmenbedingungen über wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Anwendungen bis hin zu den langfristigen Wirkungen der Transformation nachvollziehbar darstellen.

4.1. Input: Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die Input-Ebene umfasst die politischen, regulatorischen, institutionellen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die für die Entwicklung und Skalierung einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft erforderlich sind. Sie beschreibt jene strukturellen Voraussetzungen, die den Forschungs-, Innovations- und Transformationsprozess ermöglichen und beschleunigen. Dazu zählen insbesondere rechtliche und administrative Verfahren, industriepolitische und geopolitische Rahmenbedingungen, regulatorische Bewertungs- und Anreizlogiken sowie der Aufbau tragfähiger institutioneller Steuerungsstrukturen, Fachkräftekapazitäten und Marktregeln entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette.

Die Input-Ebene bildet damit die Grundlage für den erfolgreichen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft und schafft die Voraussetzungen dafür, dass wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Innovationen in wirksame Transformationspfade überführt werden können. Sie ist zugleich dynamisch angelegt und wird im Rahmen des iterativen Roadmap-Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt.

Status Quo (Fokus auf Rahmenbedingung, Beschleunigung und int. Einbettung):

- Rechtliche, administrative sowie industriepolitische und geopolitische Rahmenbedingungen bestimmen das Umsetzungstempo des Wasserstoffhochlaufs.
- Regulatorische und prozessuale Hemmnisse sowie internationale Wettbewerbs- und Machtstrukturen prägen die Handlungsspielräume und Investitionsentscheidungen.

Heute bis 2030 (Fokus auf Aufbau tragfähiger Systemstrukturen und Marktlogiken):

- Weiterentwicklung klarer regulatorischer und bilanzieller Rahmenbedingungen zur Schaffung von Planungs- und Investitionssicherheit.
- Stärkung staatlicher Steuerungs- und Koordinationsstrukturen für den Wasserstoffhochlauf.
- Aufbau von Wissens-, Fachkräfte- und Innovationskapazitäten.
- Ausgestaltung von Marktmechanismen und Wettbewerbsbedingungen zur Sicherstellung effizienter Investitionsentscheidungen.

2030 bis 2035 (Fokus auf Standardisierung, Skalierung und Systemintegration):

- Weiterentwicklung von Bewertungs- und Anreizsystemen zur Integration von Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg.
- Etablierung einheitlicher technischer Standards und regulatorischer Rahmenbedingungen zur Sicherstellung von Interoperabilität und Skalierbarkeit.
- Stärkung der Fachkräftesicherung durch gezielte Qualifizierung und langfristige Kapazitätsentwicklung.
- Harmonisierung regulatorischer und technischer Betriebsstandards zur Gewährleistung eines sicheren und stabilen Systembetriebs.

4.2. Output: Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse

Die vorliegende Roadmap macht deutlich, dass Klimaneutralität bis 2040 nicht allein durch den Ausbau einzelner Technologien erreicht werden kann. Vielmehr erfordert sie eine kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung, Weiterentwicklung und Integration komplexer Energiesysteme. Die Output-Ebene beschreibt jene technologischen Innovationen, methodischen Ansätze und wissenschaftlichen Erkenntnisse, die notwendig sind, um politische Zielsetzungen, gesellschaftliche Erwartungen und wirtschaftliche Anforderungen in tragfähige Transformationspfade zu überführen.

Wissenschaft übernimmt dabei eine doppelte Rolle: Einerseits entwickelt sie neue technische, digitale und systemische Lösungen. Andererseits schafft sie die Wissensgrundlagen, um Wechselwirkungen, Zielkonflikte und Herausforderungen der Skalierung frühzeitig zu erkennen und einzuordnen. Die Output-Ebene bildet somit das zentrale Bindeglied zwischen den heutigen Forschungsaktivitäten und den daraus resultierenden Wirkungen auf Energiesystem, Wirtschaft und Gesellschaft.

Status Quo (Fokus auf Governance, Geschäftsmodelle und Regulierung):

- Entwicklung und Analyse von Governance-Strukturen sowie institutionellen, regulatorischen und ökonomischen Wirkzusammenhängen der Energiewende.
- Erarbeitung von Geschäftsmodellen und regulatorischen Ansätzen zur Unterstützung einer tragfähigen Umsetzung des Wasserstoffhochlaufs.
- Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung von Pilotprojekten zur Identifikation technischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Hochlaufhemmnisse.

Heute bis 2030 (Fokus auf Technologieentwicklung und Umsetzung im H₂-Hochlauf):

- Analyse des Hochlaufs aus technischer, systemischer, rechtswissenschaftlicher, ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Perspektive einschließlich geeigneter Hochlaufinstrumente.
- Weiterentwicklung, Standardisierung sowie Normung und Zertifizierung zentraler H₂-Technologien zur Sicherstellung von Kompatibilität und Investitionssicherheit.
- Erprobung, Skalierung und industrielle Umsetzung von H₂-Technologien durch Reallabore und Demonstratoren.
- Entwicklung von Versorgungskonzepten und Technologien für klimaneutrale Schifffahrt und Hafeninfrastruktur.
- Entwicklung von Methoden zur Auslegung und Standortplanung zentraler und dezentraler Infrastrukturen sowie zur systemdienlichen Sektorkopplung von Strom, Wärme, Wasserstoff und industriellen Anwendungen.
- Optimierung wettbewerbsfähiger PtX-Verfahren sowie Entwicklung sicherer und kosteneffizienter Lösungen für Speicherung und Verdichtung von Wasserstoff.
- Entwicklung nachhaltiger Konzepte zur Wasserbereitstellung und Wasseraufbereitung für die Wasserstoffproduktion unter Nutzung alternativer Wasserquellen.

2030 bis 2035 (Fokus auf Optimierung, Skalierung und Systemintegration):

- Weiterentwicklung und Optimierung zentraler H₂-Technologien für die industrielle Anwendung einschließlich Lebenszyklusbewertung zur Reduktion von Ressourcenbedarf und Emissionen.
- Weiterentwicklung und Integration nachhaltiger Speichertechnologien sowie Stärkung von Kreislaufwirtschaftsansätzen.
- Entwicklung und Umsetzung von Geschäftsmodellen zur Nutzung von Abwärme aus der Wasserstoffproduktion.

- Entwicklung und Integration von Offshore-Wasserstofferzeugung sowie zugehöriger maritimer Wertschöpfungsketten und Infrastrukturen.
- Wissenschaftliche Begleitung des fortlaufenden Markthochlaufs durch Analyse, Wissenstransfer, Standardisierung und Abbau von Umsetzungshemmnissen.
- Skalierung und Integration von Wasserstoffsystemen und Power-to-X-Anwendungen in Industrie, maritime Anwendungen und Energiesysteme.
- Erprobung und Validierung von Systemlösungen und Transformationspfaden in Reallaboren und Experimentierräumen.

2035 bis 2040 (Fokus auf Systemverfestigung und Finalisierung):

- Begleitforschung zur Verfestigung des H₂-Energiesystems durch Monitoring, Wirkungsanalysen und Weiterentwicklung von Marktregeln und Standards.
- Systemoptimierung und Industriereife von H₂-Technologien durch stabilen Betrieb und Lebenszyklusanalysen zur Senkung von Kosten und Emissionen.

4.3. Outcome: Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen

Die Outcome-Ebene der Roadmap zeigt, wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und politische Rahmenbedingungen in konkrete Wirkungen in Sektoren und Anwendungen übersetzen. Sie beschreibt den Übergang von ersten, vergleichbaren Effekten hin zu integrierten, flexiblen und resilienten Systemen. Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel von Technologien, Marktmechanismen und Akteursentscheidungen. Die Outcome-Ebene macht sichtbar, wo Transformation tatsächlich greift, im Betrieb von Energie- und Verkehrssystemen, in industriellen Wertschöpfungsketten und in der praktischen Umsetzung, und wie Forschung dazu beiträgt, diese Wirkungen systematisch zu ermöglichen und zu stabilisieren.

Status Quo (Fokus auf Bewertungs- und Wirkungsverständnis):

- Verbesserte Vergleichbarkeit und Bewertung von Technologien und Maßnahmen.
- Erste Effizienz- und Wirkungsfortschritte durch Technologieeinsatz und Nachfrageanpassungen.

Heute bis 2030 (Fokus auf Skalierung, Marktentwicklung und Systemintegration):

- Standards, Sicherheitsanforderungen und Qualifizierungsstrukturen für den H₂-Hochlauf sind etabliert.
- Interregionale Zusammenarbeit und Netzwerke stärken Wissenstransfer, Standardisierung und Skalierung.

- Technologietransfer in die Anwendung sowie erste wirtschaftlich tragfähige H₂-Nutzungen sind erreicht.
- Funktionsfähige Markt- und Preissignale setzen Anreize für effizientes und systemdienliches Verhalten.
- Versorgungskonzepte für klimaneutrale Kraftstoffe in der Schifffahrt sind erprobt und skalierbar.
- Systemdienliche H₂-Erzeugung sowie industrielle Skalierung stärken Flexibilität und nationale Wertschöpfung.

2030 bis 2035 (Fokus auf Skalierung, Systemintegration und Resilienz):

- Wasserstoff- und Speichertechnologien sind technisch ausgereift und systemdienlich integriert.
- Wasserstoffkernnetz und Langzeitspeicher sind etabliert und im Betrieb erprobt.
- Energiesysteme sind sektorübergreifend integriert, hochflexibel, robust gegenüber Volatilitäten und Lieferkettenstörungen sowie geopolitischen Abhängigkeiten.
- Großskalige Elektrolysekapazitäten und industrielle H₂-Anwendungen sind realisiert.
- Wasserstoffbasierte Leistung stärkt Flexibilität und Versorgungssicherheit.
- Breite, wettbewerbsfähige Verfügbarkeit von H₂ und Derivaten stärkt Wertschöpfung und Transformation.

2035 bis 2040 (Fokus auf Systemverfestigung und Finalisierung):

- Flächendeckende, bezahlbare Verfügbarkeit von H₂ und klimaneutralen Derivaten.
- Wirtschaftlich etablierte CO₂-Nutzung mit H₂ zur Umsetzung geschlossener Kohlenstoffkreisläufe.
- Vollständig erneuerbares und effizient organisiertes Energiesystem.
- Großskalige, serienreife und kosteneffiziente Elektrolysetechnologien im industriellen Dauerbetrieb.
- Systemisch integriertes und international eingebundenes Wasserstoffsystem.

4.4. Impact: Impact und gesellschaftliche Missionen

Die Impact-Ebene der Roadmap beschreibt die langfristigen gesellschaftlichen Wirkungen der Transformation und ihren Beitrag zur Zukunftsfähigkeit des Standorts Schleswig-Holstein. Sie zeigt, wie sich aus technologischen, institutionellen und sozialen Veränderungen eine neue klimaneutrale Normalität in entwickelt. Forschung leistet dabei einen zentralen

Beitrag, indem sie Wirkungen nachvollziehbar macht, Zielkonflikte sichtbar hält und belastbare Grundlagen für Entscheidungen schafft. Auf dieser Basis kann sich Schleswig-Holstein als wettbewerbsfähiger, klimaneutraler Industrie-, Energie- und Wirtschaftsstandort etablieren, der Bezahlbarkeit, Resilienz und ökologische Verantwortung dauerhaft miteinander verbindet.

Status Quo (Fokus auf gesellschaftliche Leitbilder und Zielverständnis):

- Versorgungssicherheit und Resilienz entwickeln sich zu zentralen Leitprinzipien für die Ausgestaltung eines zukunftsfähigen Energiesystems.
- Klimaneutralität etabliert sich zunehmend als handlungsleitendes Leitbild in Industrie, Innovation und Wissenschaft.

Heute bis 2030 (Fokus auf gesellschaftliche Verankerung und Teilhabe):

- Gesellschaftliche Akzeptanz und Teilhabe stärken sich zunehmend und tragen die Energiewende als gemeinschaftliches Projekt.
- Arbeitsmärkte und Qualifikationsstrukturen entwickeln sich im Einklang mit der Transformation hin zu zukunftsfähiger Beschäftigung.

2030 bis 2035 (Fokus auf gesellschaftliche Stabilisierung und Marktdurchsetzung):

- Ein klimaneutrales, zuverlässiges und für Gesellschaft und Wirtschaft verständliches Energiesystem etabliert sich zunehmend.
- Klimaneutralität stärkt die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts und fördert die industrielle Transformation.
- Wirtschaftlich tragfähige klimaneutrale Technologien setzen sich schrittweise als Standard in zentralen Anwendungen durch.
- Klimaneutrale Schifffahrt entwickelt sich hin zu wirtschaftlich tragfähigen Anwendungen auf Basis alternativer Kraftstoffe.

2030 bis 2040 (Fokus auf gesellschaftliche Zielerreichung und Systemstabilität):

- Eine bezahlbare, resiliente und souveräne Energieversorgung auf Basis klimaneutraler Technologien verfestigt sich.
- Klimaneutrale Anwendungen im See- und Straßentransport etablieren sich.
- Erzeugung und Bedarf im erneuerbaren Energiesystem werden durch H₂ zunehmend in Balance gebracht.
- Die H₂-Wirtschaft aus Schleswig-Holstein entwickelt sich zu einem international wettbewerbsfähigen Bestandteil des klimaneutralen Wirtschaftsstandorts.

4.5. Zusammenfassung der IOOI-Ebenen

Die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Schleswig-Holstein folgt einer schrittweisen Transformation entlang der IOOI-Logik (Input–Output–Outcome–Impact). Sie beschreibt den Übergang von Forschung und Technologieentwicklung hin zur systemischen Integration und schließlich zur vollständigen Klimaneutralität des Energiesystems.

Phase 1: Aufbau von Wissen und Strukturen (bis ca. 2030)

Im Vordergrund stehen Forschung, Entwicklung und erste Demonstrations- und Reallaboranwendungen entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette. Ziel ist die Entwicklung zentraler Technologien, Methoden und Systemlösungen sowie der Aufbau von Standards, regulatorischen Grundlagen und Transferstrukturen. Diese Phase schafft die Basis für den späteren Markthochlauf.

Phase 2: Skalierung und Systemintegration (2030 bis 2035)

In dieser Phase erfolgt die Anwendung und Integration von Wasserstofftechnologien in Industrie, Energiesystem und maritime Anwendungen. Die Infrastruktur für Elektrolysekapazitäten, Kernnetz, Speicher und flexible Erzeugung wird aufgebaut. Parallel entwickeln sich Marktmechanismen, Geschäftsmodelle und Rahmenbedingungen weiter, während die Forschung Skalierungs- und Systemeffekte begleitet.

Phase 3: Konsolidierung und Klimaneutralität (bis 2040)

Wasserstoff ist vollständig in das erneuerbare Energiesystem integriert und trägt wesentlich zur Versorgungssicherheit, Flexibilität und Dekarbonisierung bei. Technologien sind serienreif und wirtschaftlich etabliert. Der Impact zeigt sich in einem klimaneutralen, resilienten und international wettbewerbsfähigen Energiestandort Schleswig-Holstein.

5. Transformationspfade

Die übergreifende Roadmap identifiziert zentrale Transformationspfade, die aufzeigen, wie wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen schrittweise zur Erreichung der Klimaneutralität 2040 beitragen können. Diese Transformationspfade strukturieren die komplexe Gesamtentwicklung in nachvollziehbare, zeitlich und kausal verknüpfte Entwicklungslinien und machen sichtbar, welche Beiträge aufeinander aufbauen und sich gegenseitig bedingen.

Aufbauend auf dieser übergreifenden Perspektive werden in den fokusbereichsspezifischen Roadmaps für jedes Fokusfeld eigene Transformationspfade herausgearbeitet und beschrieben. Diese Transformationspfade bündeln jeweils zentrale Wirkmechanismen, über

die das jeweilige Fokusfeld zur Energiewende beiträgt, und zeigen auf, wie sich technologische, infrastrukturelle, regulatorische und gesellschaftliche Entwicklungen innerhalb des Feldes bis 2040 entfalten müssen.

Die dargestellten Transformationspfade sind dabei bewusst nicht als abschließende oder vollständige Abbildung aller relevanten Forschungsbedarfe zu verstehen. Sie erheben keinen Anspruch darauf, sämtliche notwendigen Entwicklungen innerhalb eines Fokusfeldes zu erfassen oder andere Handlungsbedarfe auszuschließen. Vielmehr identifizieren sie zentrale, besonders wirkungsrelevante Entwicklungslinien, entlang derer wissenschaftliche Beiträge in Schleswig-Holstein gezielt zur Umsetzung der Energiewende beitragen können.

5.1. Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂



Dieser Transformationspfad beschreibt den Hochlauf von Wasserstofftechnologien hin zu einer großskaligen industriellen Nutzung. Ausgangspunkt sind Technologieentwicklung, Standardisierung sowie Normung und Zertifizierung, um Investitionssicherheit zu schaffen. Darauf aufbauend erfolgt der Transfer in die industrielle Praxis mit ersten wirtschaftlich tragfähigen Anwendungen. Ziel ist dabei der Aufbau einer leistungsfähigen heimischen Wasserstoffwirtschaft mit starken industriellen Wertschöpfungsketten und internationaler Wettbewerbsfähigkeit. Mit zunehmender Reife werden Technologien optimiert, Kosten gesenkt und Lebenszyklusaspekte stärker berücksichtigt. Parallel entstehen großskalige Elektrolysekapazitäten und wasserstoffbasierte Anwendungen in der Industrie. Dies stärkt zugleich die Versorgungssicherheit und reduziert Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern. Wasserstoff trägt zudem zur Bereitstellung gesicherter Leistung und Systemflexibilität bei. Langfristig entwickelt sich eine flächendeckende Versorgung mit H₂ und Derivaten sowie eine international wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft.

Der Transformationspfad beginnt mit der Technologieentwicklung und Standardisierung für den Wasserstoffhochlauf. Zentrale Wasserstofftechnologien werden weiterentwickelt und durch Normungs-, Zertifizierungs- und Standardisierungsprozesse vereinheitlicht. Dadurch entstehen kompatible technische Lösungen und verlässliche Rahmenbedingungen, die Investitionssicherheit für den Markthochlauf schaffen.

Diese Aktivitäten schaffen die Grundlage für einen erfolgreichen Wasserstoffhochlauf und ermöglichen die breite Einführung standardisierter Technologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Gleichzeitig werden erste industrielle Anwendungen vorbereitet und die Voraussetzungen für den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur geschaffen.

Ab 2030 rückt die Skalierung der Wasserstoffwirtschaft in den Mittelpunkt. Einerseits werden Elektrolysekapazitäten, Offshore-Wasserstofferzeugung und Power-to-X-Anwendungen für Industrie, maritime Anwendungen und Energiespeicherung ausgebaut. Andererseits erfolgt die gezielte Technologieoptimierung bestehender Systeme. Durch technische Weiterentwicklungen, Effizienzsteigerungen und Lebenszyklusbewertungen werden Ressourcenbedarf, Emissionen und Kosten schrittweise reduziert.

Diese Entwicklungen ermöglichen die großskalige Einführung von Wasserstofftechnologien. Bis 2030 werden in Schleswig-Holstein rund 1,5 GW Elektrolyseleistung aufgebaut und Wasserstoff kommt erstmals in industriellen Anwendungen im größeren Maßstab zum Einsatz. Parallel dazu trägt der Einsatz wasserstoffbasierter Kraftwerkskapazitäten zur Bereitstellung gesicherter Leistung bei. Ein wasserstoffbasiertes Kraftwerk mit einer Leistung von 800 MW beziehungsweise der dezentrale Einsatz von Wasserstoff in GuD-Kraftwerken erhöht die Flexibilität des Energiesystems und unterstützt die Integration erneuerbarer Energien.

Ab 2035 steht die industrielle Reife der Technologien im Fokus. Serienoptimierung, robuste Betriebsführung und weitere technologische Verbesserungen senken die Kosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Gleichzeitig stärken umfassende Lebenszyklusanalysen die zirkuläre Wertschöpfung und tragen dazu bei, Ressourcenverbrauch und Emissionen weiter zu reduzieren.

Auf dieser Grundlage werden die industriellen Elektrolysekapazitäten in Schleswig-Holstein deutlich ausgebaut. Bis 2035 sind rund 6 GW Elektrolyseleistung in Betrieb, während leistungsfähige und kosteneffiziente Elektrolysetechnologien für den Dauerbetrieb serienreif zur Verfügung stehen. Gleichzeitig wird eine flächendeckende Versorgung mit Wasserstoff und klimaneutralen Derivaten erreicht. Wasserstoff, Ammoniak, Methanol und weitere Derivate stehen in industriellem Maßstab zu wettbewerbsfähigen Preisen bereit. Die erforderlichen Import-, Transport- und Umschlaginfrastrukturen sind entsprechend ausgebaut und auf klimaneutrale Energieträger ausgerichtet.

Gemeinsam mit den Entwicklungen im Transformationspfad „H₂-Methanisierung & Power-to-X“ führt dieser Entwicklungspfad schließlich zum übergeordneten Ziel einer global wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft. Wasserstoffbasierte Technologien, Produkte und Dienstleistungen aus Schleswig-Holstein etablieren sich erfolgreich auf internationalen Märkten und stärken den Wirtschaftsstandort als Vorreiter einer klimaneutralen Industrie.

5.2. Maritime H₂ Anwendung



Der Transformationspfad beschreibt die Entwicklung hin zu einem klimaneutralen maritimen Transport und Logistiksystem auf Basis von Wasserstoff und Derivaten. Ausgangspunkt sind integrierte Versorgungskonzepte sowie Sicherheits-, Logistik- und

Betriebslösungen für Hafeninfrastruktur und Schifffahrt, einschließlich Bunkering und Umrüstung. Ergänzend werden wasserstoffbasierte Antriebssysteme, Energiesysteme an Bord sowie deren Integration in bestehende Schiffskonzepte entwickelt, erprobt und optimiert. Darauf aufbauend werden skalierbare Konzepte zur Bereitstellung klimaneutraler Kraftstoffe etabliert und robuste Liefer- und Versorgungssysteme für H₂ und Derivate aufgebaut. Gleichzeitig werden Betriebsstrategien, Sicherheitskonzepte und Gesamtsystemarchitekturen für eine zuverlässige maritime Anwendung weiterentwickelt. Klimaneutrale Schifffahrt wird so technisch realisierbar und wirtschaftlich tragfähig. Perspektivisch entsteht ein klimaneutraler und resilienter Transportsektor auf See, der neben batterieelektrischen Lösungen auf einer gesicherten Versorgung mit grünem Wasserstoff und seinen Derivaten wie E Methanol oder grünem Ammoniak basiert.

Der Transformationspfad beginnt mit der Entwicklung von Konzepten für eine klimaneutrale Schifffahrt und Hafeninfrastruktur. Im Fokus stehen die Erzeugung, Bereitstellung und Nutzung wasserstoffbasierter Energieträger sowie die Integration entsprechender Versorgungsstrukturen in Hafen- und Logistiksysteme. Gleichzeitig werden Sicherheitskonzepte, Betriebsabläufe, Bunkering-Lösungen und technische Anforderungen für die Umrüstung und den Betrieb maritimer Anwendungen weiterentwickelt.

Diese Aktivitäten führen bis 2030 zur Erprobung und Beschreibung skalierbarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Kraftstoffe in der Schifffahrt. Die Erzeugung, Bereitstellung und Nutzung von Wasserstoff und wasserstoffbasierten Kraftstoffen für maritime Anwendungen werden unter realen Bedingungen demonstriert und hinsichtlich ihrer technischen, wirtschaftlichen und logistischen Anforderungen bewertet. Dadurch entstehen belastbare Konzepte für einen späteren großskaligen Einsatz.

Parallel dazu schaffen die Entwicklungen in den Transformationspfaden „Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂“ sowie „H₂-Methanisierung & Power-to-X“ die Voraussetzungen für eine robuste Versorgung mit Wasserstoff und klimaneutralen Derivaten. Wasserstoff, Ammoniak, Methanol und weitere Energieträger werden zunehmend in industriellem Maßstab erzeugt und stehen zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung. Ergänzend werden Import-, Transport- und Versorgungskonzepte aufgebaut, die eine zuverlässige Bereitstellung der benötigten Energieträger ermöglichen.

Das Zusammenwirken dieser Entwicklungen führt im Zeitraum von 2030 bis 2035 dazu, dass klimaneutrale Schifffahrt technisch und wirtschaftlich nachweisbar wird. Alternative Kraftstoffe können in ersten maritimen Anwendungen wirtschaftlich tragfähig eingesetzt werden. Die erforderlichen Versorgungs- und Infrastrukturkonzepte sind verfügbar, sodass klimaneutrale Betriebsmodelle schrittweise in den Regelbetrieb überführt werden können.

Ab 2035 wird die maritime Transformation durch die flächendeckende Verfügbarkeit von Wasserstoff und klimaneutralen Derivaten weiter unterstützt. Wasserstoff und seine Derivate stehen nun im industriellen Maßstab zu bezahlbaren Preisen zur Verfügung. Gleichzeitig sind Import-, Umschlag- und Versorgungsinfrastrukturen weitgehend auf klimaneutrale Energieträger ausgerichtet und ermöglichen deren großskalige Nutzung in maritimen Anwendungen.

Gemeinsam mit den Entwicklungen der Transformationspfade „Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂“ sowie „H₂-Methanisierung & Power-to-X“ führt dieser Entwicklungspfad schließlich zum Ziel eines klimaneutralen Transportsektors auf See und Straße. Die industrielle Bereitstellung und gesicherte Versorgung mit grünem Wasserstoff und wasserstoffbasierten Derivaten ermöglicht den Regelbetrieb klimaneutraler Anwendungen in der Schifffahrt sowie im schweren Straßengüterverkehr und trägt damit wesentlich zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors bei.

5.3. H₂ Methanisierung & PtX



In diesem Transformationspfad wird die Entwicklung effizienter Verfahren zur Umwandlung von Wasserstoff in speicher- und transportfähige Energieträger beschrieben. Im Fokus stehen die Entwicklung und Optimierung wettbewerbsfähiger PtX-Prozesse zur Herstellung von Wasserstoffderivaten unter Berücksichtigung von Skalierung, Effizienz und systemischer Prozessintegration. Parallel werden Wasserstoff- und PtX-Systeme für Industrie, Mobilität und Energiespeicherung skaliert und schrittweise in den Markt überführt. Der Ausbau der PtX-Kapazitäten unterstützt dabei die flächendeckende Verfügbarkeit wasserstoffbasierter Derivate zu wettbewerbsfähigen Preisen. Ergänzend wird CO₂ im industriellen Maßstab in geschlossene Kohlenstoffkreisläufe eingebunden und in PtX-Prozessen wirtschaftlich genutzt. Langfristig entsteht so eine global wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft mit integrierten PtX-Wertschöpfungsketten.

Der Transformationspfad beginnt im Status Quo mit der Entwicklung und Optimierung wettbewerbsfähiger Power-to-X-Verfahren und Wasserstoffderivate. Im Fokus stehen die Verbesserung von Effizienz, Skalierbarkeit und Prozessintegration sowie die wirtschaftliche Herstellung marktfähiger synthetischer Energieträger. Dadurch werden erste technische und ökonomische Grundlagen für eine großskalige PtX-Wirtschaft geschaffen.

Ab 2030 erfolgt der Übergang in die Skalierungsphase. Wasserstoffsysteme und Power-to-X-Anwendungen werden gezielt für unterschiedliche Einsatzfelder ausgebaut, insbesondere für industrielle Anwendungen, maritime Kraftstoffe und zur Energiespeicherung. Die Technologien werden stärker in bestehende Energie- und Industriestrukturen integriert und erreichen zunehmende Marktreife.

Diese Entwicklungen führen ab 2030 gemeinsam mit den Fortschritten im Transformationspfad „Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂“ zu einer bezahlbaren und robusten Verfügbarkeit von Wasserstoff und seinen Derivaten. Wasserstoff, Ammoniak, Methanol und weitere Produkte stehen im industriellen Maßstab zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung und werden durch ausgereifte Erzeugungs-, Import- und Versorgungskonzepte gestützt. Diese Verfügbarkeit bildet eine zentrale Voraussetzung insbesondere für den Hochlauf der maritimen Anwendungen.

Mit zunehmender Systemintegration entfaltet der Pfad ab 2035 weitere Wirkungen im Bereich der Kohlenstoffkreisläufe. Durch die Kombination von Wasserstoffnutzung und CO₂-Abscheidung bzw. -Nutzung werden wirtschaftliche Power-to-X-Prozesse etabliert, die eine geschlossene Kohlenstoffführung im industriellen Maßstab ermöglichen. Dadurch entstehen neue industrielle Wertschöpfungsketten auf Basis erneuerbarer Energien.

Gemeinsam mit dem Transformationspfad „Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂“ trägt dieser Pfad ab 2035 zur flächendeckenden Verfügbarkeit von Wasserstoff und klimaneutralen Derivaten bei. Diese stehen in ausreichenden Mengen und zu wettbewerbsfähigen Preisen bereit; die erforderlichen Transport-, Speicher- und Umschlagstrukturen sind weitgehend auf klimaneutrale Energieträger ausgerichtet.

Das Zusammenspiel dieser Entwicklungen führt schließlich zum übergeordneten Ziel einer global wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft aus Schleswig-Holstein. Wasserstoffbasierte Technologien, Produkte und Dienstleistungen aus der Region sind international konkurrenzfähig, stärken den Wirtschaftsstandort nachhaltig und ermöglichen eine industrielle Transformation auf Basis klimaneutraler Energieträger.

5.4. H₂ Speicherung



Dieser Transformationspfad beschreibt die Entwicklung hin zu einer leistungsfähigen und integrierten Wasserstoff- und Speicherinfrastruktur. Im Fokus stehen zunächst sichere und kosteneffiziente Lösungen für Verdichtung und Speicherung. Dabei werden neben großskaligen geologischen Speichern auch innovative materialbasierte Speichertechnologien, etwa Metallhydridspeicher und andere festkörperbasierte Ansätze, berücksichtigt, weiterentwickelt und gezielt auf geeignete Anwendungsoptionen hin untersucht. Darauf aufbauend werden Speichertechnologien weiterentwickelt und im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft bewertet und integriert. Mit zunehmender Skalierung entstehen industrielle Wertschöpfungsketten und eine gestärkte technologische Wettbewerbsfähigkeit. Parallel werden das Wasserstoffkernnetz sowie saisonale Langzeitspeicher aufgebaut und in den Betrieb überführt. Unterschiedliche Speicheransätze, von kompakten dezentralen Lösungen bis hin zu großvolumigen Infrastrukturen, ergänzen sich dabei systemisch und tragen gemeinsam

zur Resilienz sowie zur Versorgungssicherheit des Energiesystems bei. Zielbild ist damit in der Summe eine klimaneutrale, bezahlbare, krisenfeste und strategisch abgesicherte Energieversorgung.

Der Transformationspfad beginnt im Status Quo mit der Entwicklung sicherer und kosteneffizienter Technologien zur Verdichtung und Speicherung von Wasserstoff. Im Fokus stehen Anlagen- und Materialkonzepte, die eine zuverlässige, wirtschaftliche und sichere Handhabung von Wasserstoff ermöglichen. Diese Technologien bilden die Grundlage für den Aufbau erster Speicher- und Infrastruktursysteme und schaffen zentrale Voraussetzungen für den Markthochlauf.

Parallel dazu entstehen erste Effekte im Bereich der nationalen Wertschöpfung und technologischen Wettbewerbsfähigkeit. Durch die Entwicklung und industrielle Erprobung klimaneutraler Technologien werden bestehende Wertschöpfungsketten gestärkt und neue industrielle Anwendungen vorbereitet, die sektorübergreifend skalierbar sind.

Ab 2030 rückt die Weiterentwicklung und Integration unterschiedlicher Speichertechnologien in den Mittelpunkt. Neben klassischen Speicherlösungen werden insbesondere nachhaltige und systemdienliche Speicheransätze weiterentwickelt und in das Energiesystem eingebunden. Gleichzeitig werden Konzepte der Kreislaufwirtschaft stärker berücksichtigt, um Ressourcen effizient zu nutzen und die Umweltwirkungen der Speicherinfrastruktur zu minimieren.

Diese Entwicklungen führen ab 2030 zu einer skalierten Wasserstoff- und Speicherökonomie. Wasserstoff- und Speichertechnologien sind in diesem Stadium technisch ausgereift, wirtschaftlich tragfähig und systemisch integriert. Sie ermöglichen eine flexible und bedarfsgerechte Bereitstellung von Energie und bilden einen zentralen Baustein des zukünftigen Energiesystems.

Parallel dazu wird ein Wasserstoffkernnetz aufgebaut und in Betrieb genommen. Ergänzt wird dieses durch saisonale Langzeitspeicher, die am Markt etabliert sind und einen wesentlichen Beitrag zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch leisten. Gleichzeitig werden wasserstoffbasierte Resilienzmaßnahmen im Energiesystem umgesetzt und in der Praxis erprobt, um Versorgungssicherheit auch unter komplexen Systembedingungen zu gewährleisten.

Das Zusammenspiel dieser Entwicklungen führt ab 2035 zu einer bezahlbaren, resilienten und souveränen Energieversorgung. Energie steht in einem klimaneutralen System zuverlässig, wirtschaftlich und krisenfest zur Verfügung und ist strategisch abgesichert. Die Wasserstoffspeicherung bildet damit eine zentrale Grundlage für die langfristige Stabilität und Unabhängigkeit des Energiesystems.

5.5. Systemdienliche Integration von H₂ ins erneuerbare Energiesystem



Dieser Transformationspfad beschreibt die Rolle von Wasserstoff als integralen Bestandteil eines vollständig erneuerbaren Energiesystems. Grundlage ist der Ausbau physischer Energieinfrastrukturen und die sektorübergreifende Kopplung von Strom-, Wärme-, Wasserstoff- und Industriesystemen. Markt- und Preissignale fördern dabei systemdienliches Verhalten und Flexibilität im Gesamtsystem. Wasserstoff wird dabei bedarfsgerecht erzeugt, gespeichert und genutzt und trägt zur Integration erneuerbarer Energien sowie zur effizienten Auslastung der Energieinfrastruktur bei. Ergänzend entstehen Geschäftsmodelle zur Nutzung von Abwärme aus der H₂-Produktion. Perspektivisch entwickelt sich ein integriertes, flexibles und resilientes Energiesystem, das vollständig auf erneuerbaren Energien basiert und durch Wasserstoff international eingebunden und systemisch stabilisiert wird.

Der Transformationspfad beginnt im Status Quo mit der Entwicklung von Methoden zur Auslegung und Standortplanung zentraler und dezentraler Energieinfrastrukturen sowie zur systemdienlichen Sektorkopplung von Strom, Wärme, Wasserstoff und Industrie. Dabei werden insbesondere geeignete Standorte für Elektrolyseure und weitere Wasserstoffinfrastrukturen untersucht, um erneuerbare Erzeugung, Netzengpässe, industrielle Bedarfe und Flexibilitätsanforderungen optimal miteinander zu verknüpfen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse schaffen die Grundlage für den späteren Ausbau integrierter Infrastrukturen und die sektorübergreifende Organisation von Energieflüssen.

Parallel dazu werden funktionsfähige Markt- und Preissignale für die Energiewende entwickelt. Diese schaffen wirksame Anreize für Flexibilität, Effizienz und netzdienliches Verhalten und ermöglichen eine wirtschaftlich optimierte Steuerung von Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im Energiesystem.

Das Zusammenspiel dieser beiden Entwicklungen führt bereits dem Status Quo zur Entwicklung und Erprobung systemdienlicher Wasserstofferzeugung als Flexibilitätsoption. Konzepte zur flexiblen H₂-Erzeugung werden praktisch getestet und tragen dazu bei, Stromüberschüsse aufzunehmen und die Netzstabilität im Energiesystem zu unterstützen.

Ab 2030 rückt die Integration sektorübergreifender Systemlösungen stärker in den Fokus. Hierzu werden insbesondere Geschäftsmodelle für die Nutzung von Abwärme aus der Wasserstoffproduktion entwickelt und umgesetzt. Diese ermöglichen eine effizientere Nutzung von Energie und verbessern die Wirtschaftlichkeit von Power-to-X- und Elektrolyseprozessen.

Gemeinsam mit der Weiterentwicklung der Infrastruktur und der Marktmechanismen führt dies ab 2030 zur Entstehung integrierter, flexibler und resilienter Energiesysteme. Diese sind

sektorübergreifend vernetzt, hochflexibel im Betrieb und robust gegenüber Schwankungen bei Erzeugung und Verbrauch. Die Resilienz des Energiesystems basiert dabei nicht nur auf leistungsfähigen Infrastrukturen, sondern auch auf diversifizierten Lieferketten und belastbaren internationalen Partnerschaften entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette.

Ab 2035 erreichen diese Entwicklungen eine neue Systemstufe. Das Energiesystem basiert vollständig auf erneuerbaren Energien und ist systemisch effizient organisiert. Gleichzeitig ist Wasserstoff als zentraler Energieträger vollständig integriert und in internationale Energiemärkte eingebunden, wodurch sich int. Wertschöpfungsketten etablieren.

Die zuvor beschriebenen Entwicklungen wirken zusammen mit der systemdienlichen Wasserstoffherzeugung als Flexibilitätsoption auf das langfristige Zielbild ein. In diesem wird das Gesamtsystem so organisiert, dass Erzeugung und Bedarf im vollständig erneuerbaren Energiesystem in Balance stehen. Wasserstoff ermöglicht dabei den Ausgleich von fluktuierender Erzeugung und Nachfrage, während der industrielle Wasserstoffbedarf vollständig durch grünen Wasserstoff gedeckt wird.

5.6. Zwischenfazit

Insgesamt zeigt die Roadmap des Fokusfeldes Wasserstoff, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Schleswig-Holstein ein langfristiger und systemischer Prozess ist. Die dargestellten Transformationspfade verdeutlichen die parallelen Entwicklungsstränge, die gemeinsam zu einem integrierten, klimaneutralen Energiesystem führen. Erst durch das Zusammenspiel von Erzeugung, Umwandlung, Speicherung, Transport und Nutzung kann Wasserstoff seine Rolle als Schlüsseltechnologie der Energiewende voll entfalten, wodurch sich Synergien mit dem Fokusfeld Netzintegration sowie weiteren Anwendungsfeldern, wie Mobilität und Wärme ergeben.

Die Transformationspfade spiegeln zugleich die Standortvorteile Schleswig-Holsteins wider. Von der Erzeugung grünen Wasserstoffs auf Basis der hohen Verfügbarkeit erneuerbarer Energie über die Speicherpotenziale in geologischen Formationen und die Herstellung von Wasserstoffderivaten bis hin zu deren Transport und Nutzung in Industrie und Schifffahrt adressieren sie zentrale Handlungsfelder entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

6. Handlungsoptionen

Aus den dargestellten Transformationspfaden ergibt sich für Schleswig-Holstein die Notwendigkeit, den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft als Bestandteil eines integrierten und erneuerbaren Energiesystems zu verstehen. Der Wasserstoffhochlauf sollte dabei nicht isoliert entlang einzelner Technologien oder Anwendungen erfolgen, sondern die Entwicklung

von Erzeugung, Speicherung, Transport, Umwandlung und Nutzung von Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette miteinander verknüpfen. Besondere Bedeutung kommt dabei der sektorübergreifenden Integration von Strom-, Wärme-, Industrie- und Wasserstoffsystemen zu, um Flexibilitätspotenziale zu erschließen und die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien zu unterstützen.

Gleichzeitig sollte Schleswig-Holstein seine Standortvorteile als Vorreiter der Energiewende nutzen, um den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien gezielt mit industriellen Anwendungen zu verbinden. Der Aufbau von Elektrolysekapazitäten, Wasserstoffinfrastrukturen sowie industriellen und maritimen Anwendungsfeldern sollte daher koordiniert erfolgen. Dabei gilt es, industrielle Bedarfe frühzeitig mit dem Ausbau erneuerbarer Energien sowie von Transport- und Speicherinfrastrukturen zu verknüpfen und langfristige Investitionssicherheit zu schaffen.

Eine zentrale Voraussetzung für den erfolgreichen Wasserstoffhochlauf bleibt die kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung des Transformationsprozesses. Forschungseinrichtungen und Hochschulen leisten durch Technologieentwicklung, Systemanalyse und Wirkungsbewertung einen wesentlichen Beitrag.

Reallabore und Demonstrationsvorhaben ermöglichen die Erprobung neuer Technologien, Geschäftsmodelle und regulatorischer Ansätze und schaffen wichtige Erkenntnisse für die großskalige Anwendung.

Darüber hat die Entwicklung von Wasserstoffderivaten und Power-to-X-Anwendungen eine besondere Bedeutung. Insbesondere für maritime Anwendungen, energieintensive Industrien sowie internationale Wertschöpfungsketten werden Wasserstoff und seine Derivate eine wichtige Rolle für die Dekarbonisierung schwer elektrifizierbarer Bereiche einnehmen. Schleswig-Holstein sollte die Entwicklung entsprechender Technologien, Produktionskapazitäten sowie Import-, Export- und Logistikinfrastrukturen unterstützen und seine Position als Wasserstoffstandort weiter ausbauen.

Für die langfristige Integration großer Wasserstoffmengen sollten Transport- und Speicherinfrastrukturen frühzeitig und systemisch entwickelt werden. Neben dem Wasserstoffkernnetz gewinnen insbesondere Langzeit- und Kavernenspeicher sowie innovative Speichertechnologien an Bedeutung, um erneuerbare Energien zeitlich flexibel nutzbar zu machen und Versorgungssicherheit auch unter volatilen Erzeugungsbedingungen sicherzustellen. Erforderlich sind verlässliche Rahmenbedingungen, transparente Marktmechanismen, harmonisierte Standards sowie beschleunigte Planungs- und Genehmigungsverfahren, um Investitionen zu erleichtern und den Wasserstoffhochlauf zu unterstützen. Ebenso bleibt der Aufbau von Fachkräfte- und Innovationskapazitäten entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette ein wichtiger Baustein für die erfolgreiche Umsetzung der Transformation.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Roadmap des Fokusfeldes Wasserstoff verdeutlicht die zentrale Rolle von Wasserstoff für die Erreichung der Klimaneutralität in Schleswig-Holstein. Wasserstoff übernimmt dabei nicht nur eine Funktion als klimaneutraler Energieträger, sondern wirkt zugleich als Bindeglied zwischen erneuerbarer Stromerzeugung, industrieller Transformation, Energiespeicherung, Mobilität und internationalen Wertschöpfungsketten. Die identifizierten Transformationspfade zeigen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft weit über die Entwicklung einzelner Technologien hinausgeht und vielmehr einen langfristigen Prozess der Systemintegration, Infrastrukturentwicklung und gesellschaftlichen Transformation erfordert.

Besonders deutlich wird die Bedeutung des Zusammenspiels unterschiedlicher Entwicklungslinien. Die industrielle Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff, die Entwicklung maritimer Nutzungspfade, der Ausbau von Power-to-X-Technologien, die Bereitstellung leistungsfähiger Speicherslösungen sowie die systemdienliche Integration von Wasserstoff in das erneuerbare Energiesystem bilden gemeinsam die Grundlage für einen erfolgreichen Wasserstoffhochlauf. Erst das Zusammenwirken dieser Transformationspfade ermöglicht die Entwicklung eines resilienten, flexiblen und klimaneutralen Energiesystems, in dem Wasserstoff seine Funktion als Speicher-, Rohstoff- und Energieträger vollständig entfalten kann.

Die Roadmap macht zugleich deutlich, dass Energiewendeforschung eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Gestaltung dieses Transformationsprozesses bleibt. Forschung liefert nicht nur technologische Innovationen, sondern unterstützt auch die Bewertung von Systemwirkungen, die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle sowie die Einordnung wirtschaftlicher, regulatorischer und gesellschaftlicher Fragestellungen. Insbesondere Reallabore, Demonstrationsvorhaben und Experimentierräume bieten die Möglichkeit, wissenschaftliche Erkenntnisse in reale Anwendungen zu überführen und Transformationsprozesse unter Praxisbedingungen zu begleiten.

Diese Roadmap wurde durch die intensive Mitwirkung der Wasserstoffforschung in Schleswig-Holstein erarbeitet. Die Identifikation und Priorisierung der Forschungsbedarfe erfolgte im Rahmen eines mehrstufigen Beteiligungsprozesses unter Einbezug der Hochschulen und Forschungseinrichtungen des Landes. Ergänzend wurden bestehende Forschungsschwerpunkte und Publikationsaktivitäten analysiert, um die entwickelten Inhalte wissenschaftlich zu fundieren und bestehende Potenziale sichtbar zu machen. Die Roadmap schafft damit einen gemeinsamen Orientierungsrahmen für Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft und unterstützt die strategische Ausrichtung zukünftiger Forschungs-, Innovations- und Transformationsaktivitäten im Wasserstoffbereich.

Ausblick

In den kommenden Jahren wird entscheidend sein, den Übergang von Demonstration und Pilotierung hin zur großskaligen Umsetzung von Wasserstofftechnologien erfolgreich zu gestalten. Dabei rücken insbesondere Fragen der Systemintegration, Infrastrukturentwicklung, Skalierung industrieller Anwendungen sowie der sicheren und wirtschaftlichen Bereitstellung von Wasserstoff und seinen Derivaten in den Mittelpunkt. Gleichzeitig gewinnen die internationale Vernetzung von Wertschöpfungsketten, die Entwicklung resilienter Versorgungsstrukturen, robuster Lieferketten sowie die Integration des Wasserstoffsystems in ein zunehmend erneuerbar geprägtes Energiesystem weiter an Bedeutung.

Gelingt es, die Potenziale Schleswig-Holsteins bei erneuerbaren Energien, Häfen, Industrie und Wissenschaft konsequent miteinander zu verknüpfen, kann das Land seine Rolle als führender Wasserstoffstandort weiter ausbauen. Die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft wird dabei eine wesentliche Voraussetzung bleiben, um neue Erkenntnisse in Innovationen zu überführen, bestehende Herausforderungen zu adressieren und die Roadmap als dynamisches Instrument zur Begleitung des Transformationsprozesses kontinuierlich weiterzuentwickeln. Ein weiterer Schritt wird die Entwicklung einer systematischen Verknüpfung zwischen den Fokusfeld-Roadmaps und der übergeordneten Energiewendeforschungsroadmap sein, um die Beiträge der einzelnen Fokusfelder im Gesamtkontext der Energiewende transparent darzustellen.

Zugleich kann die Roadmap als Grundlage dienen, zukünftige Forschungs- und Förderaktivitäten gezielt an den langfristigen Anforderungen des Wasserstoffhochlaufs und der Klimaneutralität Schleswig-Holsteins auszurichten.

Weiteres Vorgehen

Für die Weiterentwicklung des vorliegenden Arbeitspapiers ist vorgesehen, die Verknüpfung zwischen der Energiewendeforschungs-Roadmap Schleswig-Holstein und den Fokusfeld-Roadmaps künftig noch stärker herauszuarbeiten. Während die vorliegende Fokusfeld-Roadmap bereits auf Vorarbeiten der übergeordneten Roadmap aufbaut, soll in einem nächsten Schritt auch die Integration der Ergebnisse der Fokusfeld-Roadmaps in die Energiewendeforschungs-Roadmap Schleswig-Holstein transparent dargestellt werden. Nach Umsetzung dieser rückwärtigen Integration werden sowohl ein eigenes Kapitel zur Verknüpfung mit der übergeordneten Roadmap als auch ergänzende Erläuterungen im Methodikteil aufgenommen.



Energiewendeforschungs-Roadmap für das Land Schleswig-Holstein

Wasserstoff

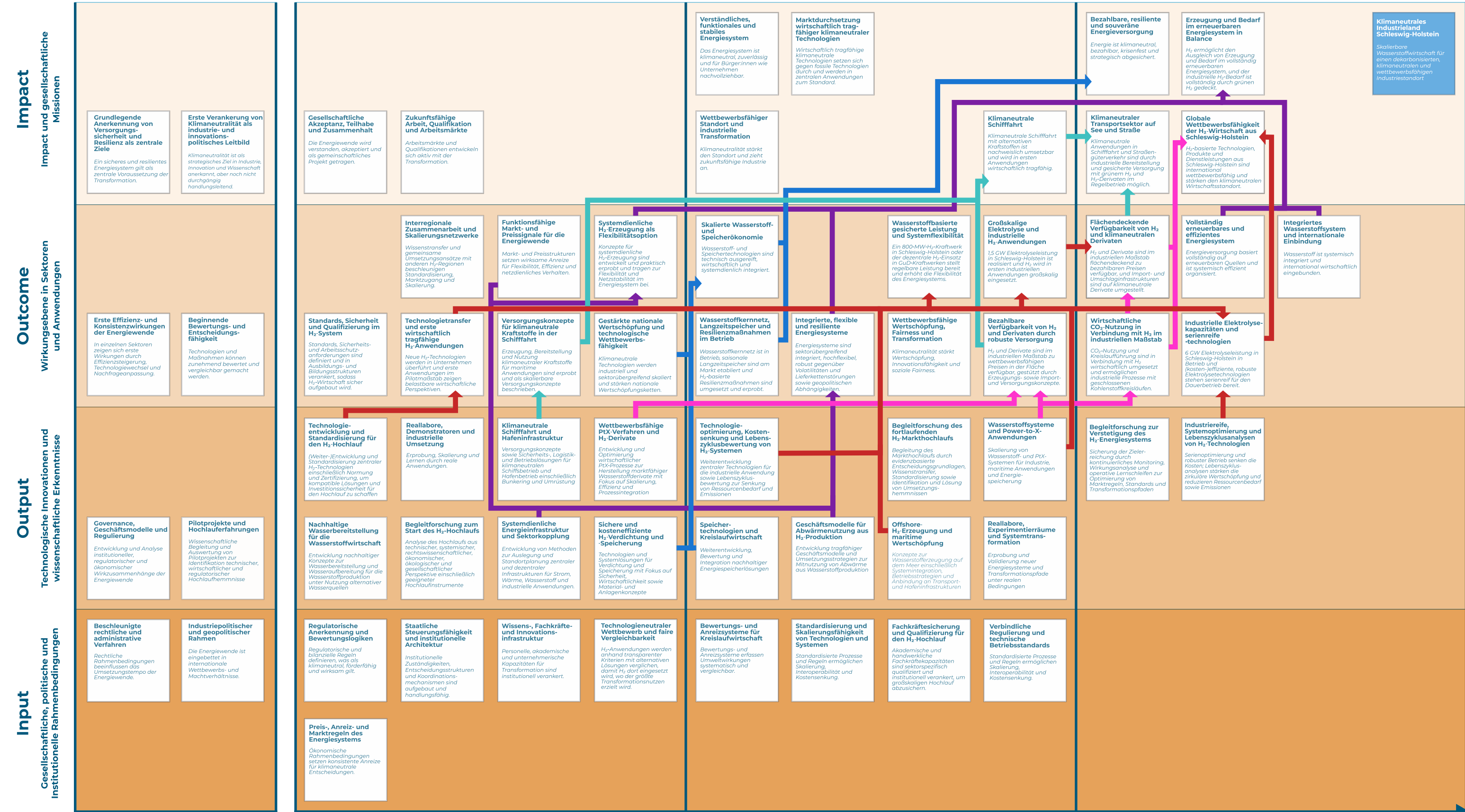
Stand: Juli 2026

Arbeitsdokument in Vorbereitung auf Gesamtversion
Stand September 2026

Landeskompetenzzentrum
Energiewendeforschung



Gesellschaft für
Energie und Klimaschutz
Schleswig-Holstein



Status quo

Hinweis: Innerhalb der Blöcke besteht keine zeitliche Reihenfolge.

heute

bis 2030

bis 2035

bis 2040

Industrielle Erzeugung & Anwendung von H₂

Maritime H₂ Anwendung

H₂ Methanisierung & PtX

H₂ Speicherung

Systemdienliche Integration von H₂ ins erneuerbare Energiesystem

Erstellt in Zusammenarbeit mit:



Gefördert durch:



Schleswig-Holstein
Ministerium für Allgemeine und Berufliche Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur