Arbeitspapier

Energiewendeforschungs-Roadmap

für das Land Schleswig-Holstein

Wind

Transformationspfade zur Klimaneutralität 2040

Stand 10/2026

Inhalt

1. Executive Summary 2
2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap 3
3. Methodik „Visual Roadmapping“ 4
   3.1. Die vier Dimensionsebenen 5
   3.2. Transformationspfade 6
   3.3. Verknüpfungspunkte 7
4. Die vier Dimensionsebenen des Fokusfeldes Wind 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 10
   4.4. Impact: Gesellschaftliche Ziele und langfristige Wirkungen 10
   4.5. Zusammenfassung der IOOI-Ebenen 11
5. Transformationspfade 12
   5.1. Optimierung der Windressourcen 13
   5.2. Entwicklung der Forschungsinfrastruktur 14
   5.3. Regulierung und Normen 15
   5.4. Kompetenzaufbau und Wissensintegration 16
   5.5. Integration von Energiesystemen 17
   5.6. Beteiligung und soziale Akzeptanz 18
6. Handlungsoptionen 19
7. Zusammenfassung und Ausblick 20

1. Executive Summary

Die Energiewendeforschungs-Roadmap für das Fokusfeld Wind beschreibt den Bei-trag 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 Roadmap basiert auf einer systemischen Erfassung der Forschungsaktivitäten zur Windenergie. Zur Strukturierung von Ressourcen, Aktivitäten, Ergebnissen und Wirkungen wurde die Methode IOOI (Input-Output-Outcome-Impact) eingesetzt, gestützt auf Visual Roadmapping und Backcasting. So lassen sich strategische Prioritäten ableiten und Maßnahmen gezielt ausrichten. Die Roadmap dient als Orientierungsrahmen für langfristige Entwicklungslinien. Zusätzlich wird die Forschung zur Kostensenkung als ein Aspekt von Interesse betrachtet, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie langfristig zu stärken.

In Schleswig-Holstein spielt die Windenergie eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung energieintensiver Anwendungen und bei der klimaneutralen Transformation des Strom- und Wärmesektors. Damit verbunden sind auch Umwelt- und Sozialeffekte des Ausbaus. Vor diesem Hintergrund basiert die Windenergieforschung auf dem Zusammenspiel von Energieinfrastruktur, Digitalisierung, Datenmanagement und Anlagenbetrieb. Ergänzend gewinnt die Frage an Bedeutung, wie Windenergie zur Stabilisierung des Energiesystems und zur Stärkung der Resilienz beitragen kann. Zentrale Forschungsfelder sind Aerodynamik, atmosphärische Strömungsprozesse und Nachlaufeffekte; ergänzt werden diese durch aeroelastische und aeroakustische Fragestellungen sowie modellbasierte Ansätze mit Simulation, digitalem Entwurf und prädiktiver Regelung.

Die Roadmap identifiziert sechs vorbildliche Transformationspfade als zentrale Entwicklungsachsen auf dem Weg zu einer klimaneutralen windkraftbasierten Wirtschaft: Optimierung der Windressourcen, Entwicklung der Forschungsinfrastruktur, Regulierung und Normen, Kompetenzaufbau und Wissensintegration, Integration in Energiesysteme sowie Beteiligung der Gesellschaft und soziale Akzeptanz.

Die Roadmap dient zugleich als Grundlage für die strategische Ausrichtung der Forschung zur Energiewende sowie für die Entwicklung von Fördermaßnahmen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene. Da es sich um ein iteratives Instrument handelt, kann es kontinuierlich aktualisiert und an neue wissenschaftliche, technologische und gesellschaftliche Entwicklungen angepasst werden. So bleibt sie anschlussfähig an aktuelle politische und wirtschaftliche Zielsetzungen.

2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap

Das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung bei der EKSH hat unter Einbindung der Hochschulen des Landes eine Roadmap für das Fokusfeld Wind entwickelt, um Forschungs- und Entwicklungsbedarfe systematisch zu erfassen und in einen langfristigen Transformationskontext einzuordnen. Der interdisziplinäre Prozess umfasste technische Fragestellungen aus den Bereichen Strömungs- und Strukturmechanik, Materialwissenschaften, Geomechanik, Elektrotechnik, Netzstabilität, Fertigung, Logistik, Monitoring, Komponentenverfügbarkeit, Lieferketten und technisches Projektmanagement sowie systemische, umweltbezogene und gesellschaftliche Aspekte. Zusätzlich wurden Sektorkopplung, Speichertechnologien, hybride Energieparks, Repowering und die Verlängerung der Lebensdauer von Windenergieanlagen berücksichtigt.

Schleswig-Holstein verfolgt das Ziel, bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen und sich gleichzeitig als international wettbewerbsfähiger Industriestandort zu etablieren. Mit dem Modell „klimaneutralen Industrielandes 2040“ definiert das Land eine langfristige Transformationsperspektive, in der die Windenergie als eines der zentralen Elemente für die Dekarbonisierung des Energiesystems 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 festlegt.

Ausgangspunkt der Roadmap war die gemeinsame Identifikation relevanter Themenfelder für die Windenergie. Die „Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Hochschulsystems des Landes Schleswig-Holstein“ des Wissenschaftsrates vom Oktober 2023 dienten dabei als Grundlage und wurden bei der Analyse berücksichtigt. Dabei rückten insbesondere die Verknüpfung von Forschung, Qualifizierung und Transfer sowie die Einbindung übergreifender Zukunftsaspekte in den Fokus. Hierzu zählen beispielsweise Systemintegration, Daten- und Betriebsprozesse sowie die Berücksichtigung von Umwelt- und Sozialwirkungen.

Der Entwicklungsprozess begann im Juli 2025 mit einem Forschungsdialog, in dem zentrale Themenfelder, Herausforderungen und Entwicklungsperspektiven der Windenergieforschung identifiziert wurden. In weiteren Arbeitsformaten, darunter vertiefende Workshops und fachliche Abstimmungen, wurden diese Inhalte schrittweise konkretisiert, erweitert und miteinander verknüpft. Die Weiterentwicklung der Inhalte erfolgte dabei nicht linear, sondern in einem iterativen Prozess, in dem neue Erkenntnisse aufgenommen, bestehende Perspektiven hinterfragt und in konsistente Entwicklungslinien überführt wurden.

Im März 2026 fand am Wind Energy Technology Institute (WETI) der Hochschule Flensburg ein Workshop statt, der sich explizit mit den methodischen Grundlagen des Visual Roadmapping und insbesondere der vom Institut für Innovation und Technik (iit) entwickelten IOOI-Logik befasste. Die dort erarbeiteten Zusammenhänge, Priorisierungen und zeitlichen Entwicklungsperspektiven bildeten die Grundlage für die Strukturierung der Roadmap sowie die Ausarbeitung der Transformationspfade.

Ein wichtiger Bestandteil dieses Prozesses war die Auseinandersetzung mit den Wechselwirkungen zwischen technologischen Innovationen, regulatorischen

Rahmenbedingungen und infrastrukturellen Voraussetzungen. Windenergie wurde dabei nicht isoliert als Einzeltechnologie betrachtet, sondern im Kontext eines integrierten Energiesystems analysiert. Fragen der Netzintegration, Systemstabilität, Speicherung sowie der internationalen Vernetzung von Forschungsaktivitäten spielten dabei eine ebenso wichtige Rolle wie Aspekte der Flächennutzung und gesellschaftlichen Einbindung.

Das vorliegende Dokument ist das Ergebnis eines wissenschaftlich geprägten und partizipativen Entwicklungsprozesses. Es bündelt die Perspektiven der beteiligten Forschenden und übersetzt diese in strukturierte Transformationspfade, die als Orientierung für Forschungs- und Innovationsaktivitäten dienen. Gleichzeitig bietet die Roadmap eine Grundlage für die strategische Ausrichtung von Förderprogrammen auf Landes-, Bundes- und europäischer Ebene, indem sie zentrale Bedarfe und Entwicklungspotenziale transparent macht.

Darüber hinaus trägt die Roadmap dazu bei, die Rolle Schleswig-Holsteins als führenden Standort für Windenergieforschung weiter zu stärken. Durch die Verknüpfung von wissenschaftlicher Exzellenz, infrastrukturellen Voraussetzungen und praxisnaher Anwendung kann das Land seine Position im nationalen und internationalen Kontext ausbauen. Die vorhandene Forschungslandschaft, etablierte Test- und Demonstrationsinfrastrukturen sowie die enge Vernetzung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bilden hierfür wichtige Voraussetzungen.

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.

In der in diesem Kontext verwendeten Methodik des „Visual Roadmapping“ wurden zwei komplementäre Perspektiven eingesetzt. Die eine ging vom zukünftigen Ziel aus und arbeitete rückwärts, um die erforderlichen Schritte zu bestimmen. Die andere ordnete und visualisierte zeitlich die relevanten Zusammenhänge und zentralen Meilensteine. Diese Perspektiven sind Backcasting und Roadmapping:

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

Von 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 angeben.

3.1. Die vier Dimensionsebenen

Die Roadmap wird entlang einer Zeitachse von 2025 bis 2040 entwickelt. Vertikal gliedert sie den Transformationsprozess in vier miteinander verknüpfte Dimensionsebenen, die sowohl den Forschungsprozess als auch die langfristige Entwicklung des Energiesystems abbilden. Durch diese Struktur wird nachvollziehbar, wie wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Innovationen entstehen, in die Anwendung überführt werden und schließlich zu langfristigen Wirkungen für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft beitragen.

Die vier Ebenen folgen der Logik von Input, Output, Outcome und Impact (IOOI). Sie dienen dazu, komplexe Zusammenhänge systematisch zu strukturieren und unterschiedliche Entwicklungsbeiträge innerhalb eines gemeinsamen methodischen Rahmens einzuordnen. Die IOOI-Logik wird dabei nicht als lineare Ursache-Wirkungs-Kette verstanden, sondern als analytisches Instrument, um Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Entwicklungsschritte innerhalb des Transformationsprozesses sichtbar zu machen.

Input
Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die Input-Ebene umfasst die Voraussetzungen und Rahmenbedingungen, die Forschung, Innovation und Transformation ermöglichen oder beeinflussen. Hierzu zählen politische und regulatorische Rahmenbedingungen, Förderstrukturen, institutionelle Kapazitäten, Bildungs- und Qualifizierungsangebote sowie verfügbare Infrastrukturen.

Methodisch dient diese Ebene dazu, diejenigen Faktoren sichtbar zu machen, die vor Beginn konkreter Entwicklungen vorhanden sein oder geschaffen werden müssen. Sie beschreibt damit die Ausgangsbedingungen, auf denen weitere Forschungs- und Innovationsaktivitäten aufbauen.

Output
Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse

Die Output-Ebene erfasst die unmittelbaren Ergebnisse von Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten. Hierzu gehören beispielsweise neue Methoden, technische Konzepte, wissenschaftliche Erkenntnisse, Werkzeuge, Demonstratoren oder Bewertungsansätze.

Sie macht sichtbar, welche Beiträge Forschung und Entwicklung zur Transformation leisten und welche Ergebnisse erforderlich sind, um spätere Veränderungen in Systemen, Organisationen und Anwendungsfeldern zu ermöglichen.

Outcome
Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen

Die Outcome-Ebene beschreibt die Anwendung und Nutzung der zuvor entstandenen Outputs. Im Mittelpunkt stehen Veränderungen in Prozessen, Praktiken, Strukturen oder technischen Systemen, die durch wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen unterstützt werden.

Sie bildet die Verbindung zwischen Forschungsergebnissen und ihrer praktischen Wirksamkeit und zeigt auf, wie Innovationen in reale Anwendungszusammenhänge überführt werden.

Impact
Impact und gesellschaftliche Missionen

Die Impact-Ebene umfasst die langfristigen Wirkungen der Transformation auf gesellschaftlicher, wirtschaftlicher, ökologischer oder systemischer Ebene. Sie beschreibt die übergeordneten Zielzustände, zu deren Erreichung verschiedene Entwicklungen beitragen.

Im Kontext der Roadmap bildet sie den langfristigen Orientierungshorizont. Dadurch wird sichtbar, welchen Beitrag einzelne Forschungsthemen und Entwicklungsschritte zu übergeordneten energie- und klimapolitischen Zielsetzungen leisten können.

3.2. Transformationspfade

Im Rahmen des Roadmapping-Prozesses identifizierten die Forschenden sowie die Koordinatorinnen und Koordinatoren des Fokusfeldes Wind zentrale Transformationspfade, die aufzeigen, wie wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Innovationen und systemische Entwicklungen schrittweise zur Weiterentwicklung der Windenergie und zur Erreichung der Klimaneutralität in Schleswig-Holstein bis zum Jahr 2040 beitragen können.

Die Transformationspfade strukturieren die komplexe Gesamtentwicklung in nachvollziehbare, zeitlich und inhaltlich miteinander verknüpfte Entwicklungslinien und verdeutlichen das Zusammenspiel technologischer, infrastruktureller, regulatorischer und gesellschaftlicher Veränderungen.

Die Transformationspfade dienen dabei nicht als detaillierte Umsetzungspläne. Vielmehr beschreiben sie zentrale Entwicklungsrichtungen, entlang derer Forschung und Innovation einen wesentlichen Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten können. Sie schaffen eine gemeinsame Orientierung darüber, welche Voraussetzungen geschaffen, welche Erkenntnisse gewonnen und welche Anwendungen entwickelt werden müssen, um die langfristigen Zielsetzungen der Energiewende zu erreichen.

Methodisch bilden die Transformationspfade die Verbindung zwischen den Dimensionsebenen Input, Output, Outcome und Impact. Sie ermöglichen es, Entwicklungslinien von grundlegenden Rahmenbedingungen über wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Innovationen bis hin zu Anwendungen und langfristigen Wirkungen systematisch darzustellen. Gleichzeitig machen sie zeitliche Abhängigkeiten, Wechselwirkungen und kritische Entwicklungsschritte innerhalb des Transformationsprozesses sichtbar.

Die entwickelten Transformationspfade sind bewusst nicht als vollständige Darstellung aller Forschungs- und Innovationsbedarfe im Bereich der Windenergie zu verstehen. Vielmehr identifizieren sie jene Entwicklungslinien, die im Rahmen des partizipativen Roadmapping-Prozesses als besonders relevant für die langfristige Entwicklung des Fokusfeldes Wind bewertet wurden. Sie dienen damit als Orientierung für zukünftige Forschungsaktivitäten und unterstützen die strategische Einordnung von Innovations- und Transformationsprozessen in Schleswig-Holstein.

3.3. Verknüpfungspunkte

Die Verknüpfungspunkte werden im Rahmen des Verfahrens „Allgemeine Energiewendeforschungs-Roadmap für das Land Schleswig-Holstein“ identifiziert. Dieses Vorgehen bildet den Ausgangspunkt für die anschließende Übertragung der Methodik auf die jeweiligen Fokusfelder. In Anlehnung an die methodischen Leitlinien des Roadmappings und als Bestandteil einer „erfolgreichen Strategieentwicklung“ stützt sich das Verfahren auf die Delphi-Methode: Sie ermöglicht die Strukturierung der Arbeit in Diskussionsrunden mit sachkundigen Akteurinnen und Akteuren unter der Anwendung zuvor festgelegter Analyse- und Auswertungsmaßstäbe sowie Regelwerke und reduziert dadurch die Einflussnahme von Einzelerwägungen durch die systematische Einbindung von Expertenbeiträgen.

Aus einer bottom-up-Perspektive heraus entsteht die allgemeine Roadmap, und damit der weitere Verlauf des Roadmappings, in einem partizipativen Prozess. In einer ersten Runde artikulierten die jeweils verantwortlichen Akteure die Themen. Anschließend wurde ein Kreis von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als Expertinnen und Experten eingeladen, am ersten Workshop mitzuwirken. Dadurch konnte ein erster Einblick sowohl in die Themen als auch in die zugrunde liegende Logik der Methodik (IOOI-Prozesslogik) sichergestellt werden.

Inhaltlich sind die Verknüpfungspunkte als thematische Anschlussstellen zwischen der allgemeinen Roadmap und den einzelnen Fokusfeldern zu verstehen. Ihre Aufgabe besteht darin, die in der übergeordneten Ebene definierten Forschungsprioritäten mit den auf einer zweiten Akteursrunde erarbeiteten Entwicklungspfaden inhaltlich kohärent zu verbinden. Die Verknüpfungspunkte wurden auf Output-Ebene festgelegt, ausgehend von der „Grafik der allgemeinen Roadmap".

Folglich werden die Verknüpfungspunkte nicht unabhängig voneinander für jedes Fokusfeld konstruiert, sondern aus den thematischen Bereichen abgeleitet, die auf Basis der allgemeinen Roadmap identifiziert wurden. In der nachfolgenden Phase dienen diese thematischen Bereiche innerhalb jedes Fokusfeldes als analytische Referenzen, um die Konkretisierung neuer Beiträge sowie die Diskussion zu strukturieren und zu steuern. Zugleich wird durch die Überführung in die deliberative Arbeit der Fokusfelder vermieden, dass die Bereiche als starre oder vorab festgelegte Interpretationskategorien wirken. Ihr Inhalt kann im Austausch mit den Teilnehmenden des jeweiligen Niveaus geprüft, gegengeprüft und angepasst werden, dabei bleibt die Logik des Aufbaus durch Konsens und kontextbezogene Weiterentwicklung erhalten. Wenn im zweiten Niveau aus begründeten Gründen festgestellt wird, dass eine definierte Eingabe nicht in das Schema des Fokusfeldes passt, wird diese Eingabe nicht übernommen.

Methodisch werden die Verknüpfungspunkte, in ähnlicher Weise wie das Roadmapping insgesamt, als Instrument der Orientierung und Strukturierung des Dialogs verstanden, nicht als normierender Mechanismus und auch nicht als deterministisches Ergebnis. In diesem Sinne fungieren sie als „Anker"-Elemente, die die Kohärenz zwischen den Runden unterstützen, ohne den revidierbaren Charakter des Verfahrens zu ersetzen: Die Verknüpfungspunkte können im Rahmen des nachvollziehbaren deliberativen Vorgehens diskutiert, präzisiert und bei Bedarf angepasst oder modifiziert werden.

4. Die vier Dimensionsebenen des Fokusfeldes Wind

Die Roadmap beschreibt die Entwicklung des Fokusfeldes Wind entlang einer Zeitachse bis zum Jahr 2040. Zur Strukturierung der identifizierten Entwicklungen werden die Inhalte den vier Dimensionsebenen Input, Output, Outcome und Impact zugeordnet. Auf diese Weise wird sichtbar, wie Rahmenbedingungen, Forschung, technologische Innovationen und deren Anwendung zusammenwirken und langfristige Wirkungen im Energiesystem entfalten können.

4.1. Input: Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die Input-Ebene beschreibt die grundlegenden Voraussetzungen, die für die Weiterentwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein geschaffen oder langfristig gesichert werden müssen. Sie umfasst politische, institutionelle, infrastrukturelle und gesellschaftliche Rahmenbedingungen, die Forschungs- und Innovationsprozesse ermöglichen und deren Umsetzung unterstützen.

Die Input-Ebene verdeutlicht, dass die Transformation des Energiesystems nicht allein von technologischen Innovationen abhängt, sondern gleichermaßen von geeigneten

institutionellen, regulatorischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen getragen werden muss.

Heute bis 2025 (Fokus auf institutionelle und finanzielle Grundlagen):

- Effiziente Förderstrukturen unterstützen Forschung und Entwicklung.
- Langfristige Planbarkeit stärkt die Sicherung wissenschaftlicher Kompetenzen.
- Attraktive Forschungs- und Arbeitsbedingungen fördern die Gewinnung und Bindung qualifizierter Fachkräfte.

2025 bis 2030 (Fokus auf regulatorische und gesellschaftliche Voraussetzungen):

- Verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen schaffen Planungssicherheit für Investitionen in Windenergie und Power-to-X.
- Politische Instrumente unterstützen den Ausbau erneuerbarer Energien.
- Bildung, Qualifizierung und internationale Fachkräfteeinbindung werden gestärkt.
- Der gesellschaftliche Dialog zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Öffentlichkeit wird intensiviert.

2030 bis 2035 (Fokus auf Systemintegration und Infrastruktur):

- Intelligente Steuerungs- und Regelungskonzepte unterstützen die Integration erneuerbarer Energien.
- Forschungsinfrastrukturen werden gezielt weiterentwickelt.
- Testfelder und Versuchseinrichtungen schaffen Voraussetzungen für die Erprobung neuer Technologien unter realen Bedingungen (u.a. Reallabore).

4.2. Output: Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse

Die Output-Ebene umfasst die wissenschaftlichen Erkenntnisse, technologischen Entwicklungen und methodischen Ansätze, die im Rahmen der Windenergieforschung entstehen und die Grundlage für die weitere Transformation des Energiesystems bilden. Sie beschreibt jene Ergebnisse, die aus Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten hervorgehen und in späteren Entwicklungsstufen in Anwendungen und Systemlösungen überführt werden können.

Die Output-Ebene bildet das Bindeglied zwischen wissenschaftlicher Forschung, technologischer Entwicklung und deren zukünftiger Anwendung im Energiesystem.

Heute bis 2030 (Fokus auf wissenschaftliche Grundlagen und Technologieentwicklung):

- Analyse und Weiterentwicklung von Energiesystemen, Netzen und Infrastrukturen.
- Entwicklung regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmenkonzepte.
- Verbesserung der Betriebsführung von Windenergieanlagen durch digitale Methoden.
- Weiterentwicklung von Sektorkopplung, Netzanschlüssen und Speicherintegration.
- Entwicklung nachhaltiger Materialien sowie Lebenszyklus- und Rückbaukonzepte.

2030 bis 2035 (Fokus auf Innovation und Demonstration):

- Untersuchung von Strömungs- und Wake-Effekten.

- Optimierung von Struktur- und Lastverhalten.
- Entwicklung innovativer Windenergieanlagen mit verbesserten aerodynamischen, strukturellen und digitalen Betriebs- und Regelungskonzepten.
- Weiterentwicklung hybrider Energieinfrastrukturen.
- Entwicklung von nachhaltigen Komponenten für Windenergieanlagen
- Nutzung von Reallaboren und Experimentierräumen zur Validierung neuer Technologien.

2035 bis 2040 (Fokus auf hochintegrierte Lösungen):

- Intelligente Anlagensteuerungen und datenbasierte Betriebsoptimierung.
- Nachhaltige Materialien und Kreislaufansätze.
- Weiterentwicklung von Wissenstransfer- und Kooperationsstrukturen.
- Integration von Forschungsergebnissen in industrielle Anwendungen.

4.3. Outcome: Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen

Die Outcome-Ebene beschreibt die schrittweise Anwendung und Umsetzung der entwickelten Erkenntnisse, Technologien und Konzepte im Energiesystem. Sie verdeutlicht, wie wissenschaftliche Ergebnisse in betriebliche, infrastrukturelle und gesellschaftliche Veränderungen überführt werden und damit konkrete Beiträge zur Transformation leisten.

Sie macht sichtbar, wie aus wissenschaftlichen Erkenntnissen konkrete Veränderungen in Energiesystemen, Infrastrukturen und Anwendungsbereichen entstehen.

Heute bis 2030 (Fokus auf erste Anwendungen und Systemwirkungen):

- Etablierung stabiler Finanzierungs- und Betriebsmodelle.
- Optimierung von Netzanschlüssen und Netzintegration.
- Entwicklung intelligenter Regelungs- und Betriebsstrategien.
- Ausbau von Beteiligungsprozessen und gesellschaftlicher Akzeptanz.

2030 bis 2035 (Fokus auf Integration und Skalierung):

- Koordinierte Integration von Windenergie, Speichern und Netzinfrastruktur.
- Systematische Berücksichtigung von Lastflexibilität und Speicherbedarf.
- Verbesserte Betriebsführung durch datenbasierte Parkregelungen.
- Etablierung Schleswig-Holsteins als Modellregion für innovative Energiekonzepte.

2035 bis 2040 (Fokus auf integrierte Energiesysteme):

- Adaptive regulatorische und betriebliche Ansätze unterstützen neue Technologien.
- Nachhaltige Offshore-Konzepte verbinden technische, wirtschaftliche und ökologische Anforderungen.
- Forschungs- und Teststrukturen werden dauerhaft in Innovationsprozesse integriert.

4.4. Impact: Gesellschaftliche Ziele und langfristige Wirkungen

Die Impact-Ebene beschreibt die langfristigen Wirkungen, die durch das Zusammenwirken aller Entwicklungen bis zum Jahr 2040 erreicht werden können. Sie stellt die

übergeordneten Zielbilder der Transformation dar und verdeutlicht, welchen Beitrag die Windenergie zur zukünftigen Entwicklung Schleswig-Holsteins leisten kann.

Die Impact-Ebene bildet den langfristigen Orientierungshorizont der Roadmap und zeigt die angestrebten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Wirkungen der Transformation.

Heute bis 2030 (Fokus auf erste gesellschaftliche und wirtschaftliche Wirkungen):

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Windenergie.
- Ausbau internationaler Kompetenznetzwerke.
- Zunehmende gesellschaftliche Akzeptanz von Windenergieprojekten.
- Stärkung technologischer Wettbewerbsfähigkeit durch Digitalisierung und Innovation.

2030 bis 2035 (Fokus auf wirtschaftliche und systemische Stabilisierung):

- Höhere Effizienz und Lebensdauer von Windenergieanlagen.
- Sicherung von Arbeitsplätzen und wissenschaftlicher Kompetenz.
- Ausbau industrieller Wertschöpfung.
- Verbesserte lokale Systemintegration und Versorgungssicherheit.

2035 bis 2040 (Fokus auf langfristige Zielerreichung):

- Effiziente Nutzung der verfügbaren Windressourcen.
- Etablierung einer klimaneutralen Windindustrie.
- Sichere, resiliente und bezahlbare Energieversorgung.
- Stärkung der europäischen Energieunabhängigkeit auf Basis erneuerbarer Energien.

Die langfristigen Wirkungen entstehen nicht durch einzelne Technologien, sondern aus dem Zusammenspiel von Forschung, Innovation, Infrastrukturentwicklung, Regulierung und gesellschaftlicher Mitwirkung.

4.5. Zusammenfassung der IOOI-Ebenen

Die Entwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein folgt einer schrittweisen Transformation entlang der IOOI-Logik (Input-Output-Outcome-Impact). Die Roadmap beschreibt dabei den Weg von gesellschaftlichen, regulatorischen und infrastrukturellen Voraussetzungen über wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Innovationen bis hin zur Integration in das Energiesystem und den langfristigen Wirkungen auf Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Phase 1: Aufbau von Rahmenbedingungen und Wissensbasis (bis ca. 2030)

Im Mittelpunkt stehen der Aufbau geeigneter Rahmenbedingungen sowie die Weiterentwicklung wissenschaftlicher und technologischer Grundlagen. Forschungsschwerpunkte liegen insbesondere in den Bereichen Energiesysteme, Digitalisierung, Anlagenentwicklung, Netzintegration sowie regulatorische und infrastrukturelle Voraussetzungen. Parallel dazu werden Kompetenzen, Forschungsstrukturen und internationale Netzwerke weiter gestärkt.

Phase 2: Integration, Skalierung und Systementwicklung (2030 bis 2035)

In dieser Phase rücken die Anwendung und Integration der entwickelten Technologien in den Vordergrund. Windenergie wird zunehmend mit Speichertechnologien, Netzinfrastrukturen und Power-to-X-Anwendungen gekoppelt. Reallabore und Demonstrationsvorhaben unterstützen die Validierung neuer Konzepte unter realen Bedingungen. Gleichzeitig entwickeln sich intelligente Betriebsstrategien, datenbasierte Regelungssysteme sowie neue Offshore- und hybride Energiesysteme weiter.

Phase 3: Konsolidierung und langfristige Wirkung (2035 bis 2040)

In der letzten Phase stehen die langfristigen Wirkungen der Transformation im Fokus. Die Windenergie ist umfassend in ein vernetztes und flexibles Energiesystem integriert. Eine effiziente Nutzung der Windressourcen, eine sichere und bezahlbare Energieversorgung, klimaneutrale industrielle Wertschöpfung sowie ein hoher Grad an Systemintegration prägen diese Phase. Schleswig-Holstein etabliert sich dabei als international sichtbarer Innovations- und Forschungsstandort für Windenergie und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Klimaneutralität und Versorgungssicherheit.

5. Transformationspfade

Die übergreifende Roadmap identifiziert zentrale Transformationspfade, die beschreiben, wie sich die Windenergie in Schleswig-Holstein im Zeitraum bis 2040 weiterentwickeln muss, um ihre Rolle innerhalb eines integrierten und klimaneutralen Energiesystems zu erfüllen. Diese Transformationspfade strukturieren die komplexe Dynamik technologischer, infrastruktureller und gesellschaftlicher Entwicklungen und ermöglichen eine systematische Einordnung der notwendigen Fortschritte in Forschung und Anwendung.

Im Fokus steht dabei ein ganzheitliches Verständnis der Windenergie, das physikalische Grundlagen, technologische Innovationen und systemische Integration gleichermaßen berücksichtigt. Fortschritte in der Rotorblattaerodynamik, im Verständnis von Strömungsprozessen und Parkdynamiken sowie in der multiphysikalischen Modellierung bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung von Windenergieanlagen und deren Betrieb. Gleichzeitig tragen Entwicklungen in der Digitalisierung, insbesondere im Bereich der künstlichen Intelligenz, datenbasierten Analyseverfahren, Zustandsüberwachung und prädiktiven Regelung, dazu bei, die Effizienz und Zuverlässigkeit der Systeme kontinuierlich zu verbessern.

Die Transformationspfade werden dabei nicht isoliert betrachtet, sondern als miteinander verbundene Entwicklungslinien, in denen technische Fragestellungen, infrastrukturelle Anforderungen und gesellschaftliche Rahmenbedingungen eng ineinandergreifen. Themen wie Netzintegration, Sektorenkopplung, Speichertechnologien sowie Umwelt- und Akzeptanzaspekte bilden zentrale Bezugspunkte, die in den einzelnen Pfaden unterschiedlich gewichtet werden. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben diese Transformationspfade im Detail und verdeutlichen deren jeweilige Beiträge zur Weiterentwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein.

5.1. Optimierung der Windressourcen

Eine effiziente und systemgerechte Nutzung der verfügbaren Windressourcen entsteht durch ein vertieftes Verständnis von Strömungsprozessen, innovative Anlagentechnologien und eine intelligente Integration der Windenergie in das zukünftige Energiesystem. Dabei gewinnen sowohl die Optimierung bestehender Windenergieanlagen als auch die Erschließung neuer Effizienzpotenziale durch Digitalisierung, datenbasierte Betriebsstrategien und die Verknüpfung mit weiteren Energiesystemkomponenten zunehmend an Bedeutung.

Der Transformationspfad „Optimierung der Windressourcen“ adressiert die wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen für die effiziente Nutzung des Windpotenzials in Schleswig-Holstein. Aufgrund der ausgeprägten Onshore- und Offshore-Windressourcen spielen die Erfassung und Analyse von Strömungsprozessen, Wake-Effekten und Parkdynamiken eine zentrale Rolle. Gleichzeitig gewinnen datenbasierte Betriebsstrategien, adaptive Regelungsverfahren und intelligente Steuerungskonzepte an Bedeutung.

Die Weiterentwicklung der Windenergienutzung erfolgt dabei nicht isoliert auf Anlagenebene, sondern im Zusammenspiel mit Netzstrukturen, Speichertechnologien und Anforderungen eines zunehmend integrierten Energiesystems. Forschung trägt dazu bei, Ertragspotenziale besser zu erschließen, Belastungen zu reduzieren und die Systemdienlichkeit von Windenergieanlagen weiter zu erhöhen.

Im Zeitraum 2025–2030 bilden verbesserte Analyse- und Modellierungsansätze die Grundlage für die Weiterentwicklung. Dazu zählen insbesondere Fortschritte in der Erfassung aerodynamischer Effekte sowie erste Anwendungen datenbasierter Verfahren und Methoden der Datenfusion zur Beschreibung von Anlagen- und Parkverhalten.

Darauf aufbauend entstehen im Zeitraum 2030–2035 zentrale Outputs. Diese umfassen eine präzisere Analyse von Strömungs- und Wake-Effekten sowie die Weiterentwicklung innovativer Windenergieanlagentechnologien mit Sensorik, KI-gestützter Auswertung, Datenfusion und adaptiven Regelungsansätzen. Parallel dazu werden Konzepte zur Netzintegration weiterentwickelt, insbesondere durch die Kombination von Windenergieanlagen mit Speichersystemen und geeigneten Netzstrukturen.

Diese Entwicklungen führen im gleichen Zeitraum zu Outcomes auf Betriebsebene. Verbesserte Betriebsstrategien und datenbasierte Parkregelungen ermöglichen eine effizientere Nutzung vorhandener Windressourcen. Im Offshore-Kontext werden zudem Ansätze für eine nachhaltige Gestaltung von Windparks weiterentwickelt, die Aspekte wie standardisierte Rückbauprozesse und multifunktionale Nutzung berücksichtigen (hybride Energieparks).

In der längerfristigen Perspektive bis 2035–2040 ergibt sich daraus ein Impact in Form einer deutlich gesteigerten Effizienz der Windenergienutzung. Die Energieerzeugung kann gezielter gesteuert werden, während Windenergieanlagen zunehmend zur Stabilisierung

des Energiesystems beitragen und in ein integriertes Gesamtgefüge aus Netz, Speicherung und Nutzung eingebunden sind.

5.2. Entwicklung der Forschungsinfrastruktur

Eine leistungsfähige Windenergieforschung erfordert moderne Forschungsinfrastrukturen, die experimentelle Untersuchungen, digitale Modellierung und praxisnahe Erprobung miteinander verbinden. Nur durch die enge Verknüpfung von Testfeldern, Laboren, Demonstrationsanlagen und datengetriebenen Forschungsumgebungen können neue Technologien entwickelt, validiert und effizient in die praktische Anwendung überführt werden.

Der Transformationspfad „Entwicklung der Forschungsinfrastruktur“ beschreibt den kontinuierlichen Ausbau wissenschaftlicher und technischer Kapazitäten für die Windenergieforschung in Schleswig-Holstein. Neben physischen Infrastrukturen wie Testfeldern, Laboren und Versuchsanlagen umfasst dies digitale Forschungsumgebungen, Simulationsplattformen und Dateninfrastrukturen.

Durch die Verknüpfung von experimenteller Forschung, numerischer Modellierung und industrieller Anwendung entstehen Voraussetzungen für die Untersuchung komplexer Fragestellungen und die Validierung neuer Technologien. Gleichzeitig stärkt die Forschungsinfrastruktur die internationale Sichtbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Forschungsstandorts Schleswig-Holstein.

Im Zeitraum bis 2025 bilden institutionelle und finanzielle Rahmenbedingungen die Ausgangsbasis. Dazu zählen insbesondere eine koordinierte und effiziente Fördermittelstruktur sowie langfristige Planbarkeit zur Sicherung wissenschaftlicher Kapazitäten und Kompetenzen.

Darauf aufbauend werden im Zeitraum 2025–2030 Forschungsaktivitäten und Infrastrukturen gezielt ausgebaut. Die Verfügbarkeit geeigneter Versuchseinrichtungen sowie der Zugang zu Daten- und Simulationsumgebungen ermöglichen es, komplexe Fragestellungen, etwa im Bereich der Strömungsmodellierung, Materialprüfung oder Betriebsanalyse, systematisch zu bearbeiten.

Im Zeitraum 2030–2035 entstehen daraus Outputs in Form von Reallaboren und Experimentierräumen, in denen neue Technologien und Systemkonzepte unter realen Bedingungen validiert werden. Diese Umgebungen erlauben eine enge Verzahnung von Simulation, Messung und Anwendung und schaffen die Grundlage für die Weiterentwicklung datenbasierter Modelle sowie prädiktiver Betriebsstrategien.

Darauf aufbauend entwickelt sich im Zeitraum 2035–2040 eine stärker integrierte Forschungslandschaft, in der Wissenstransfer und Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie weiter intensiviert werden. Es entstehen strukturierte Forschungsnetzwerke und spezialisierte Kompetenzzentren, die die Weiterentwicklung von Technologien koordinieren und deren Anwendung fördern.

Diese Entwicklungen führen langfristig zu Outcomes und Impacts in Form eines gestärkten Innovationsstandorts Schleswig-Holstein. Die internationale Sichtbarkeit der Windenergieforschung wird erhöht, qualifiziertes Personal kann langfristig gebunden werden und die Voraussetzungen für industrielle Ansiedlung und technologische Skalierung werden verbessert.

5.3. Regulierung und Normen

Verlässliche und adaptive regulatorische Rahmenbedingungen unterstützen die Integration neuer Technologien, schaffen Planungssicherheit und ermöglichen die langfristige Transformation eines klimaneutralen Energiesystems. Gleichzeitig bilden technische Standards, Marktmechanismen und institutionelle Strukturen die Grundlage, um Innovationen in die Praxis zu überführen, Investitionen zu fördern und die Weiterentwicklung der Windenergie nachhaltig abzusichern.

Der Transformationspfad „Regulierung und Normen“ adressiert die wissenschaftlichen und analytischen Grundlagen für die Weiterentwicklung rechtlicher, institutioneller und marktbezogener Rahmenbedingungen im Bereich der Windenergie. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie regulatorische Instrumente, technische Standards und Marktmechanismen die Integration neuer Technologien, Betriebskonzepte und sektorenübergreifender Anwendungen unterstützen können. Angesichts der zunehmenden Komplexität von Energiesystemen gewinnen evidenzbasierte Bewertungsansätze und systemische Analysen an Bedeutung, um zukünftige Entwicklungen wissenschaftlich zu begleiten.

Darüber hinaus betrachtet dieser Transformationspfad die Wechselwirkungen zwischen technologischer Innovation und regulatorischer Gestaltung. Forschung kann hierzu beitragen, die Auswirkungen verschiedener Steuerungsinstrumente zu bewerten, Handlungsspielräume aufzuzeigen und die Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen an neue technische und wirtschaftliche Entwicklungen zu unterstützen.

Im Zeitraum 2025–2030 bilden stabile rechtliche Rahmenbedingungen die Grundlage für die weitere Entwicklung. Forschung und Analyse leisten hierbei einen wichtigen Beitrag, indem sie Wissensgrundlagen für Investitionen in Windenergie sowie in gekoppelte Technologien wie Power-to-X bereitstellen und regulatorische Unsicherheiten identifizieren.

Darauf aufbauend entstehen Outputs in Form weiterentwickelter regulatorischer Konzepte, technischer Standards und Bewertungsansätze. Ergänzend werden Marktmechanismen und Vergütungsmodelle untersucht, um ihre Wirkung auf Investitionsentscheidungen, Systemintegration und wirtschaftliche Tragfähigkeit besser zu verstehen.

Diese Entwicklungen führen zu Outcomes, die eine rechtssichere und planbare Betriebsführung von Windenergieanlagen unterstützen. Gleichzeitig entstehen belastbare Wissensgrundlagen für langfristige Finanzierungsmodelle und die Weiterentwicklung marktbasierter Instrumente.

In der übergeordneten Perspektive ergibt sich daraus ein Impact in Form verbesserter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen für die Windenergie. Wissenschaftliche Erkenntnisse

tragen dazu bei, Effizienzpotenziale sichtbar zu machen und die Integration der Windenergie in ein wettbewerbliches Energiesystem langfristig zu unterstützen.

5.4. Kompetenzaufbau und Wissensintegration

Der Aufbau wissenschaftlicher Kompetenzen und die Integration von Wissen bilden die Grundlage für langfristige Innovationsfähigkeit, erfolgreichen Wissenstransfer und die internationale Sichtbarkeit des Forschungsstandorts Schleswig-Holstein. Gleichzeitig fördern sie die Vernetzung zwischen Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft und schaffen die Voraussetzungen, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse effizient in technologische Entwicklungen und praktische Anwendungen zu überführen.

Der Transformationspfad „Kompetenzaufbau und Wissensintegration“ adressiert die wissenschaftlichen und institutionellen Voraussetzungen für die langfristige Weiterentwicklung der Windenergieforschung in Schleswig-Holstein. Im Mittelpunkt stehen der Aufbau von Fach- und Methodenkompetenzen, die Sicherung wissenschaftlichen Know-hows sowie die Verknüpfung von Forschung, Entwicklung und praktischer Anwendung. Angesichts der zunehmenden Komplexität von Windenergiesystemen gewinnen interdisziplinäre Kompetenzen in Bereichen wie Modellierung, Digitalisierung, Materialforschung, Betriebsführung und Systemintegration kontinuierlich an Bedeutung.

Darüber hinaus betrachtet dieser Transformationspfad die Weiterentwicklung von Wissensnetzwerken auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene. Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen übernehmen dabei eine zentrale Rolle, indem sie wissenschaftliche Erkenntnisse generieren, weiterentwickeln und in Innovationsprozesse überführen. Die Integration unterschiedlicher Wissensquellen trägt dazu bei, die Anpassungs- und Innovationsfähigkeit des Forschungsstandorts langfristig zu stärken.

Im Zeitraum bis 2025 bilden attraktive Rahmenbedingungen für wissenschaftliche und technische Karrieren die Grundlage für den langfristigen Kompetenzaufbau. Ziel ist es, wissenschaftliches Potenzial zu sichern, Forschungswissen zu erhalten und die Attraktivität des Forschungsstandorts Schleswig-Holstein weiter zu stärken.

Darauf aufbauend entstehen Outputs in Form strukturierter Aus- und Weiterbildungsangebote, kooperativer Forschungsformate sowie einer stärkeren Vernetzung zwischen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. Dadurch wird die Integration wissenschaftlicher Erkenntnisse in Anwendungs- und Innovationsprozesse unterstützt und der Austausch von Wissen zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen gefördert.

Im Zeitraum 2030–2040 entwickeln sich daraus Outcomes in Form eines stabilen Kompetenz- und Innovationssystems, das Forschung, technologische Entwicklung und industrielle Anwendung enger miteinander verbindet. Die vorhandenen Kompetenzen ermöglichen es, neue wissenschaftliche Erkenntnisse effizient in Technologien, Methoden und betriebliche Konzepte zu überführen.

In der übergeordneten Perspektive führt dies zu einem Impact, bei dem wissenschaftliche Expertise, technologisches Know-how und Innovationsfähigkeit langfristig gesichert sind. Schleswig-Holstein profitiert von einer starken Forschungs- und Wissensbasis, die sowohl die Weiterentwicklung der Windenergie als auch die internationale Sichtbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Standorts unterstützt.

5.5. Integration von Energiesystemen

Die Windenergie entfaltet ihr volles Potenzial erst durch die intelligente Verknüpfung mit Netzen, Speichern und sektorübergreifenden Anwendungen, die eine flexible, sichere und resiliente Energieversorgung ermöglichen. Die Integration unterschiedlicher Technologien und Infrastrukturen schafft dabei die Voraussetzungen, um erneuerbare Energien effizient zu nutzen, Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem langfristig zu unterstützen.

Der Transformationspfad „Integration von Energiesystemen“ beschreibt die zunehmende Einbindung der Windenergie in ein vernetztes, flexibles und sektorenübergreifendes Energiesystem. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie die fluktuierende Einspeisung von Windenergie mit Anforderungen an Netzstabilität, Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Effizienz in Einklang gebracht werden kann. Dabei gewinnen sowohl technische Aspekte der Netzintegration als auch systemische Fragestellungen der Sektorenkopplung, Speicherung und Steuerung an Bedeutung.

Die Integration wird dabei nicht als rein infrastrukturelle Aufgabe verstanden, sondern als dynamischer Prozess, in dem physikalische Systeme, digitale Steuerungskonzepte und betriebliche Strategien zusammenwirken. Fortschritte in der Modellierung von Energiesystemen, in der Analyse von Lastflüssen sowie in der Entwicklung gridnaher Technologien ermöglichen eine präzisere Abstimmung zwischen Erzeugung, Speicherung und Verbrauch. Gleichzeitig entstehen durch die Kopplung mit Wasserstoff- und anderen Power-to-X-Anwendungen neue Nutzungspfade für Windenergie, die über die reine Stromerzeugung hinausgehen.

Im Zeitraum 2025–2030 werden zunächst zentrale Outputs entwickelt, die sich auf die Analyse und Weiterentwicklung technischer, räumlicher und systemischer Konzepte des Windenergiesystems konzentrieren. Dabei stehen insbesondere Fragen der Netzintegration, der Sektorenkopplung sowie der Kombination von Windenergie mit Speicherlösungen und leistungsfähigen Netzanbindungskonzepten, beispielsweise auf Basis von HGÜ-Technologien, im Vordergrund. Modellbasierte Ansätze und simulationsgestützte Analysen tragen dazu bei, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten besser zu verstehen und planerisch zu berücksichtigen.

Darauf aufbauend werden diese Ansätze weiter konkretisiert und in integrierte Energiekonzepte überführt. Die Kopplung von Windenergie mit Speichertechnologien, Power-to-X-Prozessen sowie sektorübergreifenden Anwendungen ermöglicht eine flexiblere Nutzung der erzeugten Energie und eröffnet neue Möglichkeiten der

Systemoptimierung, beispielsweise durch virtuelle Kraftwerke und koordinierte Betriebsstrategien.

Im Zeitraum 2030–2035 werden ergänzend Input-Strukturen im Bereich der Systemsteuerung weiterentwickelt. Dazu zählen insbesondere Regeln und technische Konzepte für eine koordinierte Integration erneuerbarer Erzeugung und Speichersysteme. Diese Grundlagen schaffen die Voraussetzung für eine stabile und effiziente Systemführung, in der Lastflexibilität, Speicherbedarf sowie die Bereitstellung netzdienlicher Systemdienstleistungen systematisch berücksichtigt werden.

Auf dieser Basis entstehen Outcomes, die die tatsächliche Integration im Energiesystem widerspiegeln. Windenergie wird in diesem Zeitraum zunehmend in abgestimmte Netz- und Speicherstrukturen eingebunden. Lastverschiebungen, Speicherlösungen und koordinierte Betriebsstrategien tragen dazu bei, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und gleichzeitig den Ausbau von Windenergie mit der Entwicklung der Netzinfrastruktur in Einklang zu bringen.

In der langfristigen Perspektive bis 2035–2040 ergeben sich daraus mehrere Impact-Dimensionen. Zum einen wird die Versorgungssicherheit gestärkt, indem Windenergie in Kombination mit Speichern und Wasserstoffsystemen eine stabile Energieversorgung unterstützt. Zum anderen trägt die systemische Integration zur Wiederherstellung und Sicherung energiebezogener Unabhängigkeit bei, indem erneuerbare Erzeugungskapazitäten weiter ausgebaut und effizient genutzt werden.

5.6. Beteiligung und soziale Akzeptanz

Langfristig erfolgreiche Transformationsprozesse entstehen durch ein wissenschaftlich fundiertes Verständnis gesellschaftlicher Wirkungen, Beteiligungsformen und Akzeptanzfaktoren. Die aktive Einbindung relevanter Akteure sowie die Berücksichtigung regionaler, sozialer, wirtschaftlicher und ökologischer Perspektiven tragen dazu bei, die gesellschaftliche Verankerung der Windenergie zu stärken und tragfähige Rahmenbedingungen für ihre zukünftige Entwicklung zu schaffen.

Der Transformationspfad „Beteiligung und soziale Akzeptanz“ adressiert die gesellschaftlichen Fragestellungen, die mit der Planung, Umsetzung und Nutzung von Windenergie verbunden sind. Im Mittelpunkt stehen die wissenschaftliche Untersuchung von Akzeptanzfaktoren, Beteiligungsformaten und regionalen Wirkungen sowie deren Bedeutung für langfristige Transformationsprozesse im Energiesystem. Dabei werden sowohl individuelle Wahrnehmungen als auch institutionelle und regionale Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Besondere Relevanz besitzen Fragen der lokalen Wertschöpfung, der gesellschaftlichen Teilhabe sowie der Wahrnehmung von Umweltwirkungen und ökologischen Auswirkungen der Windenergienutzung. Ziel dieses Transformationspfades ist es, wissenschaftliche Erkenntnisse über die sozialen Dimensionen der Windenergienutzung bereitzustellen und damit zu einem besseren Verständnis von Transformationsprozessen beizutragen.

Im Zeitraum 2025–2030 bilden Maßnahmen zur Stärkung des gesellschaftlichen Dialogs die Ausgangsbasis. Forschung und Austausch zwischen Wissenschaft, Planungsträgern und gesellschaftlichen Akteuren tragen dazu bei, Wahrnehmungen, Erwartungen und mögliche Konfliktfelder im Zusammenhang mit Windenergie besser zu verstehen.

Darauf aufbauend entstehen Outputs in Form von Konzepten und Analysen zu regionaler Wertschöpfung, Beteiligungsmodellen und gesellschaftlichen Akzeptanzfaktoren. Gleichzeitig werden Kommunikations- und Dialogformate untersucht, die eine sachliche Einordnung technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte ermöglichen.

Im gleichen Zeitraum entwickeln sich daraus Outcomes in Form einer stärkeren Beteiligung relevanter Akteursgruppen sowie einer verbesserten Einbindung gesellschaftlicher Perspektiven in Planungs- und Entscheidungsprozesse. In einem erweiterten Zeithorizont bis 2030–2035 entstehen ergänzend Erfahrungen mit Beteiligungsmodellen, regionalen Wertschöpfungsansätzen und kooperativen Umsetzungsformen.

Langfristig ergeben sich daraus Impact-Dimensionen, die sich in einer stabilen gesellschaftlichen Einbettung der Windenergienutzung widerspiegeln. Die Forschung trägt dabei dazu bei, Faktoren erfolgreicher Beteiligung zu identifizieren, gesellschaftliche und ökologische Wirkungen besser zu verstehen und die Wissensbasis für zukünftige Transformationsprozesse zu erweitern.

6. Handlungsoptionen

Die Roadmap für das Fokusfeld Wind zeigt, dass die Weiterentwicklung der Windenergie bis 2040 ein koordiniertes Zusammenspiel von Forschung, Infrastrukturentwicklung, regulatorischen Rahmenbedingungen und betrieblicher Umsetzung erfordert. Die identifizierten Transformationspfade verdeutlichen, dass einzelne Fortschritte erst dann ihre volle Wirkung entfalten, wenn sie systemisch eingebettet und entlang klar definierter Entwicklungslinien umgesetzt werden.

Ein zentrales Handlungsfeld liegt in der gezielten Stärkung der Forschungs- und Testinfrastruktur. Experimentelle Umgebungen, großskalige Testfelder sowie datenbasierte Plattformen sind erforderlich, um komplexe Fragestellungen, etwa im Bereich aerodynamischer Wechselwirkungen, Materialverhalten oder Parkdynamiken, unter realen Bedingungen zu untersuchen. Einrichtungen wie das WETI an der Hochschule Flensburg oder der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Kiel können hierbei als Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung, angewandter Entwicklung und industrieller Umsetzung wirken.

Parallel dazu ist die Weiterentwicklung von Modellierungs- und Simulationskompetenzen von besonderer Bedeutung. Multiphysikalische Modelle, digitale Entwurfsverfahren und prädiktive Regelungssysteme ermöglichen eine präzisere Abbildung von Anlagen- und Systemverhalten und unterstützen die Entwicklung effizienter Betriebsstrategien. In Verbindung mit Fortschritten in der Sensorik und datenbasierten Analyse können Unsicherheiten reduziert und Entscheidungsprozesse fundierter gestaltet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Integration von Windenergie in ein zunehmend komplexes Energiesystem. Der Ausbau von Netzinfrastruktur, die Implementierung von Grid nahen Steuerungskonzepten sowie die Kopplung mit Speichern und

Wasserstofftechnologien erfordern koordinierte Ansätze in Planung und Betrieb. Insbesondere hybride Systeme und sektorübergreifende Anwendungen stellen neue Anforderungen an Systemführung und Marktgestaltung.

Auf regulatorischer Ebene besteht Handlungsbedarf hinsichtlich der Ausgestaltung konsistenter und verlässlicher Rahmenbedingungen. Effiziente Genehmigungsverfahren, klare technische Standards sowie geeignete Marktmechanismen können dazu beitragen, Investitionssicherheit zu erhöhen und Innovationsprozesse zu beschleunigen. Gleichzeitig sollten regulatorische Strukturen so gestaltet sein, dass sie technologische Weiterentwicklungen aufnehmen können, ohne deren Umsetzung zu verzögern.

Darüber hinaus ist die Weiterentwicklung von Betriebs- und Wartungsstrategien ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Zustandsüberwachungssysteme, automatisierte Inspektionsverfahren sowie Ansätze zur Lebensdaueranalyse und zum Umgang mit Extrembedingungen tragen dazu bei, die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Anlagen langfristig zu sichern. Dies gilt sowohl für Onshore, als auch für Offshore-Anwendungen, bei denen zusätzliche technische und logistische Anforderungen bestehen.

Neben technischen und strukturellen Aspekten ist auch die gesellschaftliche Dimension zu berücksichtigen. Transparente Kommunikationsprozesse, die Einbindung relevanter Akteure sowie eine differenzierte Betrachtung von Umweltwirkungen, etwa im Hinblick auf CO_2-Bilanzen, Biodiversität oder Geräuschemissionen, können dazu beitragen, Akzeptanz zu fördern und Planungsprozesse zu stabilisieren.

Insgesamt verdeutlichen die Handlungsempfehlungen, dass die Transformation des Energiesystems einen integrierten Ansatz erfordert, in dem technologische, regulatorische und gesellschaftliche Aspekte gleichermaßen berücksichtigt werden. Die weitere Entwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein hängt maßgeblich davon ab, inwieweit es gelingt, diese unterschiedlichen Ebenen miteinander zu verknüpfen und in konsistente Umsetzungsstrategien zu überführen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Roadmap für das Fokusfeld Wind verdeutlicht, dass die Weiterentwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein bis 2040 eine komplexe und langfristige Transformationsaufgabe darstellt. Die identifizierten Transformationspfade zeigen auf, wie sich technologische Innovationen, infrastrukturelle Entwicklungen und gesellschaftliche Rahmenbedingungen gegenseitig beeinflussen und gemeinsam die Grundlage für ein leistungsfähiges Energiesystem bilden.

Dabei wird deutlich, dass der zukünftige Beitrag der Windenergie nicht allein durch den weiteren Ausbau von Anlagen bestimmt wird, sondern maßgeblich von der Qualität und ihrer Integration in das Gesamtsystem abhängt. Fortschritte in der Rotorblattaerodynamik, in der Beschreibung von Strömungsprozessen und Parkdynamiken sowie in der multiphysikalischen Modellierung tragen dazu bei, Energieerträge präziser zu erfassen und Anlagen effizienter auszulegen. Gleichzeitig ermöglichen digitale Technologien, datenbasierte Analysen und zustandsorientierte Betriebsstrategien eine kontinuierliche Optimierung von Leistung und Zuverlässigkeit.

Ein zentrales Merkmal der zukünftigen Entwicklung ist die zunehmende Systemintegration. Die Kopplung von Windenergie mit Netzinfrastruktur, Speicherlösungen und Wasserstofftechnologien führt zu hybriden Energiesystemen, in denen Flexibilität und Steuerbarkeit an Bedeutung gewinnen. In diesem Zusammenhang spielen auch Fragen der Systemführung, der Netzstabilität und der Interaktion zwischen unterschiedlichen Energiekomponenten eine zentrale Rolle.

Darüber hinaus beeinflussen materialtechnische Entwicklungen unter Berücksichtigung der CO2-Bilanz sowie Strategien zur Lebensdauerverlängerung und zum Recycling die langfristige Nachhaltigkeit der Windenergienutzung. Fortschritte in der Fertigung, im Umgang mit strukturellen Belastungen und in der Bewertung von Ermüdungsprozessen tragen dazu bei, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Umweltwirkungen zu reduzieren.

Neben den technischen Aspekten bleiben auch Umwelt- und gesellschaftliche Fragestellungen von Bedeutung. Themen wie Biodiversität, akustische Effekte und visuelle Einbindung werden zunehmend differenziert betrachtet und in Planungs- und Entscheidungsprozesse integriert. Gleichzeitig gewinnt die transparente Kommunikation sowie die Einbindung relevanter Akteure an Bedeutung, um Planungsprozesse nachvollziehbar zu gestalten und langfristige Stabilität zu gewährleisten. Auch die Ausbildung und Gewinnung qualifizierter Fachkräfte gewinnt an Bedeutung, um die Umsetzung technischer, planerischer und regulatorischer Anforderungen langfristig sicherzustellen.

Die Roadmap ist dabei ausdrücklich als dynamischer Orientierungsrahmen zu verstehen. Technologische Entwicklungen, regulatorische Anpassungen und sich verändernde gesellschaftliche Rahmenbedingungen erfordern eine kontinuierliche Weiterentwicklung der identifizierten Inhalte. Regelmäßige Aktualisierungen und eine enge Rückkopplung zwischen Forschung, Anwendung und Politik sind notwendig, um die Anschlussfähigkeit der Roadmap langfristig sicherzustellen.

Die vorliegende Roadmap basiert auf einem breit angelegten Beteiligungsprozess innerhalb der schleswig-holsteinischen Windenergieforschung. Ergänzend zu den Workshops wurde eine Analyse mittels der Methode „Circular Tree Map“ (CTM) durchgeführt, um die wissenschaftlichen Schwerpunkte und thematischen Entwicklungslinien der vergangenen Jahre zu reflektieren. Dadurch konnten die Ergebnisse des Roadmapping-Prozesses zusätzlich durch eine datenbasierte Betrachtung der Forschungslandschaft unterstützt werden.

Schleswig-Holstein verfügt aufgrund seiner geografischen Lage, seiner etablierten Infrastruktur und seiner wissenschaftlichen Expertise über günstige Voraussetzungen, um die Weiterentwicklung der Windenergie aktiv zu gestalten. Insbesondere die Kombination aus bestehenden Onshore- und Offshore-Strukturen sowie ausgebauten Forschungsstandorten ermöglicht es, neue Technologien unter realen Bedingungen zu erproben und systemische Lösungen weiterzuentwickeln.

Für die kommenden Jahre wird entscheidend sein, die in der Roadmap beschriebenen Entwicklungslinien in konkrete Forschungsprojekte, Demonstrationsvorhaben und strategische Maßnahmen zu überführen. Reallabore und testbasierte Ansätze spielen hierbei eine wichtige Rolle, da sie eine Verbindung zwischen Modellierung, experimenteller Validierung und praktischer Anwendung herstellen.

Langfristig entsteht das Bild eines Energiesystems, in dem Windenergie eine tragende Rolle übernimmt und eng mit anderen Technologien und Sektoren verknüpft ist. Die erfolgreiche Umsetzung dieses Systems hängt davon ab, inwieweit es gelingt, technologische Innovationen, wirtschaftliche Anforderungen, ökologische Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Erwartungen in Einklang zu bringen. Die vorliegende Roadmap bietet hierfür eine strukturierte Grundlage und eine konsistente Orientierung für die weitere Entwicklung der Windenergie in Schleswig-Holstein.

Energiewendeforschungs-Roadmap Wind

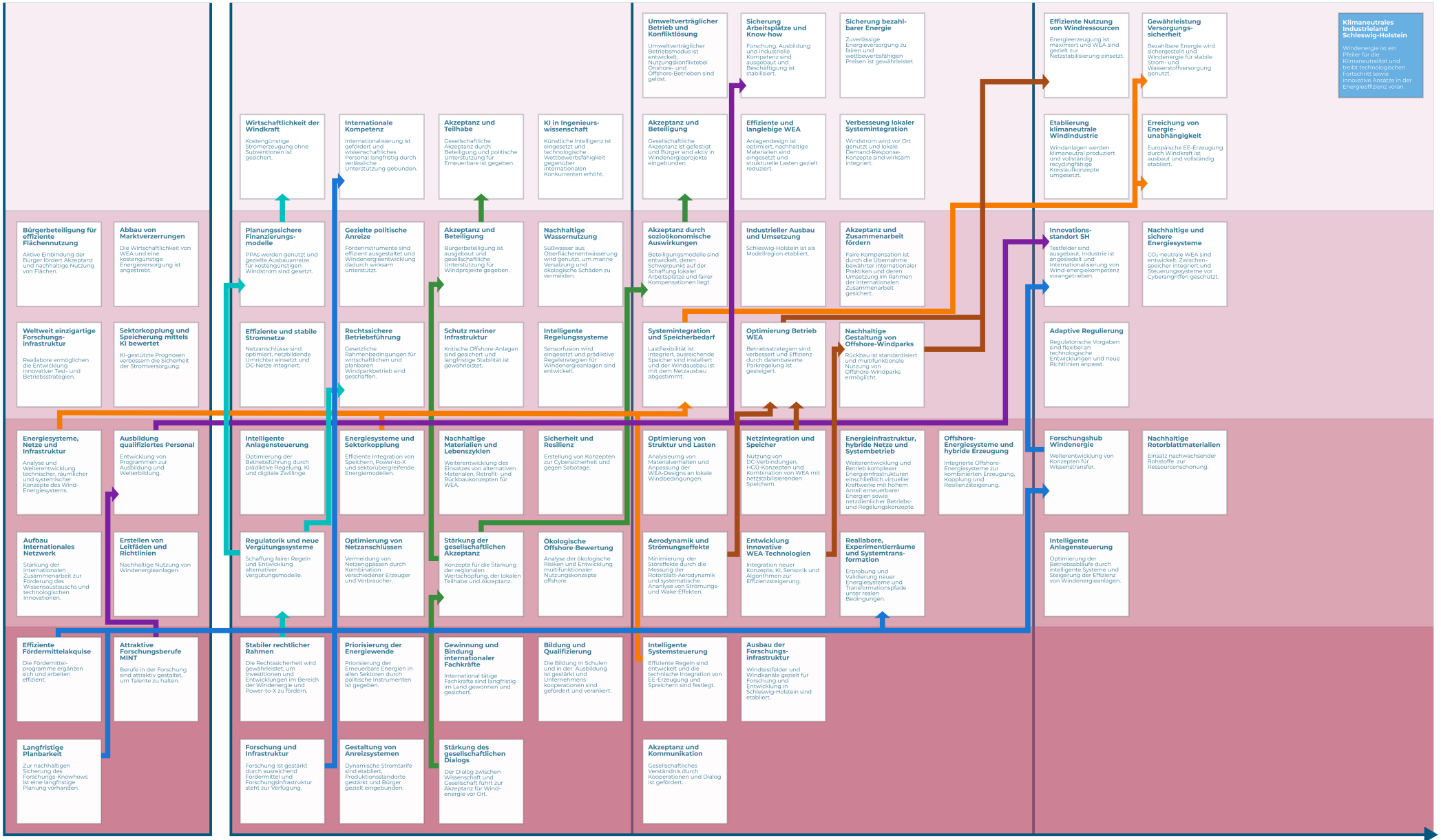
für das Land Schleswig-Holstein

Stand: August 2026

Arbeitsdokument

Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung

EK SH
Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein



Optimierung der Windressourcen
Regulierung und Normen
Integration von Energiesystemen
Entwicklung der Forschungsinfrastruktur
Kompetenzaufbau und Wissensintegration
Beteiligung und soziale Akzeptanz

Erstellt in Zusammenarbeit mit:

INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK

Gefördert durch:

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