Arbeitspapier

Energiewendeforschungs-Roadmap

für das Land Schleswig-Holstein

Netzintegration

Transformationspfade zur Klimaneutralität 2040

Stand November 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 7
4. Die vier Dimensionsebenen des Fokusfeldes Netzintegration 7
   4.1. Input: Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen 7
   4.2. Output: Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse 8
   4.3. Outcome: Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen 10
   4.4. Impact: Impact und gesellschaftliche Missionen 11
   4.5. Zusammenfassung der IOOI Ebenen 12
5. Transformationspfade 13
   5.1. Systemstabilität & Betriebsführung 14
   5.2. Digitalisierung & IT-Sicherheit 15
   5.3. Sektorenkopplung & Netzdienlichkeit 16
   5.4. Erneuerbare & Speicherintegration 17
   5.5. Netzarchitekturen & Technologien 18
   5.6. Marktdesign & Regulatorische Rahmenbedingungen 20
   5.7. Zwischenfazit 20
6. Handlungsoptionen 21
7. Zusammenfassung und Ausblick 22
8. Anhang 23
9. Impressum 24

1. Executive Summary

Die Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 erfordert nicht nur den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien, sondern vor allem deren zuverlässige Integration in ein zunehmend komplexes Energiesystem. Für Schleswig-Holstein als führenden Standort der Energiewende wird die Netzintegration damit zu einer zentralen Voraussetzung für Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Resilienz. Die vorliegende Roadmap beschreibt die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, mit denen die Wissenschaft des Landes diesen Transformationsprozess unterstützt.

Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines Energiesystems, das hohe Anteile erneuerbarer Energien sicher, effizient und flexibel integrieren kann. Dazu müssen Stromnetze stärker digitalisiert, automatisiert und sektorenübergreifend gedacht werden. Gleichzeitig gewinnen Speichertechnologien, Flexibilitäten auf Verbrauchs- und Erzeugungsseite sowie die Kopplung von Strom-, Wärme-, Mobilitäts- und Wasserstoffsystemen an Bedeutung. Forschung liefert hierfür die technologischen Grundlagen, entwickelt neue Planungs- und Betriebsansätze und schafft die Wissensbasis für politische und wirtschaftliche Entscheidungen.

Die Roadmap identifiziert sechs zentrale Transformationspfade: Systemstabilität und Betriebsführung, Sektorenkopplung und Netzdienlichkeit, Digitalisierung und IT-Sicherheit, Erneuerbare- und Speicherintegration, Netzarchitekturen und Technologien sowie Marktdesign und regulatorische Rahmenbedingungen. Gemeinsam adressieren sie die wesentlichen Herausforderungen eines Energiesystems, das künftig von volatiler erneuerbarer Erzeugung, dezentralen Strukturen und neuen Flexibilitätsanforderungen geprägt sein wird.

Bis 2030 stehen insbesondere die Entwicklung neuer Technologien, digitaler Werkzeuge und innovativer Betriebs- und Marktmechanismen im Vordergrund. Darauf aufbauend erfolgt bis 2035 die Skalierung und breite Anwendung dieser Lösungen in Netzen, Energiemärkten und sektorübergreifenden Infrastrukturen. Bis 2040 sollen daraus vollständig erneuerbare, flexible und resiliente Energiesysteme entstehen, die Klimaneutralität mit Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit verbinden.

Schleswig-Holstein verfügt aufgrund seiner starken Forschungslandschaft, seiner hohen Anteile erneuerbarer Energien und seiner Rolle als Energiewendestandort über besondere Voraussetzungen, um diese Entwicklungen voranzutreiben. Die Roadmap dient dabei als strategische Orientierung für Forschung, Politik und Wirtschaft. Sie macht sichtbar, welche wissenschaftlichen Beiträge erforderlich sind, um die Netzintegration als zentralen Enabler der Energiewende weiterzuentwickeln und eine bezahlbare, resiliente und klimaneutrale Energieversorgung zu erreichen.

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 Netzintegration 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 Netzintegration 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 knüpft an die Ziele des Klimaschutzprogramms 2030 Schleswig-Holstein sowie an zentrale bundespolitische Strategien und Planungsinstrumente an. Insbesondere das Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG), die Systementwicklungsstrategie und der Netzentwicklungsplan Strom (NEP) geben den Rahmen für den Ausbau und die Integration einer zunehmend erneuerbar geprägten Energieversorgung vor. Die dort adressierten Themenfelder Netzausbau, Systemflexibilität, Sektorenkopplung und Digitalisierung bilden zugleich zentrale Bezugspunkte für die in dieser Roadmap identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe im Fokusfeld Netzintegration.

Der Prozess begann mit einem Kick-off-Workshop im Juli 2025, in dem Forschende zentrale Themen und mögliche Entwicklungspfade für die zukünftigen Forschungsaktivitäten identifizierten. Diese ersten Ansätze wurden anschließend mithilfe der Methodik der „Circular Tree Map“ durch eine Analyse der wissenschaftlichen Publikationen der beteiligten Forschenden aus den vergangenen fünf Jahren überprüft, geschärft und weiterentwickelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem weiteren Online-Forschungsdialog im Dezember 2025 diskutiert, ergänzt und 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 Entwicklung der in dieser Roadmap dargestellten Transformationspfade.

Die vorliegende Roadmap im Fokusfeld Netzintegration basiert somit auf den Beiträgen der Forschenden selbst. Ihre vielfältigen Perspektiven und Forschungsschwerpunkte wurden zu strategischen Pfaden zusammengeführt, die einen Beitrag zur Erreichung der

Klimaneutralität leisten können. Die Roadmap wird in einem kontinuierlichen und iterativen Prozess fortgeschrieben und an neue Entwicklungen angepasst.

Zur Entwicklung der Roadmap setzt das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein die Methodik des „Visual Roadmapping" ein. Sie ermöglicht es, Perspektiven, Bedarfe und Zukunftsvisionen aus Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft systematisch zusammenzuführen und in einen gemeinsamen Handlungsrahmen zu überführen.

Die Roadmap dient den Forschenden als Orientierung für die strategische Ausrichtung ihrer Forschung, den Hochschulen als Grundlage für Schwerpunktsetzungen sowie Politik, Wirtschaft und Gesellschaft als Instrument zur Einordnung zukünftiger Entwicklungen und Forschungsbedarfe.

Darüber hinaus soll sie dazu beitragen, zusätzliche Fördermittel nach Schleswig-Holstein zu lenken. Durch die systematische Darstellung von Forschungsbedarfen können Impulse für die Ausgestaltung von Förderprogrammen auf Bundes- und EU-Ebene gegeben werden. Gleichzeitig bietet die Roadmap eine Grundlage, um den Landesförderfonds Energiewendeforschung (LEF) strategisch an den identifizierten technologischen Innovationen und wissenschaftlichen Erkenntnissen (Outputs) auszurichten und gezielt Forschungsvorhaben entlang der definierten Transformationspfade zu fördern.

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

Netzintegration 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 Netzintegration 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 in diesem Verständnis 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 Transformation tatsächlich greift, im Betrieb des Energiesystems, in industriellen Wertschöpfungsketten und in der praktischen Umsetzung, und wie Forschung dazu beiträgt, diese Wirkungen systematisch zu ermöglichen und zu stabilisieren.

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 Fokusfeldes Netzintegration

4.1. Input: Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die Input-Ebene umfasst die politischen, regulatorischen, institutionellen und personellen Rahmenbedingungen, die für eine erfolgreiche Energiewendeforschung im Fokusfeld Netzintegration erforderlich sind. Sie beschreibt die strukturellen Voraussetzungen, die Forschung, Innovation und die Überführung neuer Technologien, Betriebskonzepte und

Marktmechanismen in die Praxis ermöglichen. Dazu gehören insbesondere regulatorische Vorgaben, fachliche Anforderungen sowie Förderinstrumente und Ausschreibungen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene.

Im Unterschied zu den Output-, Outcome- und Impact-Ebenen ist die Input-Ebene im Fokusfeld Netzintegration derzeit bewusst weniger detailliert ausgearbeitet. Dies ist auf den methodischen Aufbau der Roadmap zurückzuführen: Da die Roadmap nach dem Prinzip des Backcastings entwickelt wurde, standen zunächst die Definition der angestrebten Outputs, Outcomes und Impacts im Vordergrund. Die systematische Ableitung der notwendigen Input-Faktoren erfolgt in einem nachgelagerten Schritt auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Transformationspfaden.

Die Input-Ebene ist daher als dynamischer Bestandteil der Roadmap zu verstehen. Sie wird im Rahmen des iterativen Roadmap-Prozesses gemeinsam mit den beteiligten Forschenden kontinuierlich weiterentwickelt und ergänzt. Mit zunehmender Konkretisierung der Transformationspfade werden auch die erforderlichen regulatorischen, institutionellen und förderpolitischen Rahmenbedingungen weiter ausdifferenziert.

Status Quo (Fokus auf Beschleunigung des Netzanschlusses):

- Flexible Netzanschlussvereinbarungen (Flexible Connection Agreements): Flexible Anschlussverträge für Großverbraucher und weitere geeignete Netzanschlüsse schaffen kurzfristig zusätzliche Netzkapazitäten und ermöglichen eine schnellere Integration neuer Verbraucher, ohne den Netzausbau vollständig vorwegnehmen zu müssen.

Heute bis 2030 (Fokus auf Dekarbonisierung und Fachkräftesicherung):

- Priorisierung von Netzanschlüssen für die industrielle Dekarbonisierung: Netzanschlüsse werden bevorzugt dort bereitgestellt, wo sie einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung energieintensiver Industrieprozesse leisten und den Hochlauf klimaneutraler Technologien unterstützen.
- Ausbau der Bildungs-, Forschungs- und Qualifizierungsinfrastruktur: Aus- und Weiterbildungsangebote sowie wissenschaftliche Kapazitäten im Bereich elektrischer Netze, Speichertechnologien und digitaler Netzsysteme werden gezielt ausgebaut, um den steigenden Fachkräfte- und Innovationsbedarf langfristig zu decken.

4.2. 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.

Wissenschaft übernimmt in diesem Verständnis 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.

Heute bis 2030 (Fokus auf Entwicklung & Planung):

- Flexibilisierung: Der systemdienliche Nutzen von Flexibilitäten wird definiert und erprobt. Ein Fokus liegt auf der optimalen finanziellen und sicheren Nutzung. Die Digitalisierung mit offenen Daten und transparenten Ergebnissen zur Zukunft unseres Energiesystems und der dazugehörigen Infrastruktur leistet dazu einen essenziellen Beitrag.
- Technologie: Die Adaptivität von Schutz- und Leittechnik wird im Betrieb untersucht, die Netzautomation wird durch selbstkonfigurierende Teilnetze erhöht. Die Stabilität von zunehmend Leistungselektronik-dominierten Netzen wird analysiert.
- Planungstools: Entwicklung von digitalen Werkzeugen und Modellen für die integrierte, sektorengekoppelte und netzebenenübergreifende Stromnetzplanung, sowie für die Optimierung der Positionierung und Dimensionierung von Batteriespeichern.
- Geschäftsmodelle: Die Umsetzbarkeit alternativer, fairer Preisstrukturen auf technischer und regulatorischer Ebene, wie beispielsweise ein Strompreiszonensplit, nodale Bepreisung, dynamische Netzentgelte sowie dynamische Strompreise, wird untersucht.

2030 bis 2035 (Fokus auf Optimierung):

- DC-Technologie: Untersuchungen zu DC-Systemen, wie MV-DC oder LV-DC Links im Netzbetrieb
- Solid-State-Transformer: Erprobung innovativer leistungselektronischer Systeme, wie Solid-State-Transformatoren

- **Betriebsführung**: Auf Mittelspannungsebene wird die Auslastungsmaximierung erprobt, während auf Niederspannungsebene die Überlastfähigkeit überprüft wird. Zudem werden autonome Teil- bzw. Mikronetze in der Fläche untersucht.
- **Absicherung**: Leistungselektronische Schutzeinrichtungen zur Sicherstellung der Spannungs- und Frequenzstabilisierung werden pilotiert. Außerdem werden Rückfallebenen für die digitale Kommunikationsinfrastruktur des Energiesystems gegen Ausfälle erprobt.

2035 bis 2040 (Fokus auf Finalisierung):

- **Sektorintegrierte Energieübertragung**: Neue sektorintegrierte Energieübertragungssysteme, wie beispielsweise Supraleitungen, werden erprobt.
- **Neue Speichertechnologien**: Neue Speichertechnologien wie Na-Ionen Batteriespeicher werden im MWh Bereich in das Netz integriert.

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.

Heute bis 2030 (Fokus auf Systemintegration & Steuerbarkeit):

- **Digitalisierung:** Durch die datenbasierte, transparente und flexible Steuerbarkeit des Energiesystems kann es systemeffizient betrieben werden. Dabei sorgen Datenschutz und Cybersecurity Systeme für Resilienz und Souveränität.
- **Marktmodell:** Durch funktionsfähige Markt- und Preissignale für die Energiewende werden wirksame Anreize für Flexibilitäten, Effizienz und netzdienliches Verhalten geschaffen. Dadurch wird die Zukunftsfähigkeit und Verlässlichkeit des (Strom-) Marktmodells sichergestellt.
- **Planungsverfahren:** Aufgrund der offenen Planungstools ist die nachvollziehbare, transparente und effiziente Planung von neuen Netzabschnitten oder dem Ausbau im Bestand möglich.

2030 bis 2035 (Fokus auf Flexibilisierung & Sektorintegration):

- Flexibilitäten: Durch Auslastungsmaximierung auf MS-Ebene, Überlastfähigkeit auf NS-Ebene und die sektorübergreifende Integration von Flexibilitäten ist das Stromnetz hochflexibel im Betrieb.
- Sektorenkopplung: Die Erzeugung von Wasserstoff und Derivaten dient der Energiespeicherung und der stofflichen Nutzung, unterstützt den robusten und resilienten Netzbetrieb durch die Integration als Flexibilitätspotenzial.
- Modularer und dezentraler Betrieb: Die zunehmende Netzautomation ermöglicht die effiziente Betriebsführung modularer Systeme und Betriebsmittel. Des Weiteren ermöglichen SSTs und DC Systeme einen effizienten, adaptiven und insbesondere auch dezentralen Netzbetrieb.

2035 bis 2040 (Zielerreichung: Erneuerbares, resilientes Energiesystem):

- Das Energiesystem basiert vollständig auf erneuerbaren Quellen und ist systemisch effizient strukturiert.
- Die Energiesysteme sind robust gegenüber Störungen, Extremereignissen und systemischen Risiken.
- Mobilität und Raumplanung sind klimaneutral, integriert und ressourcenschonend organisiert.

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 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.

Heute bis 2030 (Fokus auf Versorgungssicherheit & Investitionsfähigkeit):

- **Versorgungssicherheit und Resilienz:** Die Energieversorgung bleibt trotz des beschleunigten Ausbaus erneuerbarer Energien jederzeit zuverlässig und widerstandsfähig gegenüber Störungen, Krisen und neuen Gefährdungen.
- **Investitions- und Planungssicherheit:** Stabile regulatorische und marktliche Rahmenbedingungen schaffen Vertrauen für langfristige Investitionen in Infrastruktur, Technologien und industrielle Transformation.

- **Bezahlbare Energieversorgung:** Die Energiewende wird wirtschaftlich tragfähig gestaltet und gewährleistet wettbewerbsfähige Energiekosten für Haushalte und Unternehmen.

2030 bis 2035 (Fokus auf Integration & Wertschöpfung):

- **Integrierte Energiesysteme:** Strom-, Wärme-, Wasserstoff- und Mobilitätssysteme wirken als integriertes Gesamtsystem zusammen und erhöhen Effizienz sowie Versorgungssicherheit.
- **Industrielle Transformation und Wertschöpfung:** Schleswig-Holstein etabliert sich als Modellregion für die Integration erneuerbarer Energien und erschließt neue wirtschaftliche Potenziale entlang der Energiewertschöpfungsketten.
- **Energiesouveränität:** Die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und externen Energieimporten wird deutlich reduziert.

2035 bis 2040 (Zielbild: Klimaneutrales und resilientes Industrieland):

- **Klimaneutrales Industrieland Schleswig-Holstein:** Wirtschaft, Industrie und Gesellschaft profitieren von einer weitgehend treibhausgasneutralen Energieversorgung und nachhaltigen Wertschöpfung.
- **Bezahlbare, sichere und souveräne Energieversorgung:** Energie steht dauerhaft klimaneutral, bezahlbar und robust gegenüber geopolitischen sowie klimabedingten Risiken zur Verfügung.
- **Gesellschaftlicher Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit:** Die Energiewende stärkt Innovationskraft, Lebensqualität und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit langfristig.

4.5. Zusammenfassung der IOOI Ebenen

Die Entwicklung der Netzintegration im Rahmen der Energiewendeforschung folgt einer schrittweisen Transformation entlang der IOOI-Logik (Input–Output–Outcome–Impact). Sie beschreibt den Übergang von Forschung und Technologieentwicklung über die systemische Anwendung und Skalierung bis hin zur vollständigen Integration in ein klimaneutrales Energiesystem.

Phase 1 (bis ca. 2030): Aufbau von Wissen, Technologien und Transferstrukturen

Im Vordergrund stehen Forschungsaktivitäten zur Entwicklung eines qualitativ hochwertigen wissenschaftlichen Outputs im Bereich der Netzintegration. Dazu zählen insbesondere neue Konzepte für Netzarchitekturen, Betriebsführung, Digitalisierung, Sektorenkopplung sowie Speicher- und Systemintegration. Parallel werden Transferstrukturen aufgebaut, die eine Überführung der Forschungsergebnisse in

Anwendungskontexte ermöglichen und damit die Grundlage für spätere Systemeffekte (Outcome) schaffen. Diese Phase dient insbesondere dazu, die technologische und methodische Basis für den systemischen Wandel im Energiesystem zu legen und die notwendige Transformationsdynamik zu erzeugen.

Phase 2 (2030–2035): Skalierung und systemische Verankerung

In dieser Phase erfolgt die breite Anwendung und Skalierung der entwickelten Innovationen im Energiesystem. Neue Netztechnologien, Betriebsführungsansätze, digitale Systeme, Speicherintegration sowie marktliche und regulatorische Konzepte werden zunehmend zum Standard in der Netzentwicklung und im Betrieb der Energiewirtschaft. Die Netzintegration wird dabei systemisch umgesetzt und bildet eine zentrale Grundlage für die effiziente und flexible Gestaltung des Energiesystems.

Phase 3 (bis 2040): Konsolidierung und vollständige Systemintegration

In der finalen Phase werden die entwickelten Ansätze vollständig im Energiesystem konsolidiert. Der Impact manifestiert sich in einer vollständig klimaneutralen, hochflexiblen und resilienten Energieversorgung. Die Netzintegration ist dabei ein zentraler Enabler für ein stabil betriebenes, erneuerbares Gesamtsystem und trägt wesentlich zur langfristigen Versorgungssicherheit und Systemeffizienz bei.

5. Transformationspfade

Die übergeordnete 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 fokusfeldspezifischen 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. Systemstabilität & Betriebsführung



Der Transformationspfad „Systemstabilität & Betriebsführung“ beschreibt die Weiterentwicklung des Netzbetriebs hin zu einem hochautomatisierten, modularen und digital gesteuerten Energiesystem. Im Mittelpunkt stehen die zunehmende Netzautomation durch adaptive Schutz- und Leittechnik, die Stabilität leistungselektronikdominierter Netze sowie neue Betriebsführungslogiken für dezentrale und modulare Systemstrukturen. Ziel ist es, auch unter stark veränderten physikalischen Rahmenbedingungen – insbesondere durch hohe Anteile erneuerbarer Energien und leistungselektronischer Betriebsmittel – einen sicheren, flexiblen und resilienten Netzbetrieb zu gewährleisten

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der zunehmenden Netzautomation durch adaptive Schutz- und Leittechnik. Im Fokus stehen Untersuchungen zu selbstkonfigurierenden Teilnetzen sowie die Weiterentwicklung der Adaptivität von Schutz- und Leitsystemen. Diese Ansätze bilden die Grundlage für einen effizienteren, flexibleren und stärker automatisierten Netzbetrieb.

Parallel dazu wird die Stabilität leistungselektronikdominierter Netze untersucht. Der zunehmende Einsatz von leistungselektronischen Betriebsmitteln verändert die physikalischen Eigenschaften des Stromsystems grundlegend, sodass neue Konzepte zur Sicherstellung von Systemstabilität entwickelt und erprobt werden müssen.

Diese beiden Entwicklungen führen ab 2030 gemeinsam zur erprobten und systemisch integrierten Betriebsführung modularer Systeme und Betriebsmittel. Der Netzbetrieb wird zunehmend in modulare Einheiten überführt, die flexibel gesteuert und koordiniert werden können und so eine höhere Anpassungsfähigkeit im Gesamtsystem ermöglichen.

Parallel dazu entwickelt sich – auch unterstützt durch den Transformationspfad „Netzarchitekturen & Technologien“ – ein digitaler, adaptiver und dezentraler Netzbetrieb. Die Netze werden konsequent auf hohe Dezentralität, neue Betriebslogiken und digitale Steuerungsmechanismen ausgerichtet, wodurch eine deutlich erhöhte Systemflexibilität entsteht.

Ein weiterer Entwicklungsschritt ab 2030 ist die differenzierte Anpassung der Anforderungen an zuverlässige Systeme. Dabei wird systematisch zwischen Redundanz- und Resilienzstrategien unterschieden und je nach Einsatzbereich, Netzebene und

Anwendungsfall abgewogen, welche Mechanismen zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit am geeignetsten sind.

Parallel dazu werden auf den Netzebenen konkrete Betriebsansätze weiterentwickelt und erprobt. Auf der Mittelspannungsebene steht die Auslastungsmaximierung im Fokus, während auf der Niederspannungsebene die Überlastfähigkeit untersucht und bewertet wird. Diese Ansätze dienen dazu, die vorhandenen Netzinfrastrukturen effizienter zu nutzen und gleichzeitig die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

Zusammen mit der Entwicklung des digitalen, adaptiven und dezentralen Netzbetriebs führen diese Maßnahmen ab 2030 zu einem hochflexiblen Netzbetrieb und einer entsprechend flexiblen Infrastruktur. Das Stromnetz kann dadurch deutlich dynamischer auf Erzeugungs- und Lastveränderungen reagieren und wird insgesamt anpassungsfähiger gestaltet.

Diese Entwicklung trägt gemeinsam mit dem Transformationspfad „Netzarchitekturen & Technologien“ zur Entstehung integrierter, flexibler und resilienter Energiesysteme bei. Diese Systeme sind sektorübergreifend vernetzt, hochgradig anpassungsfähig und robust gegenüber volatilen Einspeise- und Lastsituationen.

In Kombination mit der Anpassung der Anforderungen an zuverlässige Systeme entsteht daraus schließlich das übergeordnete Ziel einer bezahlbaren, resilienten und souveränen Energieversorgung. Diese ist klimaneutral, wirtschaftlich tragfähig, krisenfest organisiert und strategisch abgesichert.

5.2. Digitalisierung & IT-Sicherheit

Der Transformationspfad „Digitalisierung & IT-Sicherheit“ beschreibt die Entwicklung einer durchgängig datenbasierten, transparenten und zugleich hochsicheren digitalen Infrastruktur für das zukünftige Energiesystem. Im Mittelpunkt stehen der Aufbau offener Datenräume für das Energiesystem, die Entwicklung digital steuerbarer und effizienter Systemstrukturen sowie der Schutz kritischer Infrastrukturen durch robuste Cybersecurity- und Datenschutzarchitekturen. Ziel ist es, eine leistungsfähige digitale Grundlage zu schaffen, die sowohl Transparenz und Effizienz ermöglicht als auch die Sicherheit und Resilienz des Energiesystems gewährleistet.

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der Bereitstellung offener Daten und transparenter Ergebnisse zur Entwicklung des zukünftigen Energiesystems und der zugehörigen Infrastruktur. Dabei wird ein transparenter Umgang mit Daten etabliert, der eine hohe Informationsverfügbarkeit ermöglicht, ohne sicherheitskritische Informationen

zur Infrastruktur offenzulegen. Diese Transparenz bildet die Grundlage für datenbasierte Analysen und Systementwicklung.

Parallel dazu entsteht ein digital steuerbares und effizientes Energiesystem. Das Strom- und Energiesystem wird zunehmend datenbasiert abgebildet, wodurch Transparenz, Steuerbarkeit und Systemeffizienz deutlich erhöht werden. Energieflüsse können dadurch besser analysiert, prognostiziert und optimiert werden.

Ergänzend werden Datenschutz- und Cybersecurity-Systeme weiterentwickelt. Die digitale Infrastruktur des Energiesystems wird so gestaltet, dass sie gegenüber Angriffen, Manipulationen und Ausfällen resilient ist und gleichzeitig den steigenden Anforderungen an Datenschutz und Systemsicherheit gerecht wird.

Diese drei Entwicklungen führen gemeinsam – in Verbindung mit den Transformationspfaden „Systemstabilität & Betriebsführung“ sowie „Netzarchitekturen & Technologien“ – zur Entstehung eines digitalen, adaptiven und dezentralen Netzbetriebs. Die Netze sind dabei konsequent auf hohe Dezentralität, neue Betriebslogiken und digitale Steuerungsmechanismen ausgerichtet, wodurch eine flexible und intelligente Systemführung ermöglicht wird.

Diese Entwicklung bildet die Grundlage für das übergeordnete Ziel einer bezahlbaren, resilienten und souveränen Energieversorgung. Das Energiesystem ist klimaneutral, wirtschaftlich tragfähig, krisenfest organisiert und strategisch abgesichert und basiert auf einer stabilen digitalen Infrastruktur als zentralem Enabler der Energiewende.

5.3. Sektorenkopplung & Netzdienlichkeit

Der Transformationspfad „Sektorenkopplung & Netzdienlichkeit“ beschreibt die Entwicklung eines sektorübergreifend integrierten Energiesystems, in dem Strom-, Wärme- und Wasserstoffnetze sowie industrielle Anwendungen eng miteinander verknüpft sind. Im Mittelpunkt stehen die systemdienliche Nutzung von Flexibilitäten, der Einsatz leistungselektronischer Betriebsmittel zur Netzstabilisierung sowie die Integration von Power-to-X-Technologien und dynamischen Marktanreizen. Ziel ist es, Energieflüsse sektorübergreifend zu optimieren, erneuerbare Energien effizient zu nutzen und die Stabilität des Gesamtsystems durch flexible Verbraucher und Erzeuger zu erhöhen.

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der Definition und Erprobung systemdienlicher Flexibilitätsnutzung. Dabei werden systemdienliche Fahrweisen identifiziert und hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen sowie technischen Optimierung untersucht. Im Fokus steht die Frage, wie Flexibilitäten im Energiesystem bestmöglich genutzt und zugleich sicher in den Netzbetrieb integriert werden können.

Parallel dazu werden ab 2030 leistungselektronische Schutzeinrichtungen pilotiert, die zur Sicherstellung der Spannungs- und Frequenzstabilität beitragen. Diese neuen Betriebsmittel ermöglichen eine schnellere und präzisere Reaktion auf Netzereignisse und unterstützen die Stabilisierung zunehmend leistungselektronikbasierter Energiesysteme.

Diese Entwicklungen führen gemeinsam ab 2030 zur verstärkten Nutzung von Power-to-X-Technologien als systemdienliche Komponente. Die Erzeugung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten dient dabei sowohl der langfristigen Energiespeicherung als auch der stofflichen Nutzung in Industrie und Mobilität. Dadurch werden zusätzliche Flexibilitätsoptionen im Energiesystem erschlossen.

Parallel dazu verändert sich das Nutzungsverhalten im Energiesystem grundlegend. Durch den Einsatz dynamischer Stromtarife und anderer Preissignale wird der Verbrauch stärker an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien angepasst, sodass Strom insbesondere bei günstigen oder negativen Preisen verstärkt genutzt wird.

Die Kombination dieser Entwicklungen führt ab 2030 zur Ausbildung sektorengekoppelter Netze. Strom-, Wärme- und Wasserstoffnetze werden durch Technologien wie Wärmepumpen, Elektrolyseure und Brennstoffzellen miteinander verbunden und bilden ein integriertes, flexibel steuerbares Gesamtsystem.

Diese Entwicklung trägt ab 2035 maßgeblich zur Erreichung zentraler Systemziele bei. Zum einen ermöglicht sie ein geschlossenes CO_2-Management und eine umfassende Kreislaufführung, bei der unvermeidbare Emissionen systematisch erfasst, genutzt oder dauerhaft gespeichert werden. Zum anderen unterstützt sie die Entstehung eines integrierten Wasserstoffsystems mit internationaler Einbindung, in dem Wasserstoff als global handelbarer und systemisch integrierter Energieträger etabliert ist.

5.4. Erneuerbare & Speicherintegration

Der Transformationspfad „Erneuerbare & Speicherintegration“ beschreibt die Weiterentwicklung eines zunehmend erneuerbaren Energiesystems durch die integrierte Planung von Stromnetzen, die optimale Einbindung von Speichertechnologien sowie die systemische Nutzung von Flexibilitäten. Im Mittelpunkt stehen sektorengekoppelte und netzebenenübergreifende Planungsansätze, die gezielte Dimensionierung und Platzierung von Speichern sowie die Integration neuer Speichertechnologien in das Energiesystem. Ziel ist es, eine vollständig auf erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung zu ermöglichen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit durch intelligente Speicherintegration zu gewährleisten.

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der Entwicklung integrierter, sektorengekoppelter und netzebenenübergreifender Stromnetzplanungsinstrumente. Diese ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung von Erzeugung, Netzstruktur und Verbrauch und bilden die Grundlage für eine optimierte Weiterentwicklung der Strominfrastruktur unter Berücksichtigung sektorübergreifender Wechselwirkungen.

Parallel dazu werden Tools zur Optimierung der Positionierung und Dimensionierung von Batteriespeichern entwickelt. Diese unterstützen eine netzdienliche Platzierung von Speichern im Energiesystem und ermöglichen eine bedarfsgerechte Auslegung hinsichtlich Leistung, Kapazität und Systemfunktion.

Diese beiden Entwicklungen führen gemeinsam ab 2030 zur vollständigen erneuerbaren Stromversorgung. Die Stromversorgung basiert dann vollständig auf erneuerbaren Energiequellen wie Windenergie, Photovoltaik und Biomasse und wird durch ein entsprechend angepasstes Netz- und Speichersystem stabilisiert.

Ab 2035 rückt die Integration neuer Speichertechnologien in den Mittelpunkt der Weiterentwicklung. Insbesondere Technologien wie Natrium-Ionen-Batteriespeicher werden im MWh-Bereich in das Energiesystem integriert und erweitern das bestehende Speicherportfolio um kosteneffiziente und skalierbare Lösungen.

Diese Entwicklungen tragen maßgeblich zur langfristigen Stabilisierung des Energiesystems bei und bilden gemeinsam die Grundlage für eine bezahlbare, resiliente und souveräne Energieversorgung. Das Energiesystem ist dabei klimaneutral, wirtschaftlich tragfähig, krisenfest organisiert und strategisch abgesichert.

5.5. Netzarchitekturen & Technologien

Der Transformationspfad „Netzarchitekturen & Technologien“ beschreibt die Weiterentwicklung der technischen Grundstruktur des Stromnetzes hin zu einem hochflexiblen, leistungselektronikbasierten und zunehmend dezentral organisierten Energiesystem. Im Mittelpunkt stehen netzbildende Stromrichter, der Einsatz innovativer leistungselektronischer Betriebsmittel, neue Gleichstromnetzkonzepte sowie der Aufbau autonomer Teil- und Mikronetze. Ziel ist es, die physikalischen und technologischen Grundlagen für ein vollständig erneuerbares Energiesystem zu schaffen, das auch bei hoher Dezentralität und Volatilität stabil und effizient betrieben werden kann.

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der Untersuchung und Erprobung netzbildender Stromrichter im realen Netzbetrieb. Diese Technologie bildet eine zentrale Grundlage für zukünftige leistungselektronikdominierte Energiesysteme, da sie aktiv zur

Netzstabilität beitragen und konventionelle, synchrone Erzeugung zunehmend ergänzen oder ersetzen kann.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden ab 2030 drei zentrale Entwicklungsrichtungen parallel verfolgt.

Erstens werden innovative leistungselektronische Systeme und Betriebsinnovationen im Netzbetrieb erprobt. Dazu gehören insbesondere Technologien wie Solid-State-Transformer, die neue Möglichkeiten für Steuerung, Spannungsregelung und Netzflexibilisierung eröffnen.

Zweitens werden MV- und LV-DC-Systeme sowie entsprechende Netzbetriebskonzepte getestet. Durch die Einführung von Gleichstromlösungen im Mittel- und Niederspannungsbereich entstehen neue Möglichkeiten für effiziente Energieübertragung, Systemkopplung und Integration dezentraler Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten.

Drittens werden autonome Teilnetze und Mikronetze in der Fläche erprobt. Diese können eigenständig betrieben werden, erhöhen die Resilienz des Gesamtsystems und ermöglichen eine flexible lokale Energieversorgung bei gleichzeitiger Einbindung in das übergeordnete Netz.

Diese drei Entwicklungslinien führen ab 2030 gemeinsam zur Ausbildung eines digitalen, adaptiven und dezentralen Netzbetriebs. Die Netze sind konsequent auf hohe Dezentralität, neue Betriebslogiken und digitale Steuerungsansätze ausgelegt. Dieser Transformationspfad wirkt dabei eng zusammen mit den Pfaden „Systemstabilität & Betriebsführung“ sowie „Digitalisierung & IT-Sicherheit“, die die betrieblichen und digitalen Grundlagen dieses Netzbetriebs ergänzen.

Gleichzeitig entsteht durch diese Entwicklungen ein integriertes, flexibles und resilientes Energiesystem. Dieses ist sektorübergreifend vernetzt, hochgradig anpassungsfähig und robust gegenüber volatilen Einspeise- und Lastsituationen und wird zusätzlich durch Fortschritte im Bereich der Betriebsführung unterstützt.

Ab 2035 führen diese beiden Systementwicklungen zu einem vollständig erneuerbaren und effizient organisierten Energiesystem. Die Energieversorgung basiert vollständig auf erneuerbaren Energiequellen und wird durch eine hochentwickelte Netzarchitektur systemisch effizient stabilisiert und gesteuert.

Dieses Ergebnis zahlt schließlich direkt auf das übergeordnete Ziel einer bezahlbaren, resilienten und souveränen Energieversorgung ein. Das Energiesystem ist klimaneutral, wirtschaftlich tragfähig, krisenfest organisiert und strategisch abgesichert.

5.6. Marktdesign & Regulatorische Rahmenbedingungen

Der Transformationspfad „Marktdesign & regulatorische Rahmenbedingungen“ beschreibt die Weiterentwicklung der marktlichen und regulatorischen Strukturen für ein zukünftiges, klimaneutrales Energiesystem. Im Mittelpunkt stehen die Prüfung und Einführung alternativer Preis- und Entgeltmechanismen, die Weiterentwicklung eines zukunftsfähigen Strommarktmodells sowie die Sicherstellung wirksamer Anreizsysteme für Flexibilität, Effizienz und netzdienliches Verhalten. Ziel ist es, ein robustes, effizientes und innovationsfreundliches Marktdesign zu schaffen, das die Integration erneuerbarer Energien unterstützt und die Versorgungssicherheit langfristig gewährleistet.

Der Transformationspfad beginnt im Jahr 2025 mit der Untersuchung der technischen und regulatorischen Umsetzbarkeit alternativer, fairer Preisstrukturen. Im Fokus stehen dabei Konzepte wie Strompreiszonensplits, nodale Bepreisung sowie dynamische Netzentgelte in Kombination mit dynamischen Strompreisen. Diese Ansätze werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf Effizienz, Systemstabilität und Investitionsanreize analysiert und bewertet.

Diese Untersuchungen führen ab 2025 zur Entwicklung funktionsfähiger Markt- und Preissignale für die Energiewende. Markt- und Preisstrukturen setzen dabei wirksame Anreize für Flexibilität, Effizienz und netzdienliches Verhalten und ermöglichen eine systematischere Steuerung von Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im Energiesystem.

Parallel dazu wird die Zukunftsfähigkeit und Verlässlichkeit des Strommarktmodells erprobt. Dabei steht die Frage im Mittelpunkt, wie ein stabiler, investitionssicherer und gleichzeitig flexibler Marktmechanismus unter den Bedingungen eines zunehmend erneuerbaren Energiesystems ausgestaltet werden kann.

Diese Entwicklungen führen bereits im Jahr 2025 zu einer zunehmend bezahlbaren, sicheren und effizienten Energieversorgung. Energie steht zuverlässig zur Verfügung, ist wirtschaftlich tragfähig und wird schrittweise klimaneutral bereitgestellt.

Gleichzeitig bilden diese Fortschritte die Grundlage für das übergeordnete Ziel einer bezahlbaren, resilienten und souveränen Energieversorgung. Das Energiesystem ist klimaneutral, wirtschaftlich stabil, krisenfest organisiert und strategisch abgesichert.

5.7. Zwischenfazit

Insgesamt zeigt die Roadmap des Fokusfeldes Netzintegration, dass die Transformation des Energiesystems ein langfristiger und systemischer Entwicklungsprozess ist. Die dargestellten Transformationspfade verdeutlichen die technologischen, infrastrukturellen und regulatorischen Entwicklungen, die gemeinsam zu einem intelligenten, flexiblen und resilienten Energiesystem beitragen. Erst durch das Zusammenspiel von Netzbetrieb,

Digitalisierung, Speicherintegration, Sektorenkopplung und geeigneten Marktmechanismen kann eine klimaneutrale, sichere und bezahlbare Energieversorgung langfristig gewährleistet werden.

6. Handlungsoptionen

Aus Sicht der Roadmap ergibt sich für Schleswig-Holstein ein klarer Handlungsrahmen, um die Netzintegration als zentrale Voraussetzung einer klimaneutralen Energieversorgung bis 2040 erfolgreich zu gestalten. Im Mittelpunkt steht zunächst der Aufbau eines integrierten Energiesystems, in dem Strom-, Wärme-, Wasserstoff- und Mobilitätsinfrastrukturen nicht länger isoliert betrachtet, sondern systemisch geplant und betrieben werden. Hierfür sollte das Land sektorübergreifende Planungsprozesse stärken und die Abstimmung zwischen Netzbetreibern, Kommunen, Industrie und Wissenschaft weiter intensivieren.

Gleichzeitig sollte Schleswig-Holstein seine Rolle als Vorreiter der Energiewende nutzen, um innovative Lösungen für ein zunehmend dezentrales und volatiles Energiesystem zu entwickeln und im großtechnischen Maßstab zu erproben. Reallabore und Demonstrationsprojekte sollten gezielt dazu beitragen, intelligente Netzbetriebsstrategien, sektorübergreifende Flexibilitätsoptionen sowie den Einsatz digitaler Technologien unter realen Bedingungen zu testen und wissenschaftlich zu begleiten.

Ein wesentlicher Hebel liegt dabei in der Digitalisierung der Energienetze. Der Ausbau einer leistungsfähigen Daten- und Kommunikationsinfrastruktur, die Entwicklung standardisierter Datenräume sowie interoperabler Schnittstellen schaffen die Grundlage für ein intelligentes Netzmanagement. Gleichzeitig sollten Methoden der Künstlichen Intelligenz und digitale Zwillinge gezielt genutzt werden, um Netzengpässe frühzeitig zu erkennen, Betriebsmittel effizient einzusetzen und Investitionsentscheidungen datenbasiert zu unterstützen.

Darüber hinaus sollte die Energiewende stärker als Flexibilitätsaufgabe verstanden werden. Neben dem notwendigen Netzausbau gilt es, vorhandene Infrastrukturen durch intelligente Betriebsführung besser auszulasten. Speichertechnologien, Lastmanagement, bidirektionales Laden sowie die sektorübergreifende Nutzung von Flexibilitäten sollten regulatorisch und wirtschaftlich so ausgestaltet werden, dass sie einen gleichwertigen Beitrag zur Netzstabilität leisten können.

Gleichzeitig ist es erforderlich, regulatorische Rahmenbedingungen und Planungsprozesse an die Anforderungen eines integrierten Energiesystems anzupassen. Genehmigungs- und Abstimmungsverfahren sollten beschleunigt, Standardisierungsprozesse vorangetrieben und Anreizsysteme geschaffen werden, die netzdienliches Verhalten sowie die sektorübergreifende Nutzung von Flexibilitäten fördern. Insbesondere die Verteilnetze

sollten stärker in den Fokus rücken, da sie den überwiegenden Teil der dezentralen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen integrieren.

Neben Infrastruktur und Regulierung kommt der Energiewendeforschung eine zentrale Rolle zu. Schleswig-Holstein sollte seine wissenschaftlichen Kompetenzen im Bereich der Netzintegration gezielt ausbauen und den Wissenstransfer zwischen Forschung, Netzbetreibern, Industrie und Politik weiter stärken. Die kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung der Transformation ermöglicht es, Zielkonflikte frühzeitig zu identifizieren, neue Betriebs- und Marktmechanismen zu entwickeln und evidenzbasierte Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung des Energiesystems abzuleiten.

Insgesamt ergibt sich daraus ein integrierter Handlungsansatz, bei dem Schleswig-Holstein seine Stärken im Ausbau erneuerbarer Energien konsequent nutzt und die Netzintegration als verbindendes Element der Energiewende versteht. Durch intelligente Infrastruktur, digitale Technologien, sektorübergreifende Zusammenarbeit und eine enge Verzahnung von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik kann das Land seine Rolle als Modellregion für ein resilientes, flexibles und klimaneutrales Energiesystem weiter ausbauen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Fokusfeld-Roadmap Netzintegration zeichnet sich insbesondere durch ihren systemischen Charakter aus. Die Integration erneuerbarer Energien erfordert nicht nur den Ausbau der Netzinfrastruktur, sondern vor allem deren intelligente Weiterentwicklung zu einem sektorengekoppelten, flexiblen und digital gesteuerten Energiesystem. Zahlreiche Forschungsbedarfe lassen sich dabei in Reallaboren der Energiewende in Schleswig-Holstein erproben. Dies reicht von innovativen Netzbetriebsstrategien und Flexibilitätsmechanismen über digitale Planungs- und Steuerungswerkzeuge bis hin zur Integration von Strom-, Wärme-, Wasserstoff- und Mobilitätsinfrastrukturen. Die wissenschaftliche Begleitung dieser Demonstrationsvorhaben ermöglicht es, technologische Entwicklungen unter realen Bedingungen zu validieren und Erkenntnisse für die Übertragung auf andere Regionen zu gewinnen.

Die Roadmap des Fokusfeldes Netzintegration im Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung zeigt, dass die Transformation des Energiesystems nur durch ein enges Zusammenspiel aus leistungsfähiger Infrastruktur, intelligentem Netzbetrieb, geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen und einer konsequenten Digitalisierung gelingen kann. Zentrale Hebel sind dabei die sektorübergreifende Planung von Energieinfrastrukturen, die Nutzung von Flexibilitätsoptionen, der Ausbau standardisierter Daten- und Kommunikationsstrukturen sowie die enge Verzahnung von Wissenschaft, Netzbetreibern, Wirtschaft und Politik.

Diese Roadmap wurde durch die intensive Mitwirkung der Wissenschaftscommunity in Schleswig-Holstein erarbeitet. Ergänzend zu den Workshops zur Identifikation und Priorisierung der Forschungsbedarfe wurde eine Analyse der wissenschaftlichen Publikationen der vergangenen fünf Jahre mittels der Methode „Circular Tree Map“ (vgl. übergeordnete Roadmap) durchgeführt. Die Ergebnisse dienten dazu, bestehende Forschungsschwerpunkte sichtbar zu machen, Forschungslücken zu identifizieren und die in den Workshops entwickelten Inhalte wissenschaftlich zu fundieren und zu validieren.

Ausblick

In den kommenden Jahren wird es entscheidend sein, die Netzintegration als zentrales Bindeglied der Energiewende konsequent weiterzuentwickeln. Neben dem notwendigen Ausbau der Energieinfrastruktur rücken die intelligente Nutzung bestehender Netze, die Digitalisierung des Energiesystems sowie die sektorübergreifende Koordination unterschiedlicher Infrastrukturen zunehmend in den Mittelpunkt. Gelingt es, Flexibilitäten systematisch zu erschließen, regulatorische Hemmnisse abzubauen und innovative Technologien in den großskaligen Einsatz zu überführen, kann Schleswig-Holstein seine Vorreiterrolle als Modellregion für ein integriertes, resilientes und klimaneutrales Energiesystem weiter ausbauen. Die kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Netzbetreibern und Politik bildet hierfür eine wesentliche Voraussetzung und wird auch die zukünftige Fortschreibung der Roadmap maßgeblich prägen.

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.

8. Anhang

Die Forschungs-Roadmap für das Fokusfeld Netzintegration

Verfügbar auf https://www.eksh.org/forschung/landeskompetenzzentrum-energiewendeforschung/netzintegration

9. Impressum

Herausgeber:

Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung bei der EKSH

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt:

Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung bei der EKSH

Stand: November 2026

Energiewendeforschungs-Roadmap Netzintegration

für das Land Schleswig-Holstein

Stand: August 2026

Arbeitsdokument

Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung

EK SH
Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein

Impact — Impact und gesellschaftliche Missionen

Outcome — Wirkungsebene in Sektoren und Anwendungen

Output — Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse

Input — Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Grundlegende Anerkennung von Versorgungssicherheit und Resilienz als zentrale Ziele
Ein sicheres und resilientes Energiesystem gilt als zentrale Voraussetzung der Transformation.

Klimaneutrales Industrieland Schleswig-Holstein
Intelligente systemdienliche und flexible Netzintegration bildet die Grundlage eines klimaneutralen Energiesystems.

Bezahlbare, sichere und effiziente Energieversorgung
Energie ist zuverlässig, bezahlbar und zunehmend klimaneutral verfügbar.

Priorisierung von Netzausbau vor Abschaltung
Der Netzausbau wird fokussiert, sodass Abschaltungen möglichst vermieden werden. Der Netzausbau schließt neben der Stromnetzinfrastruktur auch Speicher, Flexibilitäten und den digitalen Netzausbau ein.

Stromversorgung vollständig durch erneuerbare Energie
Die Stromversorgung erfolgt vollständig durch Erneuerbare Eergie Erzeugung (Wind, PV und Biomasse)

Priorisierung von Intelligenter Netzauslastung gegenüber Netzausbau
Der weitere Netzausbau kann durch Priorisierung von intelligenter Netzauslastung reduziert werden.

Klare Impulse für langfristige Investments
Klare, stabile (Preis-) Impulse sorgen für Planungssicherheit und langfristige Investitionen.

Geschlossenes CO2-Management und Kreislaufführung
Unvermeidbare Emissionen werden systematisch erfasst, genutzt oder dauerhaft gespeichert.

Integriertes Wasserstoffsystem und internationale Einbindung
Wasserstoff ist systemisch integriert und international wirtschaftlich eingebunden.

Bezahlbare, resiliente und souveräne Energieversorgung
Energie ist klimaneutral, bezahlbar, krisenfest und strategisch abgesichert.

Zukunftsfähigkeit und Verlässlichkeit des (Strom-) Marktmodells
Die Zukunftsfähigkeit und Verlässlichkeit des Strommarktmodells ist erprobt.

Nachvollziehbare, transparente und effiziente Planungsverfahren
Planungsverfahren sind nachvollziehbar, transparent und effizient.

Power-to-X
Die Erzeugung von Wasserstoff und Derivaten dient der langfristigen Energiespeicherung und der stofflichen Nutzung.

Anpassung der Anforderung an zuverlässige Systeme
Für die Anforderungen an zuverlässige Systeme wird zwischen Redundanz und Resilienz unterschieden und je nach Einsatzart, -ort abgewogen.

Angepasstes Nutzungsverhalten
Das Nutzungsverhalten passt sich durch Anreize wie dynamische Stromtarife an, sodass Strom bei günstigen oder negativen Strompreisen vermehrt genutzt wird.

Sektorgekoppelte Netze verfügbar
Das Energiesystem besteht aus sektorgekoppelten Netzen bestehend aus Strom-, Wärme- und Wasserstoffnetzen, die durch Wärmepumpen, Elektrolyseure und Brennstoffzellen miteinander gekoppelt sind.

Funktionsfähige Markt- und Preissignale für die Energiewende
Markt- und Preisstrukturen setzen wirksame Anreize für Flexibilität, Effizienz und netzdienliches Verhalten.

Digital steuerbares und effizientes Energiesystem
Das Strom- und Energiesystem ist datenbasiert transparent,flexibel steuerbar und systemeffizient betreibbar.

Datenschutz und Cybersecurity Systeme
Die digitale Infrastruktur des Energiesystems ist resilient.

Betriebsführung modularer Systeme und Betriebsmittel
Die Betriebsführung modularer Systeme und Betriebsmittel ist erprobt und in das Energiesystem integriert.

Digitaler, adaptiver und dezentraler Netzbetrieb
Netze sind auf hohe Dezentralität, neue Betriebslogiken und digitale Steuerung ausgelegt.

Hochflexibel in Betrieb und Infrastruktur
Der Betrieb und die Infrastruktur des Stromnetzes ist hochflexibel.

Integrierte, flexible und resiliente Energiesysteme
Energiesysteme sind sektorübergreifend integriert, hochflexibel und robust gegenüber Volatilitäten.

Vollständig erneuerbares und effizientes Energiesystem
Energieversorgung basiert vollständig auf erneuerbaren Quellen und ist systemisch effizient organisiert.

Resiliente, robuste und ausfallsichere Energiesysteme
Energiesysteme sind robust gegenüber Störungen, Extremereignissen und systemischen Risiken.

Klimaneutrale Mobilität und flächeneffiziente Raumplanung
Mobilität und Raumplanung sind klimaneutral, integriert und ressourcenschonend organisiert.

Integrierte, sektorgekoppelte und netzebenen-übergreifenden Stromnetzplanung
Entwicklung von Tools zur integrierten, sektorgekoppelten und netzebenen-übergreifenden Stromnetzplanung

Optimierung der Positionierung und Dimensionierung von Batteriespeichern
Entwicklung von Tools zur Optimierung der geografischen Positionierung und der Dimensionierung von Batteriespeichern im Netz

Offene Daten und transparente Ergebnisse zur Zukunft unseres Energiesystems und der dazugehörigen Infrastruktur
Transparenter Umgang mit und Bereitstellung von Daten, ohne kritische Infrastruktur offenzulegen

Stabilität LE-dominante Netze
Untersuchung der Stabilität Leistungselektronik dominierter Netze

Leistungs-elektronische Systeme & betriebsinnovation im Netz
Erprobung innovativer leistungseselektronischer Systeme, wie Solid State Transformer, im Netzbetrieb

MV/LV DC Systeme und Netzbetrieb
Praxistest von DC-Systemen wie MV-DC- oder LV-DC-Links im Netzbetrieb

Betrieb autonomer/ unabhängiger Teilnetze (Mikronetze / Teilnetze)
Erprobung autonomer Teil- bzw. Mikronetze in der Fläche

Rückfallebenen bei Kommunikations-ausfall
Erprobung von Rückfallebenen, um die digitale Kommunikationsinfrastruktur des Energiesystems abzusichern

Sektorintegrierte Energieübertragung
Erprobung neuer, sektorintegrierter Energieübertragungssysteme, wie beispielsweise Supraleitungen

Integration neuer Speichertechnologien (u.a. NA-Ionen) im MWh Bereich
Integration neuer Speichertechnologien, wie Na-Ionen Batteriespeicher, im MWh Bereich

Umsetzbarkeit alternativer, fairer Preisstrukturen
Untersuchung der tech. und regulatorischen Umsetzbarkeit von Strompreiszonensplit, nodaler Bepreisung und dynamischen Netzentgelten in Kombination mit dyn. Strompreisen

Netzbildende Stromrichter
Untersuchung netzbildender Stromrichter im Betrieb

Zunehmende Netzautomation (auch durch adaptive Schutz- und Leittechnik)
Untersuchung zu selbstkonfigurierenden Teilnetzen für einen effizienten Netzbetrieb und Weiterentwicklung der Adaptivität von Schutz- und Leittechnik

Definitition und Erprobung Systemdienlicher Nutzung von Flexibilitäten
Definition & Identifikation Systemdienlicher Fahrweisen und deren optimale finanzieller und sicherer Nutzung

Leistungs-elektronische Schutzeinrichtungen
Pilotierung leistungselektronischer Schutzeinrichtungen zur Sicherstellung der Spannungs- und Frequenzstabilisierung

Auslastungsmaximierung auf MS-Ebene
Erprobung der Auslastungsmaximierung auf Mittelspannungsebene

Überlastfähigkeit auf NS-Ebene
Überprüfung der Überlastfähigkeit auf Niederspannungsebene untersucht

Priorisierung von Netzanschlüssen für Industrie bei der Dekarbonisierung
Netzanschlüsse werden priorisiert, wenn sie der Dekarbonisierung der Industrie dienen.

Bildungsinfrastruktur
Die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften für den Bereich der elektrischen Netze, von Speichertechnologien und die Forschung ist gegeben.

Flexible Connection Agreement (FCA)
Flexible Anschlussverträge werden für (Groß-) Verbraucher umgesetzt.

Status quo — **heute** — **bis 2030** — **bis 2035** — **bis 2040**

Hinweis: Innerhalb der Blöcke besteht keine zeitliche Reihenfolge.

- Systemstabilität & Betriebsführung
- Digitalisierung & IT-Sicherheit
- Sektorenkopplung & Netzdienlichkeit
- Erneuerbare & Speicherintegration
- Netzarchitekturen & Technologien
- Marktdesign & regulatorische Rahmenbedingungen

Erstellt in Zusammenarbeit mit:
INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK

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