Arbeitspapier

Energiewendeforschungs-Roadmap

für das Land Schleswig-Holstein

Leistungselektronik & Batteriespeicher

Transformationspfade zur Klimaneutralität 2040

Version 1.0 | 20. Oktober 2026

Inhalt

1. Executive Summary 2
2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap 3
3. Methodik „Visual Roadmapping“ 5
   3.1. Die vier Dimensionsebenen 6
   3.2. Hinweise zum Verfahren der systematischen Erstellung 7
   3.3. Transformationspfade 8
   3.4. Delphi-Methode 8
4. Die vier Dimensionsebenen 9
   4.1. Ebene Input 9
   4.2. Ebene Output 10
   4.3. Ebene Outcome 15
   4.4. Ebene Impact 19
   4.5. Zusammenfassung 21
5. Transformationspfade 22
   5.1. Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbarer Energie 23
   5.2. Mobilität und maritime Anwendungen 23
   5.3. Industriesysteme 24
   5.4. Haushalte 24
   5.5. Extra: Transformation des Maritimen Sektors 25
   5.6. Zwischenfazit 26
6. Handlungsoptionen 28
7. Zusammenfassung und Ausblick 30
8. Danksagung 31
9. Impressum 33
10. Anhang: Grafische Darstellung 34

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

1. Executive Summary

Das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung bei der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) begleitet Schleswig-Holstein wissenschaftlich auf dem Weg zur Klimaneutralität 2040. Mit der Energiewendeforschungs-Roadmap werden Forschungsbedarfe systematisch identifiziert, zeitlich eingeordnet und mit den Perspektiven von Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft verknüpft. Die Roadmap schafft damit einen gemeinsamen Orientierungsrahmen für die Ausrichtung der Forschung, die Schwerpunktsetzung an Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie die Weiterentwicklung von Fördermaßnahmen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene.

Die Themen der Energiewende sind in sieben Forschungsbereiche gegliedert, die im Folgenden als Fokusfelder bezeichnet werden. Die vorliegende Roadmap für das Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher zeigt den wissenschaftlichen und technologischen Beitrag dieses Forschungsfeldes zur Transformation der Energiesysteme bis 2040. Sie wurde in einem partizipativen Prozess unter Beteiligung der Forschenden aus Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Schleswig-Holstein entwickelt und wird als dynamisches Arbeitsdokument kontinuierlich weiterentwickelt. Im Mittelpunkt stehen die möglichen Transformationspfade für die Anwendungsbereiche der Transformation.

Die zentrale Erkenntnis dieser Roadmap ist, dass Leistungselektronik & Batteriespeicher Querschnitts- und Schlüsseltechnologien der Energiewende und Enabler der Transformation aller Sektoren sind. Die zunehmende Elektrifizierung aller Sektoren erfordert leistungsstarke, effiziente, sichere, robuste, intelligente und nachhaltige Komponenten und Systeme. Leistungselektronik ermöglicht die Integration von Erzeugern, Speichern und Verbrauchern in ein zunehmend volatiles Stromsystem. Batteriespeicher schaffen die notwendige Flexibilität und tragen zur Stabilisierung der Netze bei. Damit bilden beide Technologien eine wesentliche technologische Grundlage für ein klimaneutrales, resilientes und wirtschaftlich tragfähiges Energiesystem.

Die Transformationspfade zeigen, dass Forschung und Innovation der breiten Anwendung zeitlich vorausgehen müssen. Heute stehen insbesondere die Entwicklung und Anwendung hocheffizienter Wide-Bandgap-(WBG)-Leistungselektronik auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) sowie neuer Batterietechnologien (Natrium-Ionen und Festkörperbatterien), intelligenter Batteriemanagementsysteme (BMS) und netzbildender Umrichter und Speicher im Vordergrund. Bis 2035 werden diese Technologien weiter skaliert. WBG Halbleiter verdrängen zunehmend Silizium-Leistungshalbleiter, Sie erfahren eine breite Anwendung in der Netzintegration, in der Industrie, in Gebäuden, im Bereich Mobilität und in maritimen Anwendungen. Bis 2040 entwickeln sich daraus zunehmend integrierte Energiesysteme mit WBG-Leistungselektronik, Gleichstrom-(DC)- und Hochspannungs-Gleichstrom-(HVDC)-Netzen, netzdienlichen Großspeichern, bidirektionalem Laden und hybriden Batterie-, Wasserstoff- und Leistungselektroniksystemen. Parallel dazu werden neue Technologiepfade wie Festkörper-, Natrium-Ionen-, Redox-Flow- und perspektivisch Ultra-WBG-Technologien vorbereitet.

Leistungselektronik & Batteriespeicher sind die Schlüsseltechnologien der zukünftigen Energiesysteme. Eine strategische Stärkung dieses Fokusfeldes ist daher eine wesentliche Voraussetzung dafür, die Energiewende in Schleswig-Holstein technisch und wirtschaftlich erfolgreich umzusetzen und das Ziel eines klimaneutralen, resilienten und wettbewerbsfähigen Industrielandes Schleswig-Holstein 2040 zu erreichen.

2. Hintergrund und Zielsetzung der Roadmap

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 alle Bereiche des Lebens – Energieversorgung, Industrie, Mobilität, Gebäude und Haushalte dekarbonisiert werden. 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.

Das Landeskompetenzzentrums Energiewendeforschung bei der EKSH hat unter Einbezug aller Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Schleswig-Holstein eine übergeordnete Energiewendeforschungs-Roadmap sowie weitere spezifische Roadmaps für die sieben Fokusfelder im Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung erarbeitet. Aufbauend auf der übergreifenden Roadmap wurden im Rahmen des Prozesses die wesentlichen Beiträge identifiziert, die die einzelnen Forschungsfelder zum Gelingen der Transformation leisten müssen.

Dieses Dokument enthält die Energiewendeforschungs-Roadmap für das Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher für Schleswig-Holstein bis zum Jahr 2040. Sie enthält das Expertenwissen der in Schleswig-Holstein im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher tätigen Forschungscommunity. In Kapitel 6 wird auf die Verknüpfungen zur übergeordneten Roadmap eingegangen. Vertiefende Informationen über die anderen Roadmaps sind auf der Homepage der EKSH zu finden.

Die Roadmaps dienen als Orientierungshilfe und strategische Vorausschau, um die komplexen Transformationsprozesse in den verschiedenen Teilbereichen bis zum Jahr 2040 strukturiert betrachten zu können. Neben dem Aufzeigen von Transformationspfaden für notwendige Entwicklungen zeigen die Roadmaps die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Themenfeldern auf und stellen langfristige Zielbilder in direkte Beziehung zu heutigen Entscheidungen. Das Roadmapping hilft, die hohe Komplexität der Energiewende handhabbar zu machen, ohne sie unzulässig zu reduzieren. Es zeigt auf, welche Entwicklungen zeitlich aufeinander aufbauen und wo kritische Abhängigkeiten bestehen. Zudem macht es den unverzichtbaren Beitrag der wissenschaftlichen Forschung sichtbar, der erforderlich ist, um ambitionierte politische Zielsetzungen in real umsetzbare Entwicklungspfade zu überführen.

Die Roadmaps dienen den Forschenden zur Ausrichtung ihrer Forschung, den Hochschulpräsidien zur Schwerpunktsetzung und der Energiepolitik, Wirtschaft und Gesellschaft zur Orientierung auf dem Weg zur Transformation.

Die Arbeiten für die Forschungs-Roadmap im technologischen Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher starteten im Frühjahr 2025 mit einer Umfrage unter den Forschenden im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher zu den aktuellen Fragestellungen für die Energiewende in Schleswig-Holstein. Es folgte ein Workshop im Sommer 2025, in dem Projektideen zu aktuellen Fragestellungen erarbeitet wurden. Ergänzend dazu wurden die entwickelten Themen mit Hilfe der Methodik der „Circular Tree Map“ analysiert und validiert.

Im März 2026 erfolgten zwei Workshops, in denen die Forschungs-Roadmap im Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher erstellt wurden. Dazu haben die Forschenden die eine vom Institut für Innovation und Technik (iit) in Berlin empfohlene Methodik mit der IOOI-Logik angewandt. Die Methode wird ausführlich im Kapitel 3. Methodik beschrieben. Diese Erarbeitungen dienen als Grundlage für die hier vorliegenden Ausführungen und Priorisierungen. Zusätzlich zur Aufstellung der Roadmap wurden im anschließenden Bearbeitungsprozess Transformationspfade für die verschiedenen Anwendungsbereiche eingezeichnet. Sie führen über die Roadmap hinweg bis zur vollständigen Transformation der Energiesysteme. Die Roadmap ist als ein Arbeitsdokument angelegt, das in diesem Sinne durch in einen iterativen Prozess von den Forschenden kontinuierlich aktualisiert und fortgeschrieben wird.

Außerdem verfolgt sie das Ziel, Fördermittel nach Schleswig-Holstein zu leiten, indem die Förderkulisse auf Bundes- und EU-Ebene durch Aufzeigen der Forschungsbedarfe dahingehend gestaltet wird, dass diese weitgehend in Förderprogramme einfließen. Der Landesförderfonds Energiewendeforschung (LEF) ist das Förderinstrument im Landeskompetenzzentrum, und hat bis zum jetzigen Zeitpunkt 22 Projekte in Schleswig-Holstein in einer Vielzahl von unterschiedlichen Bereichen der Energiewende ermöglicht. Somit adressieren diese Projekte bereits Forschungsbedarfe, die für das Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2040 erfüllt sein müssen.

Das Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher steht für Technologien, die für die Transformation aller Energiesysteme essenziell sind. Der thematische Schwerpunkt der vorliegenden Roadmap liegt daher auf der Bereitstellung der nötigen leistungselektronischen und batterietechnologischen Entwicklungen, Komponenten und Systeme, um die Transformation der Energiesysteme erfolgreich umzusetzen – als Enabler der Energiewende.

Hinweis zum Charakter der Veröffentlichung

Diese Energiewendeforschungs-Roadmap stellt eine wissenschaftlich begründete Einschätzung auf Basis des zum Zeitpunkt der Veröffentlichung verfügbaren Wissensstandes dar. Die dargestellten Positionen, Einschätzungen und Schlussfolgerungen geben nicht notwendigerweise die individuellen Auffassungen aller beteiligten Forschenden, Institutionen oder Fördermittelgeber wieder. Wissenschaftliche Erkenntnisse unterliegen einem kontinuierlichen Erkenntnisfortschritt; die Inhalte dieser Roadmap können daher künftig ergänzt, aktualisiert oder fortgeschrieben werden.

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. Dabei werden entlang einer Zeitachse vier kohärente, parallel verlaufende Dimensionsebenen – Input, Output, Outcome, Impact (IOOI)– betrachtet.

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

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.

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

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 speifische Anforderungen des Fokusfeldes Leistungselektronik & Batteriespeicher als auch förderpolitische Ausprägungen und Calls aus Land, Bund und EU. Im Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher werden hier häufig regulatorische Anforderungen und Normvorgaben, aber auch gesellschaftliche Einstellungen zu den Folgen eines elektrifizierten Energiesystems genannt.

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 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.

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-Hol-

stein. Sie zeigt, wie sich aus technologischen, institutionellen und sozialen Veränderungen eine neue klimaneutrale Normalität in entwickelt. Forschung leistet dabei einen zentralen Beitrag, indem sie Wirkungen nachvollziehbar macht, Zielkonflikte sichtbar hält und belastbare Grundlagen für Entscheidungen schafft. Auf dieser Basis kann sich Schleswig-Holstein als wettbewerbsfähiger, klimaneutraler Industrie-, Energie- und Wirtschaftsstandort etablieren, der Bezahlbarkeit, Resilienz und ökologische Verantwortung dauerhaft miteinander verbindet.

3.2. Hinweise zum Verfahren der systematischen Erstellung

Im Fokusfeld „Leistungselektronik & Batteriespeicher" wurden während des Roadmapping-Prozesses die Felder der Ebenen Output und Outcome systematisch mit Inhalten gefüllt. Dabei betrachteten die Forschenden jeweils drei unterschiedliche technologische Ebenen – von der System- über die Modul- bis zur Chipebene – sowie die verschiedenen Anwendungsfelder der Transformation:

- Energiesysteme, Netze und Energieerzeugung
- Energiespeichersysteme, Batteriespeicher
- Sektorkopplung, Wasserstoff
- Industriesysteme, Haushalte, Wärme
- Mobilität.

In einem weiteren Schritt wurden die Eingaben der Forschenden sortiert, in Relation zueinander gebracht und schließlich in das vom IIT vorgegebene Darstellungsformat mit maximal je acht Kacheln in jedem Feld überführt.

Die systematische Bearbeitung der Fragestellungen spiegelt sich auch in der finalen Darstellung wider, sodass in jedem Feld der Ebenen Output und Outcome eine gleiche thematische Anordnung der Kacheln erfolgte. Die erste Kachel links oben im Feld fasst das gesamte Feld zusammen, die Kacheln daneben und darunter benennen die technologischen Entwicklungen im Bereich Leistungselektronik und Batteriespeicher. Die restlichen fünf Kacheln beschreiben notwendige Entwicklungen in den Anwendungsbereichen Stromnetze, Energiespeicher, Industrie, Haushalte und Gebäude sowie Mobilität (inklusive des maritimen Sektors).



3.3. Transformationspfade

Im Prozess der systematischen Bearbeitung der Roadmap wurden zentrale Transformationspfade für die verschiedenen Anwendungsbereiche in die Roadmap eingezeichnet. Sie zeigen auf, wie wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen schrittweise zur Erreichung der Klimaneutralität Schleswig-Holsteins 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.

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.

3.4. Delphi-Methode

Das lernende Vorgehen des Abgleichs der Themen rund um die entwickelten Roadmaps orientierte sich grundsätzlich an den methodischen Leitlinien des Roadmappings. Als die Notwendigkeit erkannt wurde, die Inhalte der verschiedenen Roadmaps zur Energiewendeforschung in Schleswig-Holstein voneinander profitieren zu lassen und die Themen abzugleichen, wurde es durch Elemente der Delphi-Methode unterstützt. Die Strukturierung in mehrere (teils digitale) Diskussionsrunden mit Forschenden als Expertinnen und Experten ermöglichte es, Erkenntnisse schrittweise zu verdichten und Annahmen kontinuierlich zu überprüfen. Die inhaltlichen Abgleiche zwischen der übergeordneten Roadmap und den Roadmaps der Fokusfelder waren ursprünglich nicht als eigenständiger methodischer Schritt vorgesehen. Vielmehr zeigte sich im Verlauf der Workshops und Auswertungen, dass ein zusätzliches Instrument erforderlich war, um die in der allgemeinen Roadmap identifizierten Forschungsprioritäten konsistent mit den in den Fokusfeldern entwickelten Inhalten abzugleichen und die Themen zu präzisieren.

4. Die vier Dimensionsebenen

Die Energiewendeforschungs-Roadmap Schleswig-Holstein strukturiert die wissenschaftlichen Beiträge zur Klimaneutralität entlang von sieben Fokusfeldern, die unterschiedliche, aber komplementäre Funktionen im Gesamtsystem der Energiewende erfüllen.

Ausgehend vom heutigen Stand bis zur angestrebten Zukunftsperspektive im Jahr 2040 wird die Roadmap entlang einer Zeitachse in Fünf-Jahres-Schritten entwickelt. Der Transformationsprozess wird dabei in vier parallel verlaufende, aufeinander abgestimmte Dimensionsebenen gegliedert, die die Dynamiken der Forschungsprozesse und der gesellschaftlichen Transformation erfassen. Der Weg verläuft von den regulatorischen Rahmenbedingungen (untere Ebene Input) über die wissenschaftlich notwendigen Erkenntnisse (Ebene Output) und die sich daraus ergebenden technologischen Anwendungen (Ebene Outcome) bis hin zu den langfristigen Wirkungen der Transformation in der Gesellschaft (obere Ebene Impact).

4.1. Ebene Input

Gesellschaftliche, politische und institutionelle Rahmenbedingungen

Die untersten Ebene „Input“ enthält die in dem jeweiligen Zeitfenster nötigen und noch zu erfüllenden Voraussetzungen auf gesellschaftlicher, politischer und institutioneller Ebene, um die weiteren Schritte auf dem Weg zur Klimaneutralität gehen zu können.

Erster Zeitabschnitt „Status Quo“

- Umsetzungsfähige Geschäfts- und Akteursmodelle

Als Voraussetzung für alle weiteren Entwicklungen bedarf es aus Sicht der Forschenden umsetzungsfähige Geschäfts- und Akteursmodelle, damit eine breitenwirksame und nachhaltige Transformation möglich ist. Diese sollten im besten Fall auf die Bedürfnisse der handelnden Akteure ausgerichtet sein. Diese Voraussetzung ist der Startpunkt für den Transformationspfad der Industriesysteme (siehe Kapitel 5.3).

Heute bis 2030

- Preis-, Anreiz- und Marktregeln des Energiesystems

Es braucht ökonomische verlässliche Rahmenbedingungen, die konsistente Anreize für klimaneutrale Entscheidungen bieten.

- Akzeptanz für die Elektrifizierung aller Bereiche

Die zunehmende Elektrifizierung von Mobilität, Wärmeversorgung, Industrie und weiteren Verbrauchssektoren erfordert neben technologischen Lösungen auch eine breite gesellschaftliche und wirtschaftliche Akzeptanz.

- Wissens-, Fachkräfte- und Innovationsinfrastruktur

Personelle, akademische und unternehmerische Kapazitäten für Transformation sind institutionell in Schleswig-Holstein bis zum Jahr 2030 verankert. Diese sind insbesondere eine zentrale Voraussetzung für die Entwicklung von Innovationen (Ebene Outcome) und deren Umsetzung in die Industrie (Ebene Output).

- Dynamische Netzentgelte

Aus Sicht der Forschenden bedarf es einer einheitlichen Regulation, die die technische Umsetzung zur Verwendung von dynamischen Netzentgelten sicherstellt. Dies betrifft den gesamten Prozess der Transformation hin zur Klimaneutralität in Schleswig-Holstein im Jahr 2040.

2030 bis 2040

- Verbindliche Regulierung und technische Betriebsstandards

Es bedarf regulatorischer Vorgaben und technischer Standards bis spätestens 2040, damit ein sicher, effizienter und flexibler Systembetrieb ermöglicht wird. Dies betrifft insbesondere die Netzinfrastruktur und den Transformationspfad Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbarer Energie (siehe Kapitel 5.5).

- Batteriespeicher

Es bedarf eine Regulatorik für die Energiespeicherung Das Regelwerk für die Speicherung von Energie muss bis spätestens 2040 definiert sein.

4.2. Ebene Output

Der wissenschaftliche Beitrag zur Klimaneutralität: 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 (Ebenen Outcome und Impact).

Hinweis: Diese und die folgende Ebene „Outcome" enthalten systematisch aufgebaute Zeitfelder. Sie sind mit einer wiederkehrenden thematischen Anordnung der Kacheln versehen (siehe Kapitel 3.2). In den nachfolgenden Unterkapiteln werden zunächst die drei rein technologischen Kacheln (Übersicht, Leistungselektronik und Batteriespeicher) und anschließend die fünf Kacheln der verschiedenen Anwendungsbereiche (Stromnetze, Energiespeicher, Industrie, Haushalte und Gebäude sowie Mobilität) beschrieben (siehe folgende Abbildung).



4.2.1. Technologische Entwicklungen im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher von heute bis 2040

Erster Zeitabschnitt „Status Quo“

- Innovationen im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher

Weiterentwicklung wissenschaftlicher Grundlagen hinsichtlich Effizienz und Leistungsfähigkeit.

- Industrie, Digitalisierung und Ressourcen

Wissenschaftliche Grundlagen zur Transformation energieintensiver, digitaler und ressourcenrelevanter Anwendungen.

Heute bis 2030

- Fokus: Leistungselektronik- und Batteriesystem-Innovationen

Entwicklung innovativer und kostengünstiger Leistungselektronik- und Speichertechnologien mit hohem Wirkungsgrad und hohen Leistungsdichten.

- Wide-Bandgap (WBG)- Leistungselektronik mit hohen Wirkungsgraden und hohen Leistungsdichten

Es werden neue, effiziente und vor allem robuste WBG-Leistungselektronik (auf Basis von Galliumnitrid, GaN und Siliziumkarbid, SiC) und Systemtopologien für den Niederspannungs-(NV)- und Mittelspannungs-(MV)-Bereich entwickelt (z. B. FACTS, MMC/CHB, SSTs). WBG-Leistungselektronik mit hohen Wirkungsgraden und Leistungsdichten

- Batteriespeicher: Neue Batteriezelltypen und 5r

Kostengünstige industrielle Fertigung, intelligente Batteriemanagementsysteme (BMS) und Konzepte für 5r (5r steht für reduce, reuse, repair, repurpose, recycle): Bessere Li-Ionen- (mit Si-Anoden), Na-Ionen- und Feststoff-Batterien und Entwicklung modularer Wechselakkus (z.B. f. Landwirtschaft).

2030 bis 2035

- Fokus: Weiterentwicklung von Leistungselektronik- und Batteriesystem-Innovationen

Steigerung Energiedichte, Leistungsdichte und neue Batteriezelltopologien mit neuen Materialen. Weiterentwicklung von Schlüsselkomponenten für die Energiesysteme aller Sektoren.

- Nachhaltige, kosteneffiziente, intelligente Leistungselektronik

Konzepte für nachhaltige, kostengünstige Produktion von LE-Komponenten. Weiterentwicklung von WBG-Halbleiter und Vorbereitung Ultra-WBG. Entwicklung LE f. Robotik, KI, Fusionskraftwerke.

- Batt: Hochleistungs- und Langzeit-Batteriespeicher

Weiterentwicklung von Natrium-Ionen-Batterien, Redox-Flow-, LFP-, wässrigen Metallspeicher und Festkörperbatterien (Solid-state batteries). Entwicklung von graphenen Superkondensatoren. KI-unterstützte EMS und BMS, sowie nachhaltige Produktion und Betrieb.

2035 bis 2040

- Zukunftsweisende Leistungselektronik

Entwicklung von LE-Systemen, die effizient, leistungsstark, langlebig, kostengünstig und nach haltig sind - bei Dominanz von WBG (SiC/GaN). Entwicklung von LE für Fusionskraftwerke. Einführung von Ultra-WBG Systemen (Diamand, Ga2O3).

- Innovative Batteriespeicher und Nachhaltigkeit

Entwicklung hybrider Batterien und Redox-Flow- und Eisen-Flow-Batterien (IFB) im vielfachen MWh-Maßstab. Festkörperbatterien gewinnen an Bedeutung. Batteriesystem sind nachhaltiger (5r: reduce, reuse, repair, repurpose, recycle).

4.2.2. Entwicklung der nötigen Innovationen für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Transformation

Anwendungsbereich: Erzeugung und Verteilung von erneuerbarer Energie

Heute bis 2030

- Schwarzstartfähige LE für stabile Netze

Entwicklung kosten günstiger Umrichter mit WBG (SiC/GaN), netzbildender Stromrichter (schwarzstartfähig) und netzstabilisierender, zuverlässiger LE, um Volatilität zu ermöglichen. Integration von DC-Netzen und netzstützenden Energiespeichern.

2030 bis 2035

- Energieerzeugung, -transport, vermaschte DC-Netze

Weiterentwicklung WBG Wechselrichter für Wind- und PV-Parks und LE Komponenten für Netze (z.B. SSTs, Schütze) sowie vermaschte DC-Netze. Technologien für Fusionskraftwerke.

2035 bis 2040

- EE-Erzeugung, -verteilung

Entwicklung von LE für standardisierte Einspeisesysteme mit WBG.

Anwendungsbereich: Speicherung von erneuerbarer Energie

Heute bis 2030

- Großspeicher, Elektrolyseure, Batterien BMS

Entwicklung effizienter LE und Umrichtersysteme für Elektrolyseure und Großspeicher mit WBG Halbleitern (SiC/GaN). Entwicklung Smart Battery Cells und intelligente Batteriemanagementsysteme (BMS) und Festkörperbatterien.

2030 bis 2035

- Großskalige Batteriesysteme und H2 für Industrie

Weiterentwicklung großskaliger Batteriesysteme aus Li-, Na- und Redox-Flow-Batterien für Großspeicher. Vorbereitung Festkörperbatterien für stationäre Speicher. LE für die industrielle Nutzung von Wasserstoff.

2035 bis 2040

- Speicherung erneuerbarer Energie

Integration neuer Speichertechnologien im vielfachen MWh-Bereich, z.B. Natrium-Ionen-Batterien.

Anwendungsbereich: Transformation der Industriesysteme

Heute bis 2030

- Effiziente Industriesysteme und KI-Rechenzentren

Entwicklung von spezifischenUmrichtern und Netzteilen für industrielle DC-Fertigungsnetze, KI-Rechenzentren, sowie Umrichter- / Antriebssystemen für Hochdruckpumpen, Kompressoren und Robotik.

2030 bis 2035

- Industriesysteme/ Prozesswärme: LE für Rechenzentren, Robotik

Entwicklung modularisierter LE für Rechenzentren und Fertigungsprozesse: Entwicklung effizienter Umrichter (für DC- und AC-Verteilung, auf NV- und MV-Ebene). LE für Robotik z. B. für humanoide Roboter.

2035 bis 2040

- Industriesysteme/ Prozesswärme

Leistungselektronik für industrielle Anwendungen: HV-Batteriespeichersysteme, hybride

Industrienetze auf DC-Basis, DC-backbone.

Anwendungsbereich: Transformation der Haushalte und Gebäudeversorgung

Heute bis 2030

- Wärmepumpen, Hausnetze, Geräte

Entwicklung effizienter Netzteile für Integration von Verbrauchern im Haushalt und Steuerbarkeit über Smart Meter Gateway, Pumpen und Antriebe für Wärmepumpen sowie Teil-DC-Netze in Haushalten, um Volatilität im Stromnetz zu verringern.

2030 bis 2035

- Haushalte / Wärme: Netzintegration

Integration der Hausnetze (PV, Batteriespeicher, Wärmepumpe, EV) in die Stromnetze via bidirektionale Wechselrichter (DCAC). Nutzung von E-Auto- und PV-Batterien zur Netzstabilisierung des Haus- und Stromnetzes.

2035 bis 2040

- Haushalte: Batteriespeicher

Entwicklung von DC-Mikronetz im Haushalt als Standard für PV/Speicher/Elektrofahrzeug/Wärmepumpe mit KI-gesteuertem Lastmanagement.

Anwendungsbereich: Transformation der Mobilität und des maritimen Sektors

Heute bis 2030

- Mobilität: bidirektionales Laden, DC-Bordnetz, Wechselakkus

Entwicklung hocheffizienter, bidirektionaler Ladesysteme für Netzanbindung von Autobatterien und Hochleistungsladestationen mit Batteriespeicher, Wechselakkus für Landwirtschaft, spezifische Leistungselektronische Komponenten für Schiffs-DC-Netze, Brennstoffzellsysteme, Batteriespeicher und Schiffs-Ladesysteme.

2030 bis 2035

- Mobilität zu Land, Wasser, in der Luft

Einsatz von Na-Ionen-Batterien. Entwicklung von WBG-LE und Batterien für DC-Bordnetze, Ladeinfrastrukturen im MV-Bereich, elektrische Schiffsantriebe, airborne urbane transport sowie von ultraschnellladefähigen Batterien, SiS/LiS. Batterien für Avionik.

2035 bis 2040

- Klimaneutrale Mobilität

Entwicklung von LE und Batteriespeicher für HV-Bordnetze, Avionik und urbane Luftfahrt sowie für hybride Energiesysteme in der Schifffahrt (z. B. aus H2+Batterien+DC-Bordnetze+WBG o. grüne Ammoniakverbrennung)

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

4.3. Ebene Outcome

Wirkung 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 einerseits Transformation greift – im Betrieb von Energiesystemen, in industriellen Wertschöpfungsketten und in der praktischen Umsetzung – und wie andererseits Forschung dazu beiträgt, diese Veränderungen umzusetzen und langfristig zu sichern.

4.3.1 Umsetzung technologischer Entwicklungen im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher von heute bis 2040

Erster Zeitabschnitt „Status Quo“

- Leistungselektronik für Energieerzeugung und -verteilung

Leistungselektronik für Anbindung der Energieerzeugung (DC) an die Stromnetze (AC), ein sicher steuerbares Netz mit fortschreitender Integration von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern sowie Gefahrenabwehr der durch Cybersicherheit.

- Erste Effizienz- und Konsistenzwirkungen der Energiewende

In einzelnen Sektoren zeigen sich erste Wirkungen durch Effizienzsteigerung, Technologiewechsel und Nachfrageanpassung

Heute bis 2030

- Fokus: Digital steuerbares, flexibles und effizientes Energiesystem

Das Energiesystem ist sicher steuerbar und nationale Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit ist gestärkt.

- Leistungselektronik mit WBG-Halbleitern

LE dominiert durch Si-Leistungshalbleiter wird zunehmend mit WBG (SiC/GaN)-Halbleiter ersetzt. Hocheffiziente LE wird für verschiedenste Anwendungen benötigt und in sehr großem Maßstab eingesetzt.

- Batt: Batteriespeicher für die Netzstabilisierung und alle Sektoren

Großskalige Batteriespeichersysteme BESS sind in die Netze integriert. Spezifische Akkus und Batterien sind für alle Anwendungen in der Entwicklung.

2030 bis 2035

- Fokus: Sichere, resiliente, robuste Energiesysteme und Wettbewerbsfähigkeit

Fortschritte in der Transformation wirken sich auf alle Sektoren positiv aus

- LE: Leistungselektronik für die Elektrifizierung aller Sektoren

Leistungselektronik für die Netzintegration von Energieerzeugern, -speichern und -verbrauchern, für eine Vielzahl von elektrischen Antrieben und Prozessen nimmt eine zunehmende Rolle ein

- Batt: Große Palette an Speichertechnologien

Groß- und Langzeitspeicher nehmen stark zu und Na-Ionen-Batterien sind neben Li-Ionen gängig. Feststoffbatterien beginnen sich zu etablieren. Metallbasierte wässrige Energiespeicher spielen im stationären Großspeicherbereich zunehmend eine Rolle.

2035 bis 2040

- Fokus: Resiliente, robuste und ausfallsichere Energiesysteme

Energiesysteme sind robust gegenüber Störungen, Extremereignissen und systemischen Risiken

- LE: Modulare WBG-LE für DC-Industrienetze

Vollintegrierte LE ermöglicht Energiehub Systeme (Elektrizität + H2), emissionsfreie maritime Antriebe und HV-BESS. Vorbereitung Ultra-WBG (Ga2O3/Diamant) für zukünftige Anwendungen

- Batt: Batteriespeicher für Netze, Mobilität

Natrium- und Lithium-Ionen-Batterien und weitere, wie Redoxflow- und Eisenflow-Batterien (IFB) dominieren. Energiespeicher sind netzdienlich integriert (auch Hausspeicher) und große HV-BESS Parks (MW-GW) sind fundamentaler Teil der Netze.

4.3.2 Umsetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in den verschiedenen Anwendungsbereichen der Transformation

Anwendungsbereich: Erzeugung und Verteilung von erneuerbarer Energie

Heute bis 2030

Energie-Erzeugung und -verteilung im sicheren Netz

Wind- und Solarenergie sind massiv ausgebaut und hinsichtlich Leistung, Effizienz und geringeren Kosten weiterentwickelt. Das Netz ist sicher steuerbar und stabil. Überbauung von Netzverknüpfungspunkten beginnt. HVDC Ausbau.

2030 bis 2035

Sicher steuerbare Energieverteilung

Vollständig erneuerbarer Strom. Offshore Wind erzeugt teils direkt Wasserstoff. Ein sicheres Netz entsteht aus Speicher, H_2-Kraftwerke und Sektorkopplung. DC -Kopplung und autonome Mikronetze gewinnen an Bedeutung.

2035 bis 2040

WBG- und globale HVDC-Netze

WBG-Halbleiter dominieren die LE. Hybride AC/DC Netze sind etabliert. Supraleitung ermöglichen in bestimmten Teilen verlustarmen Transport. Ein flexibles Stromsystem sichert die Residuallast, erste Fusionskraftwerke liefern ab ca. 2040/45 CO_2-freie Energie.

Anwendungsbereich: Speicherung von erneuerbarer Energie

Heute bis 2030

Großspeicher und netzdienliche Integration von Elektrolyseuren für die H2 Erzeugung

Großskalige BESS werden für Peak-Shaving, Netzdienstleistungen und PV-Integration genutzt und Elektrolyseure werden als netzdienliche, hochdynamische Verbraucher integriert.

2030 bis 2035

Netzdienliche Energiespeicherung

Speichersystem aus E-Fahrzeugen und (Groß-) Speichern kann Erzeugerspitzen aufnehmen (Peak Shaving). Stationäre Speicher nehmen im Energie- und Industriebereich stark zu, Wasserstoff als Energieträger und für chemische Nutzung.

2035 bis 2040

Netzdienliches Speichersystem, hybride Energiespeicher

Fahrzeuge, stationäre Speicher und Großspeicher sind netzdienlich integriert als fundamentaler Teil der Netzregulation (1°-, 2°-, 3° -Regelung). Hybrid-Energiespeicher bestehen aus Batterie + H2+ Superkondensatoren.

Anwendungsbereich: Transformation der Industriesysteme

Heute bis 2030

Elektrifizierung der Industriesysteme mit Leistungselektronik

Industrieprozesse werden mit leistungselektronischen Komponenten zunehmend effizienter und THG-sparender. Robotik-Anwendungen nehmen zu, Energieintensive KI-Rechenzentren sind ans HV-Netz angeschlossen.

2030 bis 2035

Defossilierung der Industrieprozesse

Zunahme von Robotik in Fertigungsprozessen findet massiv statt. DC Netze versorgen Fabriken mit Energie. KI-Rechenzentren werden ausgebaut. Der Bedarf für deren Anbindung an die Netze inkl. Energieversorgung nimmt zu.

2035 bis 2040

Industriesysteme / Prozesswärme: DC-Netze, HV-Bess

DC-Netze sind, insbes. für Fertigungsprozesse, unter Einsatz von vollintegrierten, modularen

Leistungsendstufen ("Plug & Play") und HV-Batteriespeichersystemen (HV-BESS, <1.500V) etabliert.

Anwendungsbereich: Transformation der Haushalte und Gebäudeversorgung

Heute bis 2030

Energieversorgung der Haushalte mit PV, Speicher und Wärmepumpen

Installation von PV, Batteriespeicher und Wärmepumpen hat zugenommen. Effizienzanforderungen an Energieverbraucher wachsen. Erste smart home Konzepte sind in der Umsetzung.

2030 bis 2035

Haus-Energiesystem aus Wärmepumpe, PV und Batteriespeicher

Installation von PV mit Batteriespeichern für die Stromversorgung und Wärmepumpen für Wärmeversorgung sind weit verbreitet.

2035 bis 2040

Haus-Energiesystem aus PV, Speicher und Wärmepumpe

PV, Wärmepumpen, EV und Batteriespeicher sind in Haushalten Standard und über DC-Mikronetze verbunden. Haushalte sind netzdienlich integriert.

Anwendungsbereich: Transformation der Mobilität und des maritimen Sektors

Heute bis 2030

E-Mobilität für Personen, Waren, Schiffe

EE-Mobilität im PKW- und LKW-Bereich nimmt zu, bei gleichzeitigem Ausbau der Ladeinfrastruktur. Für den Schienenverkehr und die Landwirtschaft werden Akkus entwickelt. Kleinere Schiffe/ Fähren und Hafenfahrzeuge fahren elektrisch.

2030 bis 2035

Mobilität: "all goes electric"

HV-Bordnetz ist etabliert. Hochleistungsladesysteme in Häfen. Schiffe sind elektrifiziert. Neue elektrische Flugzeugtypen sind auf dem Markt. Batterieelektrische Zugantriebe sind teilw. etabliert und für die Landwirtschaft werden Konzepte entwickelt.

2035 bis 2040

Emissionsfreie Schifffahrt, HV-Bordnetz, Avionik

HV-Bordnetze(1500V) in der Anwendung, Hafeninfrastruktur ist vollständig elektrifiziert, Schiffsantriebe sind emissionsfrei, Drohnen f. Kurzstrecken mit Batterieantrieb in Betrieb, Elektrifizierung der Avionik hat begonnen.

4.4. Ebene Impact

Impact und gesellschaftliche Missionen

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

Erster Zeitabschnitt „Status Quo“

- Leistungselektronik & Batteriespeicher als Schlüsseltechnologien für die Energiewende

Diese Schlüsseltechnologien ermöglichen den Aufbau einer sicheren und resilienten Energieversorgung, -verteilung und -nutzung in allen Sektoren.

- Grundlegende Anerkennung von Versorgungssicherheit und Resilienz als zentrale Ziele

Ein sicheres und resilientes Energiesystem gilt als zentrale Voraussetzung der Transformation.

Heute bis 2030

- Innovationsgetriebene Wertschöpfungsketten für Anwendungssysteme

Innovation, Geschäftsmodelle und Standards im Bereich Leistungselektronik & Batterietechnik machen Klimaneutralität wirtschaftlich attraktiv.

- Zukunftsfähige Arbeit, Qualifikation und Arbeitsmärkte

Arbeitsmärkte und Qualifikationen entwickeln sich aktiv mit der Transformation.

2030 bis 2035

- Schutz von Natur, Umwelt und Ressourcen

Klimaneutralität geht mit messbarem Schutz von Natur, Umwelt und Ressourcen einher. Eine nachhaltige, ressourcenschonende Produktion steht dabei im Fokus

- Wettbewerbsfähiger Standort und industrielle Transformation

Klimaneutralität stärkt den Standort und zieht zukunftsfähige Industrie aus dem Bereich LE & Batteriespeicher an.

2035 bis 2040

- Technologien der Leistungselektronik & Batteriespeicher als Schlüsselkomponenten für die Energiewende

Alle Energiesysteme sind mit Komponenten aus der Leistungselektronik & Batteriespeichertechnologie ausgestattet.

- Bezahlbare, resiliente und souveräne Energieversorgung

Energie ist klimaneutral, bezahlbar, krisenfest und strategisch abgesichert.

- Klimaneutraler Gebäudebestand und netzdienlicher Gebäudebetrieb

Gesamter Gebäude bestand ist auf klimaneutrale und bezahlbare Wärmeversorgung umgestellt und netzdienlicher Gebäudebetrieb stabilisiert das Energiesystem.

ZIEL 2040: Klimaneutrales Industrieland Schleswig-Holstein

Technologien der Leistungselektronik & Batteriespeicher sind die "Enabler" der Energiewende.

4.5. Zusammenfassung

Phase 1: heute bis 2030 – Aufbau

Bis 2030 werden verlässliche politische, ökonomische und regulatorische Rahmenbedingungen sowie die notwendigen Wissens-, Fachkräfte- und Innovationsstrukturen geschaffen, um die Elektrifizierung und Transformation des Energiesystems zu ermöglichen und gesellschaftlich abzusichern. Darauf aufbauend entstehen innovative, kostengünstige, robuste und hocheffiziente Leistungselektronik- und Batteriesysteme – insbesondere auf Basis von WBG-SiC/GaN, neuen Batterietechnologien sowie intelligenten Steuerungs- und Speicherkonzepten – für die zentralen Anwendungsfelder der Energiewende. Diese Technologien werden zunehmend in der Energieerzeugung und den Netzen, bei Speichern, in der Industrie, in Gebäuden sowie in der Mobilität eingesetzt und schaffen ein sicher und digital steuerbares, flexibles, effizientes und stabiles Energiesystem. Damit werden innovationsgetriebene Wertschöpfungsketten und die internationale Wettbewerbsfähigkeit gestärkt, zukunftsfähige Arbeitsplätze und Qualifikationen geschaffen und die Grundlage dafür gelegt, Klimaneutralität wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Phase 2: 2030–2035 – Skalierung und sektorale Integration

Grundlage der Skalierung bis 2035 sind verbindliche regulatorische Vorgaben und technische Standards für einen sicheren, effizienten und flexiblen Betrieb des Energiesystems und insbesondere für die Energiespeicherung. Gleichzeitig werden Leistungselektronik und Batteriesysteme mit steigender Energie- und Leistungsdichter, höherer Nachhaltigkeit und Intelligenz weiterentwickelt – von WBG- Leistungselektronik über neue Batterie- und Langzeitspeichertechnologien bis hin zu KI-gestützten Energie- und Batteriemanagement-systemen – und für Netze, Industrie, Gebäude, Mobilität und maritime Anwendungen skaliert. Dadurch wird Leistungselektronik zu einer zentralen Schlüsseltechnologie für die Elektrifizierung und Netzintegration aller Sektoren, während eine breite Palette an Speichertechnologien, vermaschte DC-Netze und Sektorkopplung ein zunehmend vollständig erneuerbares, sicheres und resilientes Energiesystem ermöglichen. Die fortschreitende Elektrifizierung und Defossilierung von Industrie, Gebäuden, Mobilität und maritimen Anwendungen reduziert Emissionen und Ressourcenverbrauch und stärkt Schleswig-Holstein zugleich als wettbewerbsfähigen und innovationsgetriebenen Standort für Leistungselektronik, Batteriespeicher und weitere Zukunftstechnologien.

Phase 3: 2035 bis 2040 – Systemintegration und Zielerreichung

Bis 2040 werden Leistungselektronik und Batteriespeicher zu tragenden Säulen des Energiesystems, wobei WBG-Technologien, hybride AC/DC- und HVDC-Netze, DC-Mikronetze sowie netzdienlich integrierte Speicher breit etabliert sind und neue Speichertechnologien wie Festkörper-, Natrium-Ionen-, Redox-Flow- und hybride Speichersysteme hinzukommen. Die Technologien ermöglichen eine robuste, ausfallsichere und klimaneutrale Energieversorgung, eine weitgehend elektrifizierte Industrie, Gebäudeversorgung und Mobilität sowie die vollständige Integration erneuerbarer Energien und tragen damit entscheidend dazu bei, Schleswig-Holstein 2040 als klimaneutrales, wettbewerbsfähiges, resilientes und souveränes Industrieland zu etablieren.

5. Transformationspfade

Die übergreifende Energiewendeforschungs-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 forschungsfeldspezifischen Roadmaps für jedes Fokusfeld eigene Transformationspfade herausgearbeitet und beschrieben. Diese Transformationspfade bündeln jeweils zentrale Wirkmechanismen, über die das jeweilige Forschungsfeld zur Energiewende beiträgt, und zeigen auf, wie sich technologische, infrastrukturelle, regulatorische und gesellschaftliche Entwicklungen innerhalb des Feldes bis 2040 entfalten müssen.

Die Transformationspfade verstehen sich dabei nicht als vollständige Abbildung aller Forschungs- und Handlungsbedarfe. Vielmehr benennen sie zentrale Entwicklungslinien, entlang derer wissenschaftliche Erkenntnisse und Innovationen einen wirksamen Beitrag zur Energiewende und zur Erreichung der Klimaneutralität in Schleswig-Holstein im Jahr 2040 leisten können.

Ausgangspunkte für die Transformationspfade sind die in der übergeordneten Energiewendeforschungs-Roadmap Schleswig-Holstein identifizierten Output-Bereiche (Ebene Technologische Innovationen und wissenschaftliche Erkenntnisse), zu deren Erreichung das Forschungsfeld Leistungselektronik und Batteriespeicher beiträgt. Da Technologien aus diesem Fokusfeld für die Transformation aller Energiesysteme essenziell sind, liegt der Schwerpunkt auf der Bereitstellung der nötigen leistungselektronischen und batterietechnologischen Entwicklungen, Komponenten und Systeme, um die Transformation der Energiesysteme erfolgreich zu gestalten.

Die in der Roadmap Leistungselektronik & Batteriespeicher dargestellten Transformationspfade (siehe dazugehörige Grafik im Anhang) zeigen die notwendigen, technologischen Entwicklungen für die wichtigsten vier großen Anwendungsbereiche in Schleswig-Holstein auf:

- das Stromnetz aus erneuerbaren Energiequellen
- die Transformation der Industrieprozesse
- die Mobilität zu Land, Wasser und in der Luft
- die Transformation der Gebäude und Privathaushalte.

Insbesondere der erstgenannte Anwendungsbereich, die Integration aller Energieerzeuger, Energiespeicher und Verbraucher in das Stromnetz spielt eine zentrale Rolle in der Energiewende. Das Netz der Zukunft muss in der Lage sein, die Volatilität durch die Elektrifizierung aller Sektoren sicher und effizient zu regulieren.

Im weiteren Fokus stehen die Entwicklungssprünge der Anwendungen im Zusammenspiel mit der technologischen Entwicklung der Leistungselektronik und der Batteriespeicher.

Die vier im Folgenden erläuterten Transformationspfade verdeutlichen, dass wissenschaftliche Erkenntnisse und Innovationen im technologischen Bereich zeitlich vor ihrer Anwendung in Industrie, Netzen und Gesellschaft erfolgen müssen, damit sie umgesetzt werden können.

Forschung im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher ist somit vorausschauende Forschung an den Schlüsselkomponenten und für zukünftige Energiesysteme. Sie sind die Enabler der Energiewende.

5.1. Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbarer Energie

Ein effizientes, sicheres, zuverlässig regelbares und stabiles Stromnetz ist die Grundvoraussetzung für das Gelingender Energiewende. Die nachhaltige Energieerzeugung aus Wind und Sonne folgt Naturgesetzen und ist deshalb ungleichmäßig. Das gilt ebenso für den Energieverbrauch durch Industrie, Haushalte und Mobilität. Dazwischen befindet sich das Stromnetz, das diese Volatilitäten zulassen muss. Transformationspfad beschreibt den Weg zu einem sicheren Stromnetz, in dem Energie effizient und zuverlässig erzeugt, gespeichert und verteilt wird. Im Forschungsfeld Leistungselektronik und Batteriespeicher werden die Schlüsseltechnologien für die Netzintegration entwickelt. Dazu gehören Umrichter, Batterien, netzbildende Stromrichter sowie weitere Komponenten und Systeme. Bis zum Jahr 2030 stehen der Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung und der Stromnetze sowie die fortschreitende Integration von Energieverbrauchern und Speichern im Vordergrund. Mit dem Ausbau gehen Anforderungen an die Schwarzstartfähigkeit und Stabilität des Stromnetzes einher. Gleichzeitig sind neben Kosteneinsparungen auch Effizienzsteigerungen im Zusammenspiel von Energieerzeugung, -speicherung, -umwandlung, -übertragung und -verbrauch erforderlich.

WBG-Leistungshalbleiter und großskalige Batteriespeicher können diesen Bedarf decken und ein stabiles, effizientes und kostengünstiges Energiesystem ermöglichen. In den Jahren 2030/35 wird mit dem Ausbau von Hochspannungs-Gleichstromnetzen fortgesetzt und gewinnt in der Langstrecken-Energieübertragung immer mehr an Bedeutung. Dies wird zukünftig auch globale Energieübertragung ermöglichen (z.B. Afrika-Europa). Für die nötige Stabilität werden große Batteriespeicher, die Lastspitzen abpuffern können (Peak Shaving), Gleichstrom-gekoppelte Energiesysteme und autonome Mikronetze sorgen. Auch Elektrolyseure für die Wasserstofferzeugung werden künftig netzdienlich in die Netze integriert sein. Bis 2035 wird zudem die Leistungselektronik für Fusionskraftwerke vorbereitet. Erstere werden ab 2040 als Grundlastsicherer dienen können. Fusionskraftwerke werden wahrscheinlich erst nach 2040 im größeren Maße CO_2-freien Strom liefern können.

Ab 2040 werden leistungsfähige hybride Energiespeicher, die aus Batterien, Wasserstoffsystemen und Superkondensatoren bestehen, sowie Supraleitungen in der Kurzstrecke das Netz noch effizienter machen.

5.2. Mobilität und maritime Anwendungen

Dieser Pfad beschreibt die notwendigen technologischen Innovationen, damit alle Sektoren der Mobilität im Jahr 2040 klimaneutral sein können. Während der private und öffentliche Personenverkehr auf der Straße bereits teilweise elektrifiziert ist, stehen die nötigen Technologien für andere Sektoren wie bspw. Luftverkehr noch am Anfang der Transformation. Im gesamten Mobilitätssektor stehen die Entwicklung von Batterien und Akkumulatoren sowie die ab 2035 zunehmende Anwendung von leistungsfähigen Wide-Bandgap-Halbleitern (WBG) in der Leistungselektronik im Vordergrund. Batterien der nächsten Generation wie die sichereren Natriumionen-Batterien werden insbesondere für die Schifffahrt von Bedeutung sein. Viele Fahrzeuge werden batterieelektrisch unterwegs und künftig mit Hochvolt-DC-Bordnetzen (HVDC) –

insbesondere 400V- und 800V-Systeme sowie zukünftige DC-Bordnetze bis 1,5kV-Bereich – ausgestattet sein. Bereits ab dem Jahr 2030 wird ein hoher Bedarf an Hochleistungslade-Infrastrukturen mit Batteriespeichern und der entsprechenden Leistungselektronik bestehen. Fahrzeuge können während ihres Ladevorganges (z.B. zu Hause oder in der Firma) über netzlastabhängige Steuerung und bidirektionales Laden die Stabilität des Netzes unterstützen.

Schiffe werden zukünftig mit einem hybriden Gleichstrom-Energiesystem aus Wasserstoffspeicher, Batterie und WBG-Leistungselektronik ausgestattet sein. Die emissionsfreien Schiffsantriebe der Zukunft werden entweder batterieelektrisch sein oder mit synthetischen Kraftstoffen (z.B. grüner Ammoniakverbrennung oder Methanol) fahren.

Die Elektrifizierung der Luftfahrt inklusive urbaner Lufttransporte beginnt sich ab dem Jahr 2035 stärker zu entwickeln.

5.3. Industriesysteme

Dieser Transformationspfad zeigt die Voraussetzungen und technologischen Veränderungen auf, die nötig sind, um den Industriesektor in Schleswig-Holstein zu dekarbonisieren. Bereits heute sind attraktive Geschäftsmodelle und Kostenanreize erforderlich, damit Unternehmen klimafreundlich werden können. Die Forschung, insbesondere im Bereich der Leistungselektronik und Batteriespeichertechnologien, stellt die wissenschaftlichen Grundlagen für die Transformation energie- und ressourcenintensiver industrieller Anwendungen zur Verfügung und entwickelt diese Technologien möglichst frühzeitig anwendungsreif. Gefragt sind Lösungen in Form von Innovationen, die die Bedürfnisse der Industrie nach geringen Kosten, Effizienz, Nachhaltigkeit und Machbarkeit erfüllen und die Unternehmen dabei unterstützen, klimaneutral und wettbewerbsfähig zu werden. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, wird Schleswig-Holstein davon profitieren und als Standort für eine klimafreundliche Industrie und wachsende Arbeitsmärkte attraktiv werden.

Technologisch vollzieht sich im Zuge der Transformation zu einem leistungselektronisch dominierten System. Ab 2030 werden industrielle Gleichstrom-Fertigungsnetze entstehen, die ins Stromnetz integriert sind und durch Speicher stabilisiert werden. Energieintensive Anwendungen und KI-Rechenzentren werden ins Hochspannungsnetz integriert. Ab 2035/40 werden effiziente, kostengünstige, modulare Leistungselektronik-Komponenten „Plug-and-Play“ für industrielle Fertigungsprozesse und Robotik ermöglichen. Ab 2040 werden hybride Industrienetze, die aus einem gleichstrombasierten Netz, das mit Energieerzeugung, Speicher und Wasserstoffsystem sowie einem gekoppelten Wechselstromnetz verbunden ist, die Zukunft sein.

5.4. Haushalte

Die Transformation der Haushalte bedeutet, dass Gebäude mit klimafreundlicher Energie und Wärme versorgt werden. Bereits heute sind insbesondere Neubauten durch Dach-Photovoltaik, Hausspeicher, Wärmepumpe und E-Fahrzeug mit klimaneutraler Energie versorgt. Damit Eigentümer einen Anreiz haben, klimafreundliche Entscheidungen zu treffen, müssen die Geschäftsmodelle für diese Form der Energieversorgung wirtschaftlich sein. Dies gilt auch oder umso mehr für den bestehenden Gebäudebestand. Innovationen aus dem Forschungsfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher führen zu effizienteren, leistungsstärkeren, zuverlässigeren und

kostengünstigeren Technologien. Das wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Transformation aus und motiviert Gebäudeeigentümer, klimafreundliche Investitionen zu tätigen. Ab 2030 werden Hausenergiesysteme, Wärmepumpen und Netzteile effizienter und kostengünstiger sein. Dadurch wird sich die Wirtschaftlichkeit dieser Technologien erhöhen. Da sehr viele Gebäude in Schleswig-Holstein transformiert werden müssen, wird die Nachfrage nach diesen Technologien sowie nach entsprechenden Fachkräften steigen, um den wachsenden Bedarf zeitnah zu decken.

Technologisch gesehen zeigt der Pfad eine stärkere Integration der Haushalte als Erzeuger und Verbraucher von Energie in die Stromnetze. Leistungselektronische Komponenten mit WBG-Halbleitern ermöglichen in Kombination mit einem hauseigenen Teil-Gleichspannungsnetz und Smart-Meter-Gateway-Systemen eine effiziente, sicher steuerbare und netzdienliche Integration in das Stromnetz. Solche „Smart-Home“-Konzepte sind ab 2035 darauf ausgelegt, die Stromnetze zu stabilisieren und Volatilitäten zu verringern. Bidirektionale Wechselrichter auf WBG-Basis werden den netzdienlichen Anschluss ermöglichen. Ab 2040 werden voraussichtlich Gleichspannungs-Mikronetze, die mit einem KI-gesteuerten Lastmanagement netzdienlich betrieben werden, in Haushalten Standard sein.

5.5. Extra: Transformation des Maritimen Sektors

Dieser Bereich ist heute noch am Beginn der Transformation, unter anderem deshalb, weil für viele Anwendungsbereiche individuelle Lösungen benötigt werden. Zum einen müssen Schiffe im weltweiten Güterverkehr in der Lage sein, weite Strecken ohne Landkontakt zurückzulegen und außerdem benötigen sie eine große Menge an Energie für ihren Antrieb und weitere Energiesysteme an Bord. Die Forschung nimmt an, dass für die küstennahe Schifffahrt Batterien der nächsten Generation – wie insbesondere die sichereren Natriumionen-Batterien – von Bedeutung sein werden. Des Weiteren ist die Zukunftsvision der Forschung, dass Schiffe zukünftig mit einem hybriden Gleichstrom-Energiesystem aus Brennstoffzelle mit Reformer und synthetischen Kraftstoffen, Batterie und WBG-Leistungselektronik ausgestattet sein werden.

Für den weltweiten Transport sind die Lösungen noch offen. Neben der direkten Nutzung von grünem Methanol oder grünem Ammoniak in Verbrennungsmotoren sind elektrische Antriebe mit Brennstoffzellen-Reformer und grünem Ammoniak oder Methanol, Batteriespeichern eine weitere Möglichkeit. Entscheidend für die Technologiewahl werden insbesondere die Verfügbarkeit klimaneutraler Kraftstoffe, die Energieeffizienz der Antriebssysteme sowie die Entwicklung geeigneter Speicher-, Brennstoffzellen- und Leistungselektroniklösungen sein.

So erfordert die Transformation des maritimen Sektors die Entwicklung leistungsfähiger Leistungselektronik, Batteriespeicher, DC-Bordnetze und Ladeinfrastrukturen sowie die zunehmende Elektrifizierung kleinerer Schiffe, Fähren und Hafenfahrzeuge. Bis 2030 werden damit die technologischen Grundlagen für die weitere Elektrifizierung und die Integration maritimer Anwendungen in das Energiesystem geschaffen. Im Zeitraum 2030 bis 2035 werden WBG-Leistungselektronik, Hochspannungs-DC-Bordnetze, leistungsfähige Batterie-systeme und Hochleistungsladeinfrastrukturen zunehmend skaliert und für weitere maritime Anwendungen eingesetzt. Neben batterieelektrischen Antrieben gewinnen neue Batterietechnologien, beispielsweise Natrium-Ionen-Batterien, sowie hybride Energiesysteme an Bedeutung. Ab 2035 steht die Entwicklung klimaneutraler und integrierter maritimer Energiesysteme im Mittelpunkt. Vollintegrierte Hochspannungs-DC-

Systeme mit WBG-Leistungselektronik, Batteriespeichern und Wasserstoff ermöglichen zunehmend emissionsfreie Schiffsantriebe und eine weitgehend elektrifizierte Hafeninfrastruktur. Für Anwendungen im globalen Seetransport, bei denen eine vollständige Batterieelektrifizierung technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, werden ergänzend klimaneutrale Energieträger wie grüner Ammoniak oder Methanol eingesetzt werden. Bis 2040 entsteht so eine weitgehend klimaneutrale maritime Mobilität mit elektrifizierten Häfen

5.6. Zwischenfazit

Die Roadmap im Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher zeigt mögliche technologische Transformationspfade für die wichtigsten Anwendungsbereiche in Schleswig-Holstein auf. Im Fokus stehen die Entwicklungssprünge der Anwendungen im Zusammenspiel mit der technologischen Entwicklung der Leistungselektronik und der Batteriespeicher. Ein weiteres großes Thema ist die Integration aller Energieerzeuger, Energiespeicher und Verbraucher in das Stromnetz. Dieses muss in der Lage sein, die Volatilität durch die Elektrifizierung aller Sektoren sicher und effizient zu regulieren.

Im Zentrum steht die Frage, wie Komponenten der Leistungselektronik & Batteriespeichertechnologie effizienter, leistungsstärker, intelligenter, robuster, sicherer, nachhaltiger und insbesondere kostengünstiger gestaltet werden können:

Die Forschung im Bereich der Leistungselektronik umfasst die Entwicklung von Komponenten und Systemen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Im Mittelpunkt stehen dabei Wide-Bandgap-Leistungshalbleiter (WBG) auf Basis von Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) sowie darauf aufbauende Leistungsmodule, Umrichter und Systemtopologien, die für verschiedenste Anwendungen – unter anderem das bidirektionale Laden – weiterentwickelt werden. Gleichzeitig richtet sich die Forschung auf die nächste Generation von Ultra-WBG-Halbleitern auf Basis von Diamant und Galliumoxid (Ga_2O_3) sowie auf die Entwicklung entsprechender Leistungsmodule und Systeme, beispielsweise für Robotik, KI-Anwendungen und Fusionskraftwerke.

Die Batterieforschung konzentriert sich auf die Entwicklung leistungsstärkerer Lithium-Ionen-Batteriezellen sowie die Industrialisierung neuer Zelltypen der nächsten Generation, insbesondere Natrium-Ionen- und Festkörperbatterien. Ergänzend werden effizientere Fertigungsverfahren und intelligente Batteriemanagementsysteme (BMS) entwickelt. Für die stationäre Energiespeicherung steht darüber hinaus die Entwicklung einer breiten Palette von Hochleistungs- und Langzeit-Batteriespeichern im vielfachen Megawattstunden-Maßstab im Fokus, die eine flexible und bidirektionale Speicherung ermöglichen. Hierzu werden neben etablierten Technologien wie Lithium-Ionen- und Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LFP) auch Natrium-Ionen-, Festkörper und Redox-Flow-Batterien, sowie wässrige Metallspeicher- und sowie hybride Speichertechnologien und Graphen-Superkondensatoren erforscht.

Leistungselektronik und Batteriespeicher sind zentrale Enabler der Energiewende und Schlüsseltechnologien für die Erreichung der Klimaneutralität Schleswig-Holsteins im Jahr 2040. Die vier Transformationspfade – Stromnetz und erneuerbare Energie, Industrie, Mobilität und maritime Anwendungen sowie Gebäude und Haushalte – zeigen, dass die Transformation aller Sektoren auf leistungsfähige, effiziente, sichere, kostengünstige und zunehmend intelligent steuerbare leistungselektronische Systeme und Speichertechnologien angewiesen ist. Dabei kommt insbesondere der Integration von

Erzeugern, Speichern und Verbrauchern in ein stabiles und resilientes Stromsystem eine übergreifende Bedeutung zu.

Die technologische Entwicklung muss der breiten Anwendung zeitlich vorausgehen: Forschung und Innovation schaffen zunächst die notwendigen Komponenten und Systeme – von WBG-Leistungselektronik, Umrichtern und netzbildenden Stromrichtern bis hin zu neuen Batterie- und Speichersystemen – und ermöglichen anschließend deren Skalierung und Integration in Netze, Industrie, Gebäude und Mobilität. Mit zunehmender Elektrifizierung gewinnen dabei DC-Netze, Hochspannungs-Gleichstromübertragung, bidirektionales Laden, netzdienliche Batteriespeicher, intelligente Energie- und Batteriemanagementsysteme sowie hybride Energiesysteme an Bedeutung.

Für Schleswig-Holstein eröffnet sich daraus zugleich eine strategische Chance für Forschung, Innovation und industrielle Wertschöpfung. Die Entwicklung und Anwendung dieser Schlüsseltechnologien kann nicht nur die technische Umsetzung der Energiewende ermöglichen, sondern auch neue Geschäftsmodelle, Fachkräftebedarfe und Wertschöpfungsketten schaffen und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts stärken. Leistungselektronik & Batteriespeicher sind daher nicht lediglich ein einzelnes Technologiefeld, sondern eine querschnittliche Schlüsselkomponente der zukünftigen Energiesysteme und ein wesentlicher technologischer Hebel für ein klimaneutrales, effizientes, resilientes und wettbewerbsfähiges Schleswig-Holstein 2040.

Der maritime Sektor ist dabei ein besonders relevantes Anwendungsfeld für Leistungselektronik und Batteriespeicher. Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Schifffahrt erfordert die schrittweise Elektrifizierung von Schiffen, Hafeninfrastrukturen und weiteren maritimen Anwendungen wie bspw. Offshore-Windenergieparks mit Umrichterstationen. Im Mittelpunkt stehen die Entwicklung und Skalierung leistungsfähiger Batteriespeicher, WBG-basierter Leistungselektronik, Hochspannungs-DC-Bordnetze und hocheffizienter Ladeinfrastrukturen, die zunächst kleinere Schiffe, Fähren und Hafenfahrzeuge und zunehmend auch größere maritime Anwendungen elektrifizieren. Bis 2040 können daraus emissionsfreie Schiffsantriebe und weitgehend elektrifizierte Hafeninfrastrukturen sowie hybride Gleichstrom-Energiesysteme aus Batterie, Brennstoffzelle mit Reformer und synthetischen Kraftstoffen.

Geeignete technische Standards, insbesondere für die elektromagnetische Verträglichkeit, bilden dabei eine wichtige flankierende Voraussetzung. Leistungselektronik und Batteriespeicher schaffen damit wesentliche technologische Voraussetzungen für die klimaneutrale Transformation des maritimen Sektors und eröffnen zugleich Chancen für Innovation, Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit des maritimen Standorts Schleswig-Holstein.

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

6. Handlungsoptionen

1. Leistungselektronik & Batteriespeicher als strategisches Querschnittsfeld der Energiewende priorisieren

Leistungselektronik & Batteriespeicher sollten als strategische Schlüsseltechnologien der Energiewende in der Forschungs- und Innovationspolitik des Landes verankert werden. Da nahezu alle Transformationsfelder – von Stromnetzen und erneuerbaren Energien über Wasserstoff und Industrie bis hin zu Gebäuden und Mobilität – auf diese Technologien angewiesen sind, sollte ihre Entwicklung ressortübergreifend betrachtet und mit den übrigen Forschungs- und Transformationsfeldern systematisch verknüpft werden.

2. Forschung entlang der gesamten Innovations- und Wertschöpfungskette stärken

Die Forschungsförderung sollte nicht nur auf einzelne technologische Komponenten ausgerichtet sein, sondern die gesamte Entwicklungskette von Materialien und Leistungshalbleitern über Leistungsmodule, Umrichter und Batteriesysteme bis hin zu Anwendungen und Gesamtsystemen abdecken. Besondere Bedeutung haben dabei hocheffiziente WBG-Leistungselektronik, neue Batterie- und Speichertechnologien, intelligente Energie- und Batteriemanagementsysteme sowie nachhaltige und recyclingfähige Komponenten.

3. Anwendungsorientierte Forschung und Demonstratoren

Um neue Technologien in unterschiedlichen Handlungsfeldern schneller in die Praxis zu bringen, sollten entsprechende Demonstratoren und Testinfrastrukturen für neue Leistungselektronik- und Batteriespeichersysteme gezielt gefördert werden. Entscheidend ist, neue Technologien unter realen Bedingungen zu erproben und ihre technische, wirtschaftliche und regulatorische Einsatzfähigkeit frühzeitig nachzuweisen. Dies betrifft speziell den maritimen Bereich und andere Anwendungsfelder, die sich noch in einem frühen Stadium der Transformation befinden

4. Forschung und Industrie enger miteinander verzahnen

Schleswig-Holstein braucht nicht nur Forschungskompetenz, sondern eine Industrie, die die entwickelten Schlüsseltechnologien produziert und in eigenen Anwendungen einsetzt. Förderprogramme sollten daher gezielt Verbundprojekte zwischen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen unterstützen und insbesondere KMU beim Technologietransfer, bei Pilotfertigung, Skalierung und Markteinführung begleiten. Ziel sollte sein, aus Forschungsergebnissen regionale Wertschöpfung und industrielle Anwendungen entstehen zu lassen.

5. Strategische „Door Opener“ für die technologische Transformation identifizieren und fördern

Gemeinsam mit Politik, Forschung, Wirtschaft, Anwendern und Fördermittelgebern sollten regelmäßig jene technologischen und infrastrukturellen Schlüsselstellen identifiziert werden, an denen gezielte Investitionen eine besonders große Hebelwirkung für die Energiewende in Schleswig-Holstein entfalten. Zu diesem Zweck sollten strategisch zentrale Förderprojekte mit großer Reichweite identifiziert und zeitnah umgesetzt werden. Wo die erforderlichen Investitionen die Möglichkeiten des Landes überschreiten, sollten gezielt Bundes- und EU-Fördermittel mobilisiert werden.

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

6. Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit als Forschungsziel verankern

Die zukünftige Entwicklung von Leistungselektronik und Batteriespeichern sollte konsequent mit den Zielen Ressourceneffizienz, Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Wiederverwendung und Recycling verbunden werden. Forschungsförderung sollte daher nicht allein Wirkungsgrad, Leistungs- und Energiedichte betrachten, sondern zunehmend den gesamten Lebenszyklus der Technologien und ihre Rohstoffabhängigkeit berücksichtigen.

7. Fachkräfte und Forschungsstrukturen und Technologietransfer langfristig sichern

Die technologische Transformation erfordert entsprechend qualifizierter Fachkräfte und leistungsfähige Forschungsstrukturen. Schleswig-Holstein sollte daher Kompetenzen in Leistungselektronik, Batterietechnologie, Leistungshalbleitern, Systemintegration und Energiemanagement langfristig ausbauen und die Verbindung von Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen stärken. Entscheidend ist dabei, Forschungsergebnisse systematisch in die wirtschaftliche Anwen-dung zu überführen und Innovationen, Ausgründungen und neue Wertschöpfung in Schleswig-Holstein zu fördern. Dazu gehören geeignete Transferstrukturen, Reallabore und Testinfrastrukturen sowie Unterstützung bei der Gründung technologieorientierter Start-ups und bei der Überführung von Forschungsergebnissen in bestehende Unternehmen. So können Forschung und Fachkräfteentwicklung nicht nur zur technologischen Souveränität beitragen, sondern auch neue Geschäftsmodelle, qualifizierte Arbeitsplätze und industrielle Wertschöpfung im Land schaffen.

Fazit

Schleswig-Holstein sollte Leistungselektronik & Batteriespeicher als strategische Schlüsseltechnologien der Energiewende gezielt stärken und Forschung, Industrie, Infrastruktur zu einer gemeinsamen Innovationsstrategie verbinden. Entscheidend ist dabei, nicht nur einzelne Forschungsprojekte zu fördern, sondern den Transfer von der Forschung über Demonstration und Skalierung bis zur industriellen Anwendung zu schließen. So können die für die Transformation aller Sektoren notwendigen Technologien frühzeitig verfügbar gemacht, Wertschöpfung und Arbeitsplätze im Land gesichert und zugleich die technologischen Voraussetzungen für das Ziel eines klimaneutralen und wettbewerbsfähigen Industrielandes Schleswig-Holstein 2040 geschaffen werden.

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die übergreifende Energiewendeforschungs-Roadmap verdichtet die erarbeiteten Zwischenziele auf dem Weg zur Klimaneutralität 2040 zu zentralen Transformationspfaden und macht deren Wirkungslogik sichtbar. Sie schafft damit einen konzeptionellen Orientierungsrahmen, der aufzeigt, wie Energiewendeforschung in Schleswig-Holstein zur Erreichung der Klimaneutralität beitragen kann.

Die spezifische und technologische Roadmap für das Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher ist eine differenzierte Betrachtung der betreffenden Forschungsbereiche. Sie macht sichtbar, wie Forschung im Bereich Leistungselektronik & Batteriespeicher zum Gelingen der Transformation beiträgt und welche spezifischen Forschungsbedarfe sich daraus bis 2040 ableiten.

Aus der übergreifenden Perspektive mit inhaltlicher Tiefe heraus, konkretisiert sie spezifische Fragestellungen, nötige technologische Entwicklungspfade und wissenschaftliche Beiträge. Aus dieser fachlich spezifischen Roadmap lassen sich konkrete Forschungsmaßnahmen ableiten.

In einer anschließenden Synthese wird diese Roadmap mit den Roadmaps aus den anderen sechs Fokusfeldern zusammengeführt, auf Konsistenz geprüft und mit der übergreifenden Roadmap rückgekoppelt. So entsteht ein kohärentes Gesamtsystem, in dem übergreifende Transformationspfade und feldspezifische Forschungsmissionen miteinander verzahnt sind.

Der resultierende strategische Rahmen bietet Orientierung für Wissenschaft, Politik und Verwaltung und schafft zugleich die Grundlage für eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und veränderte Rahmenbedingungen können im weiteren Prozess systematisch integriert werden, sodass die Roadmap als lernendes und adaptives Instrument fortgeschrieben wird.

Ausblick

Ein weiterer Arbeitsschritt beinhaltet die Einholung von Rückmeldungen aus der Industrie in Form eines Stakeholder-Prozesses. Ziel ist es, die industrielle Sicht auf zukünftige technologische Entwicklung aus Sicht der Leistungselektronik und Batterieentwicklung zu erhalten und in die Roadmap einzuarbeiten.

Außerdem soll die Umsetzung der in der Roadmap genannten Bedarfe in konkreten Anwendungsfeldern in den Blick genommen werden, die für Schleswig-Holstein von besonderer Bedeutung sind und hohe Dekarbonisierungspotenziale aufweisen.

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

8. Danksagung

Wir danken den zahlreichen Forschenden, die **direkt** oder indirekt zum Inhalt der Energiewendeforschungs-Roadmap im Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher beigetragen haben:

Dr.-Ing. Lars Baetcke[1], **Prof. Dr.-Ing. Aylin Behrend-Bicakci**[2], Ronja Behrens[3], **Dr. Hamzeh Beiranvand**[4], Lukas Bernhardt[5], Dr. Heike Bille[6], Dr. Marina Blohm[6], Dr. Sönke Bohm[6], Prof. Dr.-Ing. Sten Böhme[2] Dr. Michael Brand[7], **Prof. Dr.-Ing. Florian Brauer**[2], Prof. Dr. Christian Buchmüller[8], Lennart Bunnenberg[9], Prof. Dr.-Ing. Hendrik Dankowski[2], Jorgen Depken[1], Peter Drews[10], **Dr.-Ing. Nassipkul Dyussembekova**[8], Prof. Dr. Sören Ehlers[1], Carlos Epia[6], Prof. Sebastian Fiedler[10], Dr. Firdovsi Gasanzade[4], Prof. Dr.-Ing. Gunther Gehlert[8], Dr. Prokopios Georgopanos[13], Verena Gerbaulet[6], Prof. Dr.-Ing. Frauke Gerder-Rohkamm[2], Dr. Gerrit Green[10], Jan Peter Grigat[11], Prof. Dr. Axel Grimm[9], Bente Grimm[12], **Dr.-Ing. Salah Habouti**[8], Dr. Mominul Hasan[9], **Carina Haupt**[1], **Prof. Dr. Patrick Hennig**[2], Ilka Hoffmann[8], Prof. Dr.-Ing. Jochen Immel[2], Prof. Dr. Julian Jepsen[13], Hamza Kateb[8], Prof. Dr.-Ing. Christian Keindorf[2], **Dr.-Ing. Marius Langwasser**[4,15], Daniel Laufs[4], Sandra Ledderer[9], Prof. Dr. Ingmar Leiße[6], Prof. Dr. Olaf Magnussen[4], Felix Marold[8], **Dr. Michael Mensing**[14], Prof. Dr. Bernd Möller[9], Dr. Reinhard Mörtel[15], Prof. Dr. Pao-Yu Oei[9], Prof. Dr. Oliver Opel[8], **Jannes Ophey**[15], Prof. Dr. Sebastian Otte[5], **Dr. Yoann Pascal**[15], Dr. Maximilian Passing[13], Prof. Dr. Mirjam Perner[16], David Petersen[9], **Prof. Dr. Sonja Peterson**[4], Prof. Dr.-Ing. Michael Prange[2], Katharina Prehn[8], Carlotta Richter[6], Prof. Dr. Steffen Risius[2], Sinja Roloff[8], Marcel Schedat[6], Dr. Frank Schiller[8], Prof. Dr.-Ing. David Schlipf[6], Prof. Dr.-Ing. Kay Schmidt-Rethmayer[2], Benno Schöl[17], Prof. Dr. Corinna Schrum[13], **Prof. Dr.-Ing. Ulf Schümann**[2], Prof. Dr.-Ing. Reiner Schütt[8], Dr. Finn-Ole Semrau[17], Dr. Michael Siegel[1], Mats Söhrnsen[10], Prof. Dr.-Ing. Henning Strauß[2], Prof. Dr. Nadia Tan[4], Prof. Dr.-Ing. Ilja Tuschy[6], Prof. Dr. Hinrich Uellendahl[6], Prof. Dr. Reinhard von Hanxleden[4], Dr. Christian Wagner-Ahlfs[4], **Prof. Dr. Christoph Weber**[2], Simon Weich[6], Prof. Dr. Brigitte Wotha[2], **Dr. Andreas Würsig**[15], Anna Zweigardt[6].

---

[1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
[2] Hochschule für Angewandte Wissenschaften Kiel
[3] Verband kommunaler Unternehmen Nord
[4] Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
[5] Universität zu Lübeck
[6] Hochschule Flensburg
[7] Stadt Kiel
[8] FH Westküste
[9] Europa-Universität Flensburg
[10] Technische Hochschule Lübeck
[11] Industrie- und Handelskammer zu Flensburg
[12] Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa (NIT) GmbH
[13] Helmholtz-Zentrum Hereon GmbH
[14] Technische Universität Hamburg
[15] Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie
[16] GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
[17] Kiel Institut für Weltwirtschaft

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH

Unser besonderer Dank gilt allen beteiligten Vertreterinnen und Vertretern aus den sieben Fokusfeldern im Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein sowie aus Politik und Wirtschaft, die durch ihre fachliche Expertise, ihre kritischen Anmerkungen sowie ihre wertvollen Impulse maßgeblich zur Erstellung dieser Energiewendeforschungs-Roadmap beigetragen haben. Ihre Beiträge haben wesentlich dazu verholfen, die inhaltliche Tiefe, Qualität und Praxisrelevanz dieses Dokuments zu sichern. Für die Bereitstellung der finanziellen Ressourcen danken wir dem Ministerium für Allgemeine und Berufliche Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur (MBWFK) des Landes Schleswig-Holstein.

9. Impressum

Herausgeber und Sitz der Redaktion:
Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein bei der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH / EKSH
Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Frank Osterwald (Projektleiter und V. i. S. d. P.)
Anschrift:
Wissenschaftspark Kiel, Boschstraße 1, 24118 Kiel
Kontaktdaten:
Telefon: +49 431 36 30 36 00
E-Mail: info[at]eksh.org
Redaktion und wissenschaftliche Bearbeitung:
Chefredaktion:
Prof. Dr.-Ing. Ulf Schümann (HAW Kiel)
Dr. Karena Sprick (Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein | EKSH)
Redaktionelle Bearbeitung und Zusammenführung:
Die vorliegende Energiewendeforschungs-Roadmap basiert auf fachlichen Beiträgen, Einschätzungen und Zuarbeiten mehrerer Forschender (siehe Kapitel 8. Danksagung).
Die redaktionelle Zusammenführung, Strukturierung, fachliche Einordnung und Endbearbeitung erfolgte durch Prof. Dr.-Ing. Ulf Schümann und Dr. Karena Sprick.
Grafische Umsetzung:
Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein.
Version und Veröffentlichungsstand
Version: 1.0
Veröffentlichungsdatum: 20.10.2026
Redaktionsschluss: 20.10.2026
Roadmap-Grafik:
Die in dieser Veröffentlichung enthaltene Roadmap-Grafik wird zusätzlich auf der Website des Landeskompetenzzentrums Energiewendeforschung Schleswig-Holstein veröffentlicht. Der im Dokument enthaltene QR-Code verweist auf die entsprechende Online-Veröffentlichung.
Soweit auf der Website aktualisierte Fassungen veröffentlicht werden, können diese von der vorliegenden Version abweichen.
Urheberrecht:
Die Urheberrechte an dieser Veröffentlichung sowie den enthaltenen Texten, Abbildungen, Grafiken und sonstigen Inhalten verbleiben bei den jeweiligen Urhebern bzw. Rechteinhabern. Die Nutzung, Vervielfältigung, Verbreitung oder öffentliche Wiedergabe über die gesetzlich zulässigen Schranken des Urheberrechts hinaus bedarf der vorherigen Zustimmung der jeweiligen Rechteinhaber.
Zitate und Verweise sind unter Angabe der vollständigen Quelle zulässig.
Hinweis zum Charakter der Veröffentlichung
Diese Energiewendeforschungs-Roadmap stellt eine wissenschaftlich begründete Einschätzung auf Basis des zum Zeitpunkt der Veröffentlichung verfügbaren Wissensstandes dar.
Die dargestellten Positionen, Einschätzungen und Schlussfolgerungen geben nicht notwendigerweise die individuellen Auffassungen aller beteiligten Forschenden, Institutionen oder Fördermittelgeber wieder. Wissenschaftliche Erkenntnisse unterliegen einem kontinuierlichen Erkenntnisfortschritt; die Inhalte dieser Roadmap können daher künftig ergänzt, aktualisiert oder fortgeschrieben werden.
Für die redaktionelle Zusammenstellung und Veröffentlichung zeichnet der Herausgeber verantwortlich.
Förderung
Das Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung Schleswig-Holstein bei der EKSH wird aus Mitteln des Ministeriums für Allgemeine und Berufliche Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur (MBWFK) des Landes Schleswig-Holstein gefördert.
Zitierempfehlung
Schümann, U. & Sprick, K. et al. (2026). Energiewendeforschungs-Roadmap für das Land Schleswig-Holstein: Leistungselektronik & Batteriespeicher – Transformationspfade zur Klimaneutralität 2040, Nr. 1.2026 | Oktober 2026, Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung, EKSH, Arbeitspapier.

Stand der Informationen: 20. Oktober 2026.

10. Anhang: Grafische Darstellung

Energiewendeforschungs-Roadmap für Schleswig-Holstein

für das Fokusfeld Leistungselektronik & Batteriespeicher

Version und Veröffentlichungsstand
Version: 1.0
Veröffentlichungsdatum: 20.10.2026
Redaktionsschluss: 20.10.2026

Energiewendeforschungs-Roadmap für das Land Schleswig-Holstein

Leistungselektronik & Batteriespeicher

Version 1.0 | 20. Oktober 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 Versorgungs-sicherheit und Resilienz als zentrale Ziele
Ein sicheres und resilientes Energiesystem gilt als zentrale Voraussetzung der Transformation.

Leistungselektronik & Batteriespeicher als Schlüsseltechnologien für die Energiewende
Diese Schlüsseltechnologien ermöglichen den Aufbau einer sicheren und resilienten Energieversorgung, -verteilung und -nutzung in allen Sektoren.

Innovationsgetriebene Wertschöpfungs-ketten für Anwendungssyteme
Innovation, Geschäftsmodelle und Standards im Bereich LE und Batterietechnik machen Klimaneutralität wirtschaftlich attraktiv.

Zukunftsfähige Arbeit, Qualifikation und Arbeitsmärkte
Arbeitsmärkte und Qualifikationen entwickeln sich aktiv mit der Transformation.

Schutz von Natur, Umwelt und Ressourcen
Klimaneutralität geht mit messbarem Schutz von Natur, Umwelt und Ressourcen einher. Eine nachhaltige, resourcenschonende Produktion steht dabei im Fokus.

Wettbewerbsfähiger Standort und industrielle Transformation
Klimaneutralität stärkt den Standort und zieht zukunftsfähige Industrie aus dem Bereich LE & Batteriespeicher an.

Technologien der Leistungselektronik & Batteriespeicher als Schlüssel-komponenten für die Energiewende
Alle Energiesysteme sind mit Komponenten aus der Leistungselektronik & Batteriespeicher-technologie ausgestattet.

Klimaneutrales Industrieland Schleswig-Holstein
Technologien der Leistungselektronik & Batteriespeicher sind die "Enabler" der Enrgiewende.

Klimaneutraler Gebäudebestand und netzdienlicher Gebäudebetrieb
Gesamter Gebäude-bestand ist auf klimaneutrale und bezahlbare Wärme-versorgung umgestellt und netzdienlicher Gebäudebetrieb stabilisiert das Energiesystem.

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

Digital steuerbares, flexibles und effizientes Energiesystem
Das Energiesystem ist sicher steuerbar und nationale Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit ist gestärkt.

Leistungselektronik
LE dominiert durch Si-Leistungshalbleiter wird zunehmend mit WBG (SiC/GaN)-Halbleiter ersetzt. Hocheffiziente LE wird für verschiedenste Anwendungen benötigt u. in sehr großem Maßstab eingesetzt.

Energie-Erzeugung u. -verteilung im sicheren Netz
Wind- u. PV sind massiv ausgebaut u. hinsichtlich Leistung, Effizienz u. geringeren Kosten weiterentwickelt. Das Netz ist sicher steuerbar und stabil. Überbauung von Netzverknüpfungspunkten beginnt. HVDC Ausbau.

Großspeicher u. netz-dienliche Integration von Elektrolyseuren für die H_2-Erzeugung
Großskalige BESS werden für Peak-Shaving, Netzdienstleistungen und PV-Integration genutzt u. Elektrolyseure werden als netzdienliche, hochdynamische Verbraucher integriert.

Sichere, resiliente, robuste Energie-systeme und Wettbewerbsfähigkeit
Fortschritte in der Transformation wirken sich auf alle Sektoren positiv aus.

Leistungselektronik für die Elektrifizierung aller Sektoren
Leistungselektronik für die Netzintegration von Energieerzeugern, -speichern u. -verbrauchern, für eine Vielzahl von elektrischen Antrieben u. Prozessen nimmt eine zunehmende Rolle ein.

Sicher steuerbare Energieverteilung
Vollständig erneuerbarer Strom. Offshore Wind erzeugt teils direkt H_2. Ein sicheres Netz entsteht aus Speicher, H_2-Kraftwerke u. Sektorkopplung. DC -Kopplung u. autonome Mikronetze gewinnen an Bedeutung.

Netzdienliche Energiespeicherung
Speichersystem aus E-Fahrzeugen u. (Groß-) Speichern kann Erzeuger-spitzen aufnehmen (Peak shaving). Stationäre Spei-cher nehmen im Energie- und Industriebereich stark zu. H_2 als Energieträger u. f. chemische Nutzung.

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

Modulare WBG-LE für DC-Industrienetze
Vollintegrierte LE ermöglicht Energiehub-Systeme (Elektrizität + H_2), emissionsfreie maritime Antriebe u. HV-BESS. Vorbereitung Ultra-WBG (Ga2O3/Diamant) für zukünftige Anwendungen.

WBG- u. globale HVDC-Netze
WBG-Hallbleiter dominie-ren die LE. Hybride AC/DC-Netze sind etabliert. Supraleitung ermöglichen in bestimmten Teilen verlustarmen Transport. Ein flexibles Stromsystem sichert die Residuallast,

Netzdienliches Speichersystem, hybride Energiespeicher
Fahrzeuge, stationäre Speicher u. Großspeicher sind netzdienlich integriert als fundamentaler Teil der Netzregulation (1°-, 2°-, 3°-Regelung). Hybrid-Energiespeicher bestehen aus Batterie + H_2+ Superkondensatoren.

Erste Effizienz- und Konsistenzwirkunge n der Energiewende
In einzelnen Sektoren zeigen sich erste Wirkungen durch Effizienzsteigerung, Technologiewechsel und Nachfrageanpassung.

Leistungselektronik für Energieerzeugung und -verteilung
Leistungselektronik für Anbindung der Energie-erzeugung (DC) an die Stromnetze (AC), ein sicher steuerbares Netz mit fort-schreitender Integration von Erzeugern, Ver-brauchern, Speichern sowie Gefahrenabwehr der durch Cybersecurity.

Batteriespeicher für die Netzstabilisierung und alle Sektoren
Großskalige Batteriespeichersysteme BESS sind in die Netze integriert.Spezifische Akkus und Batterien sind für alle Anwendungen in der Entwicklung.

Elektrifizierung der Industriesysteme mit Leistungselektronik
Industrieprozesse werden mit leistungselektro-nischen Komponenten zunehmend effizienter und THG-sparender. Robotik-Anwendungen nehmen zu, Energieintensive KI-Rechenzentren sind ans HV-Netz angeschlossen.

Energieversorgung der Haushalte mit PV, Speicher und Wärmepumpen
Installation von PV, Bat-teriespeicher und Wärme-pumpen hat zuge-nommen. Effizienz-anforderungen an Energie-verbraucher wachsen. Erste smart home Konzep-te sind in der Umsetzung.

E-Mobilität für Per-sonen, Waren, Schiffe
EE-Mobilität im PKW- u. LKW-Bereich nimmt zu, bei gleichzeitigem Ausbau der Ladeinfrastruktur. Für den Schienenverkehr u. die Landwirtschaft werden Akkus entwickelt. Kleinere Schiffe/ Fähren u. Hafen-fahrzeuge fahren elektrisch.

Große Palette an Speichertechnologie n
Groß- u. Langzeitspeicher nehmen stark zu. Na-Ionen Batterien sind neben Li-Ionen gängig. Feststoff-batterien beginnen sich zu etablieren. Metallbasierte wässrige Energiespeicher spielen im stationären Großspeicherbereich zunehmend eine Rolle.

Defossilierung der Industrieprozesse
Zunahme von Robotik in Fertigungsprozessen findet massiv statt. DC-Netze versorgen Fabriken mit Energie. KI-Rechenzentren werden ausgebaut. Der Bedarf für deren Anbindung an die Netze inkl. Energieversorgung nimmt zu.

Haus-Energiesystem aus Wärmepumpe, PV u. Batteriespeicher
Installation von PV mit Batteriespeichern für die Stromversorgung u. Wärmepumpen für Wärmeversorgung sind weit verbreitet.

Mobilität: "all goes electric"
HV-Bordnetz ist etabliert. Hochleistungsladesysteme in Häfen. Schiffe sind elektrifiziert. Neue elek-trische Flugzeugtypen sind auf dem Markt. Batterie-elektrische Zugantriebe sind teilw. etabliert u. für die Landwirtschaft werden Konzepte entwickelt.

Batteriespeicher für Netze, Mobilität
Na- u. Li-Ionen-Batterien u. weitere, wie Redoxflow- u. Eisenflow-Batterien (JFB) dominieren. Energiespeicher sind netzdienlich integriert (auch Hausspeicher) u. große HV-BESS Parks (MW-GW) sind fundamentaler Teil der Netze.

Industriesysteme / Prozesswärme: DC-Netze, HV-Bess
DC-Netze sind, insbes. für Fertigungsprozesse, unter Einsatz von vollintegrierten, modularen Leistungsendstufen ("Plug & Play") und HV-Batteriespeichersystem en (HV-BESS, <1.500V) etabliert.

Haus-Energiesystem aus PV, Speicher und Wärmepumpe
PV, Wärmepumpen, EV und Batteriespeicher sind in Haushalten Standard u. über DC- Mikronetze verbunden. Haushalte sind netzdienlich integriert.

Emissionsfreie Schiff-fahrt, HV-Bordnetz, Avionik
HV-Bordnetze (1500V) in der Anwendung, Hafen-infrastruktur ist vollständig elektrifiziert, Schiffs-antriebe sind emissionsfrei, Drohnen f. Kurzstrecken mit Batterieantrieb in Betrieb, Elektrifizierung der Avionik hat begonnen.

Leistungselektronik- und Batteriesystem-Innovationen
Entwicklung innovativer und kostengünstiger Leistungselektronik- und Speichertechnologien mit hohem Wirkungsgrad und hohen Leistungsdichten.

WBG-LE mit hohen Wirkungsgraden u. Leistungsdichten
Entwicklung robuste WBG-Leistungselektronik (GaN, SiC) u. Systemtopologien auch für den NV- und MV-Bereich (z. B. FACTS, MMC/CHB, SSTs). WBG-LE mit hohen Wirkungsgraden u. Leistungsdichten.

Schwarzstartfähige LE für stabile Netze
Entwicklung kosten-günstiger Umrichter mit WBG (SiC/GaN), netzbil-dender Stromrichter (schwarzstartfähig) u. netz-stabilisierender, zuver-lässiger LE, um Volatilität zu ermöglichen. Integration von DC-Netzen u. netzstützenden Energiespeichern.

Großspeicher, Elektro-lyseure, Batterien BMS
Entwicklung effizienter LE und Umrichtersysteme für Elektrolyseure und Großspeicher mit WBG-Halbleitern (SiC/GaN). Entwicklung Smart Battery Cells und intelligente Batteriemanagement-systeme (BMS) und Festkörperbatterien.

Weiterentwicklung Leistungselektronik- und Batteriesystem-Innovationen
Steigerung Energiedichte, Leistungsdichte und neue Batteriezelltopologien mit neuen Materialen. Weiter-entwicklung von Schlüssel-komponenten für die Energiesysteme aller Sektoren.

Nachhaltige, kosten-effiziente, intelligente LE
Konzepte für nachhaltige, kostengünstige Produktion von LE-Komponenten. Weiterentwicklung von WBG-Halbleiter u. Vorbereitung Ultra-WBG. Entwicklung LE f. Robotik, KI, Fusionskraftwerke.

Energieerzeugung, -transport, vermaschte DC-Netze
Weiterentwicklung WBG-Wechselrichter für Wind- u. PV-Parks u. LE-Komponenten für Netze (z.B. SSTs, Schütze) sowie vermaschte DC-Netze. Technologien für Small Modular Reactors (SMRs) u. Fusionskraftwerke.

Großskalige Batterie-systeme u. H_2 für Industrie
Weiterentwicklung großskaliger Batterie-systeme aus Li-, Na- u. Redox-Flow-Batterien für Großspeicher. Vorbereitung Festkörperbatterien für stationäre Speicher. LE für die industrielle Nutzung von H_2.

Zukunftsweisende LE
Entwicklung von LE-Sys-temen, die effizient, leistungsstark, langlebig, kostengünstig u. nach-haltig sind - bei Dominanz von WBG (SiC/GaN). Entwicklung von LE für Fusionskraftwerke. Einführung von Ultra-WBG Systemen (Diamand, Ga2O3).

EE-Erzeugung, -verteilung u. -speicherung
Entwicklung von LE für standardisierte Einspeisesysteme mit WBG. Integration neuer Speichertechnologien im xMWh-Bereich, z.B. Na-Ionen-Batterien.

Haushalte: Batteriespeicher
Entwicklung von DC-Mikronetz im Haushalt als Standard für PV/Speicher/ Elektrofahrzeug/ Wärmepumpe mit KI-gesteuertem Lastmangement

Innovationen im Bereich Leistungselektronik und Batteriespeicher
Weiterentwicklung wissenschaftlicher Grundlagen hinsichtlich Effizenz und Leistungsfähigkeit.

Industrie, Digitalisierung und Ressourcen
Wissenschaftliche Grundlagen zur Transformation energieintensiver, digitaler und ressourcenrelevanter Anwendungen.

Neue Batterie-zelltypen und 5r
Kostengünstige industrielle Fertigung, intelligente BMS u. Konzepte für 5r. Bessere Li-Ionen- (mit Si-Anoden), Na-Ionen- und Feststoffbatterien u. Entwicklung modulärer Wechselakkus (z.B. f. Landwirtschaft).

Effiziente Industrie-systeme u. KI-Rechenzentren
Entwicklung von spezif. Umrichtern und Netzteilen für industrielle DC-Fertigungsnetze, KI-Rechenzentren, sowie Umrichter-/ Antriebssystemen für Hochdruckpumpen, Kompressoren u. Robotik.

Wärmepumpen, Hausnetze, Geräte
Entwicklung effizienter Netzteile für Integration von Verbrauchern im Haushalt u. Steuerbarkeit über Smart Meter Gateway. Pumpen u. Antriebe für Wärme-pumpen sowie Teil-DC-Netze in Haushalten, um Volatilität im Stromnetz zu verringern.

Mobilität: bidirektio-nales Laden, DC-Bord-netz, Wechselakkus
Entwickl. hocheffizienter, bidirektion. Ladesysteme f. Netzanbindung von Auto-batterien u. Hochleistungs-ladestationen mit Batterie-speicher, Wechselakkus f. Landwirtschaft, spezif. LE-Komponenten f. Schiffs-DC-Netze, Brennstoffzell-systeme, Batteriespeicher u. Schiffs-Ladesysteme.

Hochleistungs- und Langzeit-Batteriespeicher
Weiterentwicklung von Na-Ionen-Batterien, Redox-Flow-, LFP-, wässrigen Metallspeicher-, und Festkörperbatterien. Ent-wicklung von graphenen Superkondensatoren. KI-unterstützte EMS und BM. sowie nachhaltige Produktion u. Betrieb.

Industriesysteme/ Prozesswärme: LE für Rechenzentren, Robotik
Entwicklung modularisier-ter LE für Rechenzentren u. Fertigungsprozesse: Ent-wicklung effizienter Umrichter (für DC- u. AC-Verteilung, auf NV- u. MV-Ebene). LE für Robotik z. B. für humanoide Roboter.

Haushalte/ Wärme: Netzintegration
Integration der Hausnetze (PV, Batteriespeicher, Wärmepumpe, EV) in die Stromnetze via bidirek-tionaler Wechselrichter (DCAC). Nutzung von E-Auto- u. PV-Batterien zur Netzstabilisierung des Haus- u. Stromnetzes.

Mobilität zu Land, Wasser, in der Luft
Einsatz von Na-Ionen-Batterien. Entwicklung von WBG-LE u. Batterien für DC-Bordnetze, Ladeinfra-strukturen im MV-Bereich, elektrische Schiffsantriebe, airborne urbane transport sowie von ultraschnellade-fähigen Batterien, SiS/LiS-Batterien für Avionik.

Innovative Batteriespeicher und Nachhaltigkeit
Entwicklung hybrider Batterien und Redoxflow- u. Eisenflow-Batterien (JFB) im xMWh-Maßstab. Festkörperbatterien gewinnen an Bedeutung. Batteriesystem sind nachhaltiger (5r).

Industriesysteme/ Prozesswärme
Leistungselektronik für industrielle Anwendungen: HV-Batteriespeicher-systeme, hybride Industrienetze auf DC-Basis, DC-backbone.

Klimaneutrale Mobilität
Entwicklung von LE u. Batteriespeicher für HV-Bordnetze, Avionik u. urbane Luftfahrt sowie für hybride Energiesysteme in der Schiffahrt (z. B. aus H2+Batterien+DC-Bordnetze+WBG o. grüne Ammoniakverbrennung).

Umsetzungsfähige Geschäfts- und Akteursmodelle
Breitenwirksame Transformation erfordert Geschäftsmodelle, die auf handelnde Akteure ausgerichtet sind.

Dynamische Netzentgelte
Eine einheitlich Regulation stellt die technische Umsetzung zur Verwendung von dynamischen Netzentgelten sicher.

Preis-, Anreiz- und Marktregeln des Energiesystems
Ökonomische Rahmenbedingungen setzen konsistente Anreize für klimaneutrale Entscheidungen.

Wissens-, Fachkräfte- und Innovations-infrastruktur
Personelle, akademische und unternehmerische Kapazitäten für Transformation sind institutionell verankert.

Akzeptanz für die Elektrifizierung aller Bereiche
Die zunehmende Elektrifizierung von Mobilität, Wärme-versorgung, Industrie und weiteren Verbrauchs-sektoren erfordert neben technolo-gischen Lösungen auch eine breite gesell-schaftliche und wirtschaftliche Akzeptanz

Verbindliche Regulierung und technische Betriebsstandards
Regulatorische Vorgaben und technische Standards ermöglichen einen sicheren, effizienten und flexiblen Systembetrieb.

Batteriespeicher: Regulatorik für die Energiespeicherung
Das Regelwerk für die Speicherung von Energie ist definiert.

Status quo — **Hinweis:** Innerhalb der Blöcke besteht keine zeitliche Reihenfolge.

heute — **bis 2030** — **bis 2035** — **bis 2040**

Transformation der Industriesysteme

Transformation der Haushalte

Transformation der Mobilität und maritimer Anwendungen

Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbarer Energie

Erstellt in Zusammenarbeit mit:
INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK

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

©2026 Landeskompetenzzentrum Energiewendeforschung| EKSH