

„ENSURE - NEUE ENERGIE**NETZ**STRUKTUREN FÜR DIE  
ENERGIEWENDE“

# KOPERNIKUS ENSURE >> PROJEKTE

Die Zukunft unserer Energie

## ENSURE Handlungsempfehlungen

31. Juli 2026

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## Erläuterung zum Dokument

Den Stromnetzen kommt bei der Energiewende in Deutschland eine zentrale Rolle zu. Ihre Gestaltung gilt als entscheidend dafür, ob die Transformation des Energiesystems gelingt. Die erfolgreiche Transformation kann nicht auf Technik und Kosten reduziert werden, sondern hängt auch davon ab, dass gesellschaftliche und politische Aushandlungsprozesse funktionieren. Um die Transformation wissenschaftsbasiert zu begleiten und zu unterstützen, wurde im ENSURE-Projekt zehn Jahre interdisziplinär geforscht. Die Erkenntnisse hat das ENSURE-Konsortium zu konkreten, adressatenspezifischen Handlungsempfehlungen kondensiert.

Die Kopernikus-Projekte leisteten einen wesentlichen Beitrag dazu, dass Deutschland seine Klimaziele bis 2045 erreichen kann. Über drei Phasen und insgesamt zehn Jahre wurden vier große Projekte vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert.

Im ENSURE-Projekt waren in der dritten Phase die folgenden Partner beteiligt:

### **Vollpartner:**

Allgäu Netz GmbH & Co. KG, 87435 Kempten, „AN“  
Avacon Netz GmbH, 38350 Helmstedt, „Avacon“  
Bergische Universität Wuppertal, 42119 Wuppertal, „BUW“  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel, „CAU“  
Deutsche Umwelthilfe e.V., 10178 Berlin, „DUH“  
Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 76131 Karlsruhe, „DVGW“  
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH, 50827 Köln, „EWI“  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91054 Erlangen, „FAU“  
Germanwatch e.V., 53113 Bonn, „Germanwatch“  
Hitachi Energy Germany AG, 68309 Mannheim, „Hitachi“  
Hochschule München, 80335 München, „HM“  
Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe, „KIT“  
LEW Verteilnetz GmbH, 86150 Augsburg, „LVN“  
Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, 93059 Regensburg, „MR“  
Öko-Institut e.V., 79100 Freiburg, „ÖI“  
OPAL-RT Germany GmbH, 90408 Nürnberg, „OPAL“  
PSI FLS Fuzzy Logik & Neuro Systeme GmbH, 44227 Dortmund, „PSI FLS“  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 52062 Aachen, „RWTH“  
Siemens Aktiengesellschaft, 80200 München, „Siemens“  
SWKiel Netz GmbH, 24113 Kiel, „SWKiel“  
Technische Universität Dortmund, 44227 Dortmund, „TUDO“  
Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, „TUII“  
TenneT TSO GmbH, 95448 Bayreuth, „TenneT“  
Westfalen Weser Netz GmbH, 33102 Paderborn, „WWN“

### **Assoziierte Partner:**

E.ON SE, 45131 Essen, „E.ON“  
e\*Message W.I.S Deutschland GmbH, 10119 Berlin, „eMessage“  
PSI Software SE, 44227 Dortmund, „PSI“  
Stadtwerke Augsburg Holding GmbH, 86152 Augsburg, „SWA“  
Städtische Werke Borna Netz GmbH, 04552 Borna, „SWB“  
Stadtwerke Service Meerbusch Willich, 47877 Willich, „SWMW“  
Wesernetz Bremen GmbH, 28197 Bremen, „Wesernetz“

Das vorliegende Dokument wurde durch die Taskforce Handlungsempfehlungen aus den ENSURE-Ergebnissen zusammengestellt.

**Mitglieder der Taskforce Handlungsempfehlungen:**

Dr. Leyla Asgarieh (Hitachi), Dr. Anne Bauer (Siemens), Prof. Dierk Bauknecht (ÖI), Moritz Edinger (SWKiel), Dr. Kevin Förderer (KIT), Janine Gondolf (KIT), Judith Grünert (DUH), Dr. Christian Hotz (DVGW), Imke Irmer (DUH), Dr. Lisa Just (EWI), Matthias Koch (ÖI), Ján Koreň (EWI), Constanze Liepold (RWTH), Dr. Gert Mehlmann (FAU), Peter Noglik (Hitachi), Amir Ashour Novirdoust (EWI), Dr. Witold-Roger Poganietz (KIT), Antonie Reinecke (EWI), Julian Richter (FAU), Dr. Hanno Stagge (TenneT), Christof Timpe (ÖI).

Das Direktorium und der Wissenschaftliche Beraterkreis von ENSURE haben insbesondere übergeordnete Zusammenhänge ergänzt und die Qualitätssicherung durchgeführt.

**Mitglieder des Direktoriums:**

Stefan Habild (Hitachi) Prof. Veit Hagenmeyer (KIT) Dr. Roland Hermes (E.ON) Prof. Jan Hesthaven (KIT), Florian Hintz (Avacon), Prof. Jochen Kreusel (Hitachi) Dr. Florian Martin (TenneT), Bernd Meyer (Siemens), Prof. Albert Moser (RWTH) Prof. Stefan Niessen (Siemens), Dr. Gontran Paques (Hitachi), Prof. Ulrich Rüdiger (RWTH), Dr. Michael Schwan (Siemens), Frank Schwermer (Avacon), Dr. Hanno Stagge (TenneT), Prof. Matthias Wessling (RWTH).

**Mitglieder des Wissenschaftlichen Beraterkreises:**

Prof. Marc Oliver Bettzüge (EWI), Dr. Jochen Jung (TenneT), Prof. Rainer Krebs (Siemens), Prof. Jochen Kreusel (Hitachi), Dr. Sophie Kuppler (KIT), Prof. Marco Liserre (CAU), Prof. Matthias Luther (FAU), Prof. Antonello Monti (RWTH), Dr. Tobias Pletzer (PSI), Dr. Witold-Roger Poganietz (KIT), Prof. Christian Rehtanz (TUDO), Prof. Markus Zdrallek (BUW).

Der Projektausschuss von ENSURE hat als Vollversammlung des Projekts das Dokument verabschiedet.

**Mitglieder des Projektausschusses:**

Veronika Barta (HM), Bastian Bauhaus (SWKiel), Prof. Dierk Bauknecht (ÖI), Sonja Baumgartner (LVN), Liv Becker (DUH), Tim Bierschwale (Wesernetz), Sebastian Brueske (MR), Timo Busse (WWN), Stefan Dalhues (PSI), Hendrik Franke (SWB), Dr. Frank Graf (DVGW), Dr. Michael Gratza (TenneT), Prof. Veit Hagenmeyer (KIT), Dr. Roland Hermes (E.ON), Florian Hintz (Avacon), Dr. Christian Hotz (DVGW), Sebastian Hubschneider (OPAL), Marc Jachenholz (WWN), Dr. Jochen Jung (TenneT), Dr. Lisa Just (EWI), Robert Köberle (AN), Prof. Rainer Krebs (Siemens), Dr. Marius Langwasser (CAU), Prof. Matthias Luther (FAU), Dr. Gert Mehlmann (FAU), Dr. Holger Müller (Siemens), Christian Nerowski (TUDO), Prof. Stefan Niessen (Siemens), Dirk Nopens (eMessage), Dr. Tobias Pletzer (PSI), Julia Pössinger (BUW), Prof. Christian Rehtanz (TUDO), Florian Samweber (SWA), Dr. Steffen Schlegel (TUII), Johannes Schmiesing (Avacon), Dr. Kevin Schönleber (Hitachi), Henning Schröer (SWKiel), Christof Timpe (ÖI), Franziska Tischbein (RWTH), Prof. Stephanie Uhrig (HM), Prof. Dirk Westermann (TUII), Simon Wolf (Germanwatch), Daniel Wolter (SWMW), Prof. Markus Zdrallek (BUW), Constantin Zerger (DUH).

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ERLÄUTERUNG ZUM DOKUMENT .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>2</b>  |
| INHALTSVERZEICHNIS .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 4         |
| <b>1. NEUE ENERGIENETZSTRUKTUREN FÜR DIE ENERGIEWENDE - DAS KOPERNIKUS-PROJEKT ENSURE (2016-2026) .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>5</b>  |
| 1.1. DAS STROMNETZ VON MORGEN GESTALTEN.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 6         |
| 1.2. HERAUSFORDERUNGEN UND ZIELKONFLIKTE .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 7         |
| 1.3. DEN ÜBERTRAG IN DIE PRAXIS ERMÖGLICHEN .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 9         |
| <b>2. DIE ENSURE-HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>10</b> |
| ➤ EFFIZIENZ IM ENERGIESYSTEM DURCH EINEN KONSISTENTEN ORDNUNGS- UND PLANUNGSRAHMEN STEIGERN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG RECHTSRAHMEN). ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 10        |
| ➤ DIE DIGITALISIERUNG DER NETZE UND DIE SYSTEMATISCHE ERFASSUNG DES NETZZUSTANDS ZÜGIG VORANTREIBEN, UM DIE EFFIZIENZ UND DIE SICHERHEIT DES NETZBETRIEBS ZU STEIGERN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG ZUSTANDSERFASSUNG).....                                                                                                                                                                            | 12        |
| ➤ DIE STROMNETZE ZÜGIG ZU AKTIVEN, ANPASSUNGSFÄHIGEN SYSTEMEN WEITERENTWICKELN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG ADAPTIVES NETZ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13        |
| ➤ VORHANDENE KAPAZITÄTEN BESTEHENDER ANLAGEN IN DEN NETZEN UMFANGREICHER NUTZEN, DIE NETZE BEDARFSGERECHT AUSBAUEN UND EINE VORAUSSCHAUENDE INSTANDHALTUNG EINFÜHREN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG INFRASTRUKTUR) .....                                                                                                                                                                                | 15        |
| ➤ EINEN „DIGITALEN ZWILLING“ DES STROMSYSTEMS ALS GEMEINSAME ENTSCHEIDUNGS-, PRÜF- UND LERNINFRASTRUKTUR INSTITUTIONALISIEREN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG SIMULATIONSZENTRUM) .....                                                                                                                                                                                                                  | 16        |
| ➤ DEN REGULATORISCHEN RAHMEN SCHAFFEN, UM DEN EINSATZ VON INNOVATIVEN LÖSUNGEN IN DEN STROMNETZEN DURCH DIE NETZBETREIBER ZU ERMÖGLICHEN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG INNOVATIONEN) .....                                                                                                                                                                                                             | 17        |
| ➤ IM NETZ VERFÜGBARE FLEXIBILITÄTEN GEZIELT AKTIVIEREN UND KOORDINIEREN, UM DEN BETRIEB DES STROMSYSTEMS ZU UNTERSTÜTZEN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG FLEXIBILITÄTEN).....                                                                                                                                                                                                                            | 19        |
| ➤ DAS WISSEN ALLER AKTEURE ÜBER DIE ENERGIEWENDE GEZIELT STÄRKEN, DAMIT DIESE ALS TEIL DES ENERGIESYSTEMS NACHHALTIGE ENTSCHEIDUNGEN TREFFEN KÖNNEN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG WISSENSBASIS).....                                                                                                                                                                                                   | 20        |
| ➤ GEMEINSAM GETRAGENE VISIONEN FÜR DIE UMSETZUNG DER ENERGIEWENDE ENTWICKELN, UM VIELE AKTEURE FÜR EINE AKTIVE BETEILIGUNG ZU MOTIVIEREN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG ENERGIEWENDE-VISIONEN) .....                                                                                                                                                                                                    | 22        |
| ➤ DIE AUSGESTALTUNG DER ENERGIEWENDE VOR ORT MIT EINER VIELFALT VON BETEILIGTEN UNTERSTÜTZEN (HANDLUNGSEMPFEHLUNG PROZESSGESTALTUNG) .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 23        |
| <b>3. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR VERSCHIEDENE STAKEHOLDER.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>25</b> |
| 3.1. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR STROMNETZBETREIBER .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 25        |
| 3.2. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN: TECHNOLOGIEN NUR FÜR DAS SYSTEM VON MORGEN UND FÜR DIE INTEGRATION IN DAS SYSTEM VON HEUTE ENTWICKELN. INNOVATIONEN KONSEQUENT AN INTEROPERABILITÄT, STANDARDISIERUNG, SKALIERBARKEIT UND REGULATORISCHER ANSCHLUSSFÄHIGKEIT AUSRICHTEN UND DAMIT DIE VORAUSSETZUNGEN FÜR EINE SCHNELLE UND BREITE UMSETZUNG IN NETZBETRIEB UND ENERGIEMÄRKTEN SCHAFFEN. .... | 25        |
| 3.3. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR GESELLSCHAFTLICHE VERTRETUNGEN .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 37        |
| 3.4. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR REGULIERUNG.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 39        |
| 3.5. OPTIONEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 43        |

## 1. Neue Energienetzstrukturen für die Energiewende - Das Kopernikus-Projekt ENSURE (2016-2026)

Die Energieversorgung in Europa und Deutschland steht vor einer grundlegenden Herausforderung: Sie muss bis 2045 klimaneutral werden, ohne an Versorgungssicherheit einzubüßen, und dabei die Wirtschaftlichkeit und gewachsenen sozialen, politischen und marktbezogenen Gegebenheiten beachten. Dies erfordert vor allem den Ausbau regenerativer Energiesysteme sowie die schrittweise Stilllegung oder Umstellung emissionsintensiver, konventioneller Kraftwerke. Dadurch verändert sich die Struktur der Stromerzeugung grundlegend: An die Stelle weniger großer, steuerbarer Kraftwerke tritt ein System vieler dezentraler, dargebotsabhängiger (d. h. für Wind- und Solarenergie vom Wetter abhängiger) Anlagen. **Damit rücken die Stromnetze in den Mittelpunkt der Transformation. Sie müssen auch bei schwankender Einspeisung und teils stark variierender Nachfrage jederzeit eine stabile Versorgung gewährleisten.**

**Im Zuge der Energiewende wird Energie zunehmend in Form von Strom genutzt**, da sich elektrische Energie vergleichsweise effizient und emissionsarm bereitstellen und einsetzen lässt. Anwendungen, die bislang auf fossilen Energieträgern basierten, werden dabei auf elektrische Lösungen umgestellt (Defossilisierung) – etwa in der Wärmeversorgung, im Verkehr oder in der Industrie. **Infolgedessen wächst der Anteil elektrischer Energie an der gesamten Energieversorgung deutlich.** Da der Einsatz von Strom meist effizienter ist als der von fossilen Energien, kann der gesamte Energiebedarf dabei in der Regel sogar reduziert werden.

**Mit dem Rückbau konventioneller Großkraftwerke wird zudem Ersatz für Funktionen** notwendig, die für den stabilen Stromnetzbetrieb wesentlich sind und bisher von diesen großen Kraftwerken erfüllt wurden. Darunter fallen unter anderem die **Momentanreserve** (kurzfristige Stabilisierung der Netzfrequenz), die **Frequenzhaltung** (kontinuierlicher Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch zur Stabilisierung der Netzfrequenz), die **gesicherte Leistung** (verlässlich verfügbare Kapazität zur Deckung der Nachfrage) sowie die Schwarzstartfähigkeit. Es ergibt sich ein wachsender Bedarf, Anlagen, Geräte und Technologien im Netz für die alternative Bereitstellung dieser Funktionen netzdienlich steuern zu können. Ergänzend gewinnen **Speichertechnologien, Lastmanagement** (gezielte Anpassung der Nachfrage an das Angebot) sowie neue netz- und systemdienliche Betriebsstrategien an Bedeutung. **Die Transformation des Energiesystems ist anspruchsvoll und die Klimaziele setzen einen ambitionierten zeitlichen Rahmen.** Dabei sind technische, ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Anforderungen gleichzeitig zu berücksichtigen und miteinander in Einklang zu bringen.

Als die Kopernikus-Projekte im Jahr 2016 auf den Weg gebracht wurden, hatte es bereits mehrere nationale Forschungs- und Demonstrationsprogramme, wie e-Energy oder die Schaufensterprojekte Energie (SINTEG) gegeben. Diese Programme haben im laufenden Transformationsprozess erkannte Probleme adressiert und waren bevorzugt anwendungsnah. Als Ergänzung dazu entstand die Idee eines **längerfristig angelegten, inter- und transdisziplinären Rahmenprogramms**, in dem Wissenschaft, Industrie und Anwendung **grundsätzliche Fragestellungen** bei der Transformation der Energiesysteme bearbeiten sollten – das Kopernikus-Programm.

Innerhalb des aus vier Projekten bestehenden Kopernikus-Programms deckt ENSURE die Fragen um die Netzstrukturen des Energiesystems ab – wegen der besonderen Bedeutung des elektrischen Sektors mit dem **Schwerpunkt auf den Netzen der elektrischen Energieversorgung**. Stromnetze lassen sich aus verschiedenen Perspektiven betrachten: Als **technische Infrastruktur** erfordern sie zur Bewältigung zukünftiger Aufgaben neue (technische) Lösungen. Zugleich stehen sie als allgegenwärtiger Bestandteil des Energieversorgungssystems im öffentlichen Interesse und müssen Anforderungen privater und

unternehmerischer Erzeuger und Verbraucher erfüllen. Sie sind Teil eines Marktes und zudem kritische Infrastruktur, deren Ausgestaltung und Finanzierung durch **rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen** bestimmt werden. Zugleich sind sie als nahezu allgegenwärtiger wahrnehmbarer Teil des Energieversorgungssystems auch eine **gesellschaftliche Infrastruktur**. Die Zusammensetzung des ENSURE-Konsortiums aus Betreibern von Übertragungs- und Verteilungsnetzen, Herstellern, Forschungsinstituten mit energietechnischem, energiewirtschaftlichem, regulatorischem und gesellschaftswissenschaftlichem Hintergrund sowie Nicht-Regierungsorganisationen mit Verankerung in der Zivilgesellschaft spiegelt die Bandbreite der Energiewende bzw. der elektrischen Netze wider.

## 1.1. Das Stromnetz von morgen gestalten

Die heutigen Stromnetze in Europa sind aus einem **historisch gewachsenen System** zentraler, überwiegend thermischer Stromerzeugung hervorgegangen. Große Kraftwerke speisen in höhere Spannungsebenen ein; die Standorte dieser Kraftwerke wurden nicht nach systemischen Kriterien ausgewählt, sondern u.a. nah an die jeweils benötigten Rohstoffvorkommen bzw. an Transportwege gesetzt. In diesem System bestand die Hauptaufgabe des Verteilnetzbetriebs darin, den **Strom von überlagerten Netzebenen zu den Verbrauchern in unteren Spannungsebenen weiterzuleiten**. Die Netzinfrastuktur war entsprechend auf eine **lineare Versorgungslogik** ausgelegt und entwickelte sich im Kern bis in die 1980er Jahre. In den Jahrzehnten danach, insbesondere seit der Liberalisierung des Strommarkts ab 1996, konnte das Stromnetz durch geringere Investitionen sowie niedrige Netznutzungsentgelte nur unzureichend mit den Entwicklungen der Erzeugungsstruktur infolge der Einbindung Erneuerbarer Energien Schritt halten.

Das heutige Stromnetz muss unter **grundlegend veränderten Rahmenbedingungen** bestehen: mit dem Ausbau von Wind- und Solarenergie verlagert sich die Stromerzeugung von wenigen großen hin zu vielen verteilten Anlagen. Aufgrund begrenzter Leistungsdichten (geringe Energieerträge pro Fläche im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken) und standortabhängiger Verfügbarkeiten wird Wind- und Solarenergie überwiegend in die Verteilnetze eingespeist, häufig auch in die Niederspannungsebene. Dadurch entwickeln sich Verteilnetze zu **bidirektionalen Systemen**. Zugleich verändert sich die räumliche Struktur der Stromerzeugung. Insbesondere Windenergie ist stark standortabhängig, sodass das Prinzip verbrauchsnahe Erzeugung nur noch eingeschränkt gilt. Das Übertragungsnetz (für den überregionalen Transport großer Strommengen) muss nun größere Distanzen überbrücken und zusätzliche Aufgaben übernehmen. Die **dargebotsabhängige Einspeisung aus Wind- und Solarenergie** verändert die Anforderungen an die Systemführung (Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch) und den Netzbetrieb grundlegend.

Aus diesen Entwicklungen ergibt sich ein **umfassender Anpassungsbedarf des Stromnetzes**. Dies betrifft sowohl die physische Infrastruktur (z.B. Leitungen, Transformatoren, leistungselektronische Betriebsmittel) als auch die Betriebsführung. Der Einsatz neuer Technologien sowie eine engere Abstimmung mit der Erzeugungs- und Nachfrageseite sind erforderlich. Gleichzeitig wächst der Zubau erneuerbarer Energien derzeit schneller als Netzausbaumaßnahmen umgesetzt werden können, was den Aufwand zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs erhöht. Ohne eine beschleunigte Weiterentwicklung der Netzinfrastuktur sind perspektivisch steigende Kosten, Engpässe beim Netzanschluss sowie Einschränkungen bei der Integration erneuerbarer Energien zu erwarten. Abbildung 1 zeigt als vereinfachte Übersicht die Entwicklung des Stromsystems in den letzten Jahrzehnten inkl. der einiger maßgeblicher Meilensteine.

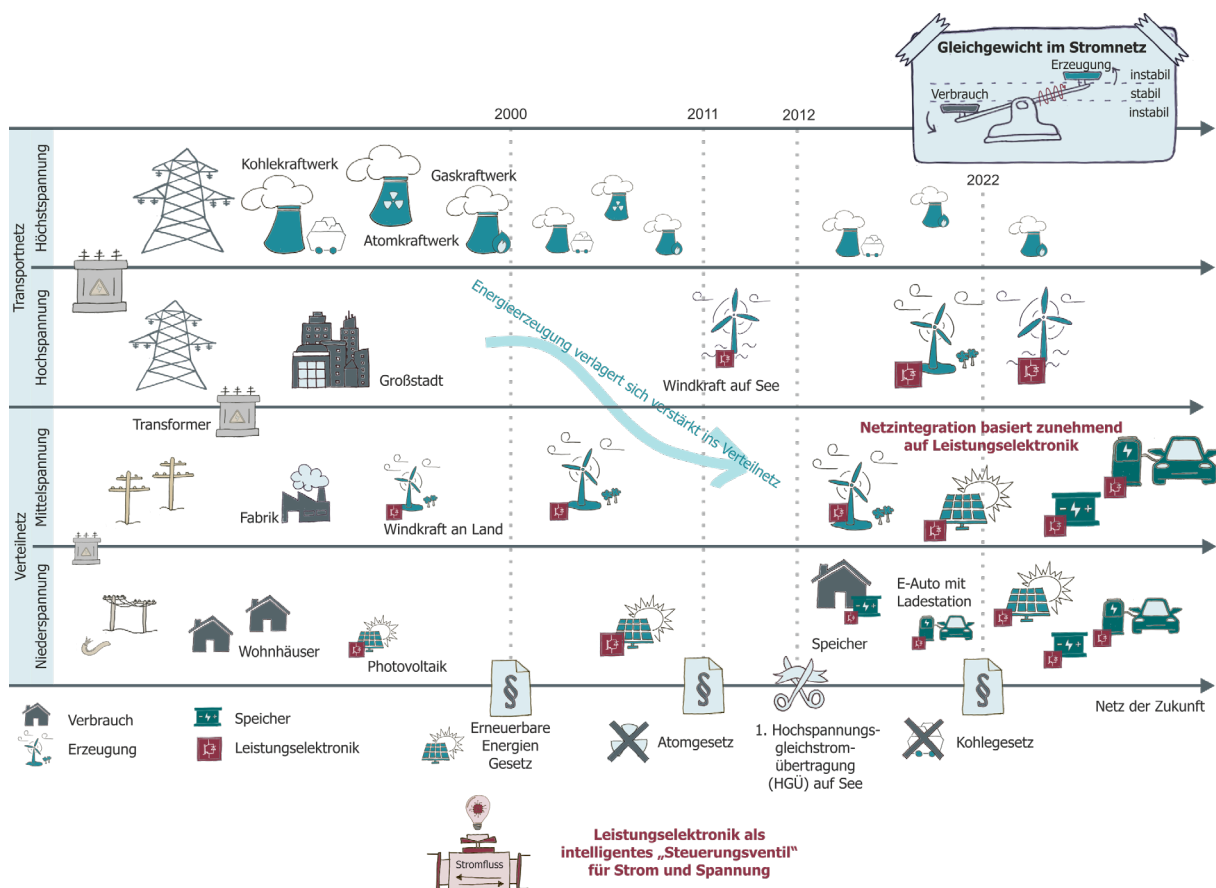


Abb.1: Systemische Veränderungen im Stromsystem infolge der Klimaziele 2045 mit regulatorischen Meilensteinen über Zeit (Laura Bayerdörffer, 2026. CC BY 4.0)

**Das Stromnetz von morgen wird als flexibles und klimaneutral betriebenes System konzipiert, das erneuerbare Energien zuverlässig integriert.** Seine Umsetzung hängt jedoch nicht allein von technischen Lösungen ab, sondern auch von rechtlichen, regulatorischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, die den Einsatz technischer Lösungen ermöglichen und fördern müssen. In ENSURE wurden eine Vielzahl von Lösungen erforscht, die nun in die Praxis gebracht werden müssen.

Nicht alle der im Folgenden vorgestellten ENSURE-Handlungsempfehlungen zum Netz der Zukunft sind grundlegend neu; ein Großteil der vorgeschlagenen Maßnahmen ist bereits aus Forschung, Praxis und energiepolitischen Diskursen bekannt. Der Mehrwert von ENSURE liegt vielmehr darin, diese Ansätze auf Basis umfangreicher Untersuchungen systematisch einzuordnen und zu bewerten. Dabei wurden insbesondere systemische, sektorübergreifende sowie gesellschaftliche Aspekte stärker berücksichtigt, um die Wirksamkeit, Robustheit und Akzeptanz unterschiedlicher Lösungsoptionen umfassend zu analysieren.

## 1.2. Herausforderungen und Zielkonflikte

Die Transformation der elektrischen Energieversorgung ist mit vielfältigen und teils gegenläufigen Anforderungen verbunden. Daraus ergeben sich zentrale Zielkonflikte für die Ausgestaltung des Stromnetzes von morgen. Die folgenden Punkte skizzieren die wesentlichen Herausforderungen:

- **Netzausbau und gesellschaftliche Akzeptanz:** Die Notwendigkeit eines umfassenden Netzausbaus im Zuge der Energiewende wurde vielfach unterschätzt oder in Frage gestellt. Gleichzeitig

- prägen Vorstellungen einer dezentralen, lokal autarken Energieversorgung bis heute Teile der öffentlichen Debatte und erschweren die Akzeptanz neuer Netzinfrastrukturmaßnahmen.
- **Zentralität versus Dezentralität:** Eng damit verbunden ist die Frage, in welchem Umfang das zukünftige Energieversorgungssystem auf überregionale und transnationale Arbeitsteilung angewiesen ist und welche Rolle lokale Wertschöpfung dabei einnehmen soll.
  - **Landschaftsbild und Flächennutzung:** Der Ausbau erneuerbarer Energien und Netzinfrastrukturen geht mit einer sichtbaren Inanspruchnahme von Raum einher. Damit verändert er das tägliche Leben von Menschen und kann ein Spannungsfeld erzeugen zwischen Notwendigkeiten, die sich aus Systemzusammenhängen ergeben, sowie lokalen Wünschen und Bedarfen.
  - **Netzbetrieb versus Systementwicklung:** Die erforderliche Weiterentwicklung der technischen Ausstattung und Betriebsführung der Netze erfuhr lange zu wenig Beachtung. Dies spiegelt sich unter anderem in verzögerten Diskussionen über Digitalisierung und Messinfrastruktur sowie in regulatorischen Rahmenbedingungen wider, die primär auf Kosteneffizienz im bestehenden System ausgerichtet sind.
  - **Inkrementelle Anpassung versus Systemwechsel:** In Teilen der Fachwelt besteht weiterhin die Tendenz, neue Elemente schrittweise in bestehende Systemlogiken zu integrieren. Demgegenüber steht die Frage, ob die zukünftige Betriebsführung grundlegend neu gedacht werden muss und welche Voraussetzungen dafür geschaffen werden sollten.
  - **Marktdesign im Wandel:** In einem von dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien geprägten System verändern sich die Anforderungen: Neben Effizienzgewinnen rücken Investitionsanreize, Versorgungssicherheit, Vermarktung von Flexibilität und die effiziente Nutzung von Netzkapazitäten stärker in den Fokus.
  - **Systemstabilität:** Mit dem Rückgang konventioneller, synchroner Erzeugungseinheiten verändern sich die physikalischen Eigenschaften des Stromsystems. Die Bereitstellung von Systemdienstleistungen für den Netzbetrieb (Schwarzstartfähigkeit, Momentanreserve sowie von Frequenz- und Spannungshaltung) muss zunehmend durch neue Technologien und Anlagenkonzepte gewährleistet werden, deren Integration noch nicht vollständig etabliert ist.
  - **Flexibilität und Systemintegration:** Der steigende Anteil dargebotsabhängiger Einspeisung erhöht den Bedarf an Flexibilität und Steuerbarkeit im System. Neben kurzfristigen Ausgleichsmechanismen gewinnen Speicherlösungen, sektorübergreifende Anwendungen sowie die Aktivierung von Nachfrageflexibilität an Bedeutung. Die technische, infrastrukturelle und marktliche Integration dieser Optionen ist jedoch bislang nicht vollständig gelöst.
  - **Unsicherheit und geopolitische Entwicklungen:** Die Transformation findet in einem dynamischen politischen und wirtschaftlichen Umfeld statt. Zunehmende Unsicherheiten in internationalen Beziehungen, wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und nationalen energiepolitischen Diskursen erschweren langfristige Investitions- und Infrastrukturentscheidungen.
  - **Resilienz und Klimarisiken:** Sowohl eine steigende Bedrohung durch Cyberangriffe als auch die zunehmende Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen erhöhen die Anforderungen an die Robustheit und Resilienz der Energieinfrastruktur.

Die Kopernikus-Projekte waren über einen Zeitraum von zehn Jahren in weitgehend stabilen Partnernetzwerken aktiv. Eine interessante Fragestellung ist daher, wie sich die Sicht der Teilnehmenden auf die bevorstehenden Herausforderungen im Laufe dieser Zeit verändert hat und welche Veränderungen im Umfeld sie dabei wahrnehmen. Ein Beispiel für einen solchen Wandel ist die bereits angesprochene Erkenntnis, dass die technische Systemtransformation durch Rechtsrahmen und Regulierung orchestriert werden muss. Zu Beginn des Kopernikus-Programms, auch in ENSURE, dominierte die Ansicht, dass Regulierung keine technischen Aspekte berücksichtigen sollte – sie solle sogar ganz darauf verzichten. Zudem wurde die Regulierung als ein eher statischer Rahmen betrachtet. Im Verlauf des Projekts hat sich diese Sicht grundlegend gewandelt. Die Frage, wie ein sich im Laufe des Prozesses selbst weiterentwickelnder

Regulierungsrahmen die Transformation steuern und führen kann, ist damit zu einem zentralen interdisziplinären Thema innerhalb von ENSURE geworden.

Ein weiteres Beispiel betrifft die Wahrnehmung der Bedeutung der Netze für die Energiewende. Seit dem Jahr 2009, mit dem dritten Energiepaket der Europäischen Kommission, steht die Weiterentwicklung der elektrischen Netze im energiepolitischen Alltag im Fokus – bis 2017, mit dem Clean-Energy-Package, lag der Schwerpunkt jedoch hauptsächlich auf den Übertragungsnetzen. Außerhalb der engeren Netz-Community war das Thema im Jahr 2016, zu Beginn der Kopernikus-Projekte, als kritisches Element der Energiewende praktisch unbekannt, selbst bei den ENSURE-Partnern, die nicht direkt aus der Netz-Welt stammten. Im Verlauf der zehn Jahre ENSURE hat sich das grundlegend gewandelt: Heute wird das Netz in breiten Teilen der Gesellschaft als der kritische Pfad der Energiewende wahrgenommen – nicht nur im Hinblick auf die rechtzeitige Bereitstellung, sondern auch hinsichtlich der damit verbundenen Kosten. Nach langer Phase der Nicht-Wahrnehmung hat sich nun möglicherweise ein gewisses Überspringen und eine Dramatisierung vollzogen. Die Ergebnisse von ENSURE tragen hier zur sachlichen Einordnung bei.

### **1.3. Den Übertrag in die Praxis ermöglichen**

Die Transformation des Stromnetzes muss den schnell voranschreitenden Ausbau erneuerbarer Energien begleiten und ermöglichen. Die Veränderungen erfolgen im laufenden Betrieb und unter unterschiedlichen lokalen Bedingungen, sodass sich Anforderungen, Auswirkungen und Lösungen regional unterschiedlich ausprägen können. Es sind klare, evidenzbasierte Handlungsoptionen erforderlich, die technische, regulatorische und gesellschaftliche Anforderungen miteinander verbinden und antizipieren, was unter realen Bedingungen umsetzbar sein kann. Zum Abschluss des Kopernikus-Projektes ENSURE sind diese Handlungsempfehlungen und -optionen in einem mehrstufigen, interdisziplinären Prozess zusammengetragen und aufbereitet worden.

Auf folgende Weise wurde sichergestellt, dass die Forschungsergebnisse so dargestellt werden, dass sie in der Praxis handlungsleitend werden können: Zunächst wurden zentrale Inhalte aus den Einzelarbeiten mithilfe eines gemeinsamen Einordnungssystems strukturiert erfasst und zusammengeführt. Interviews und eine linguistische Analyse dienten dazu, Argumentationsmuster und implizite Annahmen zu klären. Ein Abgleich mit fachlichen und öffentlichen Debatten ordnete die Ergebnisse in einen breiteren Kontext ein. Ergänzend wurden fachliche Einschätzungen aus dem Konsortium erhoben und Fachreviews eingeholt. Ein zentraler Schritt zur Praxisorientierung war ein Stakeholder-Workshop, in dem Bedarfe relevanter Akteursgruppen erhoben und erste Entwürfe diskutiert wurden. So konnten die entwickelten Ansätze frühzeitig an praktischen Anforderungen gespiegelt werden.

Die daraus abgeleiteten zehn ENSURE-Handlungsempfehlungen sind thematisch übergreifend angelegt und auf praktische Umsetzbarkeit ausgerichtet.

## 2. Die ENSURE-Handlungsempfehlungen

Die Transformation des Stromnetzes erfordert Lösungen, die vor allem technische, regulatorische und betriebliche Anforderungen miteinander verbinden, und die unterschiedlichen Akteure strukturiert einbinden. Die folgenden übergeordneten ENSURE-Handlungsempfehlungen bündeln zentrale Erkenntnisse aus dem Projekt. Sie sind in zehn Themenbereiche geordnet und folgen einem einheitlichen Aufbau: Zunächst werden Kontext und Problemstellungen erläutert. Für konkrete Zielgruppen werden dann einzelne Empfehlungen zu dem Themenbereich aufgelistet. Abschließend wird zusammengefasst, welche Verbesserungen dadurch möglich werden.

Hinweis: Die ENSURE-Handlungsempfehlungen sind so zusammengestellt, dass sie jeweils einen Themenbereich für die Gestaltung der Stromnetze der Zukunft herausstellen. Sie ergänzen sich inhaltlich, wodurch sich Überschneidungen über die verschiedenen Handlungsempfehlungen hinweg ergeben. Die Überschriften sind ein Call-to-Action, die entsprechenden Akteure werden in den jeweiligen Handlungsempfehlungen benannt. Bei einigen der Handlungsempfehlungen sind Fußnoten zu Themen eingefügt, die kurz vor Ende des ENSURE-Projekts aufgekommen sind und nicht mehr umfangreich untersucht werden konnten.

**Kern-Takeaways aus ENSURE:** Die Energiewende gelingt nicht allein durch mehr Infrastruktur, sondern durch die **intelligente Kombination** von **Ausbau, Digitalisierung, Flexibilisierung, Standardisierung, sicherer Betriebsführung, integrierter Planung und Rechtsrahmung sowie einer strukturierten formellen und informellen Einbindung aller Akteure.**

Die zentrale Erkenntnis: **Nicht wenige umfangreiche Maßnahmen, sondern die Kombination vieler einzelner innovativer technischer Lösungen sowie konsistenter Regulierungen unter Einbindung aller Akteure im gesamten System erzeugt die notwendige Wirkung.**

### ➤ **ENSURE empfiehlt: Effizienz im Energiesystem durch einen konsistenten Ordnungs- und Planungsrahmen steigern (Handlungsempfehlung Rechtsrahmen).**

Das Energiesystem wird maßgeblich durch einen Planungs- sowie einen Ordnungsrahmen geprägt. Der *Planungsrahmen* legt fest, welche Infrastrukturen wann und wo entwickelt werden. Die Planung selbst verteilt sich auf viele Akteure wie Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber, Erzeuger, Speicherbetreiber, Industrie und Kommunen. Mit der Energiewende nehmen Koordinationsbedarf sowie die Systemkomplexität spürbar zu. Strom-, Gas-, Wasserstoff-, Wärme-, Speicher- und Ladeinfrastruktur werden parallel geplant, aus-, um- oder zurückgebaut, sind aber über die Sektorenkopplung zunehmend miteinander verbunden. Investitionsentscheidungen in einem Sektor können starke Wechselwirkungen auf andere Sektoren haben. Die Systementwicklungsstrategie hat bereits erste Impulse gesetzt, den Planungsrahmen für Infrastrukturen zu konsolidieren. Infolgedessen wurden Schritte unternommen, gemeinsame Szenariorahmen für die sektoralen Netzentwicklungspläne zu nutzen.

Der *Ordnungsrahmen* hingegen ergibt sich als Gesamtheit aus Gesetzen, Regulierungen und Marktdesigns und determiniert Zubau und Betrieb von Erzeugung, Speichern sowie die Standortwahl und das Verhalten der Verbraucher. Der Ordnungsrahmen ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt in sich nicht konsistent. Seine Einzelinstrumente (beispielsweise Förderregime, Kapazitätssteuerung, Marktdesign, Netzentgelte, Baukostenzuschüsse, Anreizregulierung sowie sektorspezifische Vorgaben) werden bei unterschiedlichen Akteuren in getrennten Prozessen und Zeitschienen gesetzt und erzeugen in Summe Anreize, die teilweise gegeneinander wirken. Hinzu kommt, dass *Planungs-* und *Ordnungsrahmen* bislang nicht

systematisch miteinander verzahnt sind. Investitionsentscheidungen einzelner Akteure folgen damit Signalen, die aus Systemsicht widersprüchlich sein können.

Die Forschungsergebnisse aus ENSURE zeigen über mehrere Themenfelder hinweg ein eindeutiges Bild: Die Koordinationslücken zwischen Sektoren sowie die mangelnde Konsistenz zwischen Planungs- und Ordnungsrahmen werden zu einem entscheidenden Effizienzproblem. Vier Erkenntnisse illustrieren die identifizierten Schwachstellen:

1. **Versorgungssicherheit und steuerbare Leistung.** Zur effizienten Gewährleistung von Versorgungssicherheit sollten Erzeugung, Netze, Speicher und Nachfrageflexibilität systemisch betrachtet werden<sup>1</sup>. Werden diese Elemente des Energiesystems einzeln optimiert, drohen aus der Systemsicht Fehlanreize und Ineffizienzen hinsichtlich der Allokation.
2. **Kommunale Ebene.** Auf kommunaler Ebene versucht man mit der kommunalen Wärmeplanung einen Beitrag zur Koordinierung der Wärmeversorgungs-Infrastruktur zu leisten. Es drohen jedoch weiterhin „Stranded Assets“, z.B. wenn kommunale Wärmepläne den Gasausstieg vorbereiten, während Gasnetzbetreiber unter den geltenden Erlösobergrenzen weiter investieren. Erschwerend kommt der nicht-bindende Charakter der kommunalen Wärmeplanung hinzu.
3. **Power-to-Gas (PtG).** Die Standortwahl von PtG-Anlagen, insbesondere von Elektrolyseuren verändert Strom- und Gastransportbedarfe gegenläufig: Eine Anlage nahe erneuerbarer Erzeugung entlastet das Stromnetz, belastet aber zumeist das Gasnetz bzw. das geplante Wasserstoffnetz mit dem Transport zum Gasverbraucher – und umgekehrt. Zudem müssen Wasserstoffspeicher zur Nutzung als saisonale Speicher in den Planungs- und Ordnungsrahmen mit aufgenommen werden und netzdienlich betrieben werden können. Eine kostenminimale Allokation der Anlagen lässt sich nur netzübergreifend treffen. Getrennte Netzentwicklungspläne einerseits und fehlende Berücksichtigung des übergreifenden Regulierungsrahmens andererseits führen hier strukturell zu Fehlinvestitionen.
4. **Großskalige Batteriespeicher.** Großskalige Speicher entfalten ihren systemischen Nutzen erst, wenn ein übergeordneter Rahmen sie als Flexibilitätsoption integriert. Werden sie rein marktgetrieben und ohne übergeordnete Koordination errichtet und betrieben, können zusätzliche Netzkapazitäten für den Batteriespeicher erforderlich werden. Auch ist dabei weder gewährleistet, dass sie die langfristige Versorgungssicherheit eines weitgehend dekarbonisierten Stromsystems fördern, noch dass sie netz- oder systemdienlich eingesetzt werden.

Über Forschungsfelder hinweg zeigt sich ein ähnliches Muster: Einzelne Akteure handeln rational nach ihren wirtschaftlichen Anreizen, die Summe der Einzelentscheidungen erreicht das Systemoptimum jedoch nicht. Reine Bottom-up-Planung kann sektor- und ebenenübergreifende Wechselwirkungen nicht internalisieren, weil keinem einzelnen Akteur die Gesamtkostenwirkung seiner Entscheidung zugewiesen ist. Mit fortschreitender Sektorenkopplung verstärkt sich dieser Effekt. **Die Zahl der Schnittstellen wächst schneller als die Mechanismen, sie zu koordinieren.**

---

<sup>1</sup> Im Juli 2026 wurde durch Bundestag und Bundesrat das Strom-Versorgungssicherheits-und-Kapazitätengesetz (StromVKG) beschlossen, welches den gesetzlichen Rahmen für zusätzliche steuerbare Kapazitäten, eine regionale Steuerung ihres Zubaus und die Fähigkeit zur Bereitstellung von Momentanreserve bildet.

Die Forschungsergebnisse weisen auf erhöhten Koordinationsbedarf hin: **dezentrale Systementscheidungen sollten in eine neutrale, integrierte Koordinationsebene eingebettet werden.** Diese Ebene ersetzt die Marktentscheidung nicht, sondern setzt einen Rahmen, in dem dezentrale Entscheidungen systemisch konsistent werden. Im Anschluss an ENSURE-Arbeiten wird den **Regulierungsbehörden und politischen Entscheidungsträgern empfohlen, systematisch den Planungsrahmen mit dem Ordnungsrahmen zu konsolidieren.** Erste konkrete Schritte können wie folgt aussehen:

- **Kontroll- und Steuerungsinstanz etablieren, die Fehlanreize und Widersprüche der aktuell vielseitigen Rahmensetzungen identifiziert und abbaut.** Ein unabhängiges, wissenschaftlich begleitetes Gremium prüft Planungsentwürfe und Regularien auf Konsistenz mit dem Systemoptimum, macht die Annahmen transparent und zeigt Koordinationsbedarf auf.
- **Koordination kommunal stärken.** Auf kommunaler Ebene ist die Wärmeplanung an die Strom-, Gas- und Wärmenetzplanung zu koppeln. Insbesondere muss die Gasnetztransformation planerisch mit den Wärmeplänen der Kommunen synchronisiert werden, um „Stranded Assets“ zu vermeiden. Darüber hinaus bedarf es einer interkommunalen Koordination, damit die Infrastrukturplanung der Kommunen regional abgestimmt erfolgt.
- **Kommunen und regionale Planungsakteure sollen ihre Energie-, Wärme-, Mobilitäts- und Infrastrukturplanung enger mit den Netzbetreibern abstimmen.** Dadurch können künftige Entwicklungen bei Ladeinfrastruktur, industriellen Lasten und sonstigen Vorhaben früher berücksichtigt und Netzausbau, Flexibilitätsnutzung und Standortentscheidungen besser koordiniert werden. Im Rahmen von ENSURE wurden Lösungen entwickelt, die eine sektorenübergreifende Planung unterstützen können.

Die Wechselwirkungen zwischen den Infrastrukturen sind real und groß. Die ENSURE Arbeiten zu PtG-Standorten, Wasserstoffnetz, Wasserstoff- und Batteriespeichern, Systemdienstleistungen und Wärme zeigen durchgehend, dass isolierte Regeln für den Bau, Betrieb und die Nutzung der relevanten Anlagen das Systemoptimum nicht erreichen. **Systematische Fehlanreize in der Summe der Rahmenbedingungen** der einzelnen Infrastrukturen und Marktsegmente ziehen das System vom Optimum weg. Das ist das erwartbare Ergebnis dezentraler Optimierung ohne gesamtsystemausgleichende Instanzen. Mit fortschreitender Sektorenkopplung verstärken sich diese Effekte und die langen Lebensdauern der Anlagen erhöhen das Risiko von Fehlinvestitionen und „Stranded Assets“ über Jahrzehnte.

➤ **ENSURE empfiehlt: Die Digitalisierung der Netze und die systematische Erfassung des Netzzustands zügig vorantreiben, um die Effizienz und die Sicherheit des Netzbetriebs zu steigern (Handlungsempfehlung Zustandserfassung)**

Für die Netzführung ist eine Echtzeiterfassung von Größen wie Spannung, Stromfluss, Betriebsmitteltemperaturen an einer ausreichenden Anzahl von Messstellen von zentraler Bedeutung. Durch den Einbau von **Sensoren**, Kommunikations- und Datensystemen werden unterschiedliche Messgrößen erfasst, überwacht und gesammelt. Die Daten bilden die Grundlage für **flexiblere Lastverteilung, zeitnahe Störungserkennung** und **automatisierte Schalt- bzw. Schutzmaßnahmen** sowie der **Stabilitätsbewertung**. Weitere Messwerte wie Füllstände oder mechanische Schwingungen helfen, den Zustand der Betriebsmittel besser zu erfassen und somit die Instandhaltung zu optimieren.

Teilweise sind noch analoge Messgeräte im Einsatz und IT-Systeme schlecht verknüpft, sodass Echtzeitinformationen für den Netzbetrieb fehlen und Störungsreaktionen verzögert werden. Unterschiedliche Datenformate und proprietäre Plattformen erzeugen **Datensilos**, die einen einheitlichen Zugriff beim

Netzbetreiber – z.B. für die Instandhaltung – erschweren und den effizienten Austausch mit Planern und Marktteilnehmern verhindern.

Digitale Tools leisten bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum stabilen Netzbetrieb. Künftig kann die **weitergehende Digitalisierung** die Effizienz weiter erhöhen; die Digitalisierung benötigt die relevanten Informationen in der erforderlichen Qualität.

- **Netzbetreiber** sollen die Digitalisierung ihrer Netze konsequent und zielgerichtet vorantreiben. **Nicht alle** Netzknoten und Leitungen benötigen eine vollständige Zustandserfassung; vielmehr sollten durch die Netzbetreiber für sie **relevante Informationen**<sup>2</sup> identifiziert und dafür kosten- sowie betriebseffizient Mess- und Kommunikationstechnik eingesetzt werden. Die in ENSURE entwickelten Technologien können einen Beitrag zu dieser Aufgabe leisten.
  - o Der digitale Datenaustausch mit Anlagen anderer Betreiber (Erzeugungsanlagen ebenso wie Verbraucher und Anlagen für Flexibilität) im Netzgebiet ist ebenfalls notwendig, so dass diese digital eingebunden werden können.
- Netz- und sonstige Anlagenbetreiber müssen gemeinsam **(cyber-)sichere Kommunikationsinfrastrukturen** und interoperable, zukunftsfähige Standards für Protokolle und Architekturen entwickeln und implementieren. Herstellerübergreifende Systeme für **Asset-, Patch- und Konfigurationsmanagement** sollten entwickelt und ausgebaut werden.
- **Regulierungsbehörden** müssen Rahmenbedingungen für Interoperabilität schaffen: verbindliche Regelungen für **offene Datenstandards** und **Cybersecurity-Anforderungen**, die den Austausch zwischen Netzbetreibern, Industrie und Endverbrauchern erleichtern und gleichzeitig den sicheren Betrieb gewährleisten.

Der flächendeckende Einsatz digitaler Mess- und Kommunikationssysteme schafft eine einheitliche Datenbasis, die qualitätsgesichert und im Kontext plausibilisiert werden muss. Sie ermöglicht **bessere Zustandsbewertung, flexiblere Laststeuerung, frühere Störungserkennung** und **automatisierte Schutzmaßnahmen**. Gleichzeitig erhöht die transparente Datenlage in Kombination mit automatisierten Steuerungs- und Schutzfunktionen die **Effizienz** und **Versorgungssicherheit** des Netzes.

### ➤ **ENSURE empfiehlt: Die Stromnetze zügig zu aktiven, anpassungsfähigen Systemen weiterentwickeln (Handlungsempfehlung adaptives Netz)**

Die Energiewende führt zu einem tiefgreifenden Umbau der Stromnetze hin zu einem zunehmend dezentralen und dynamischen System, das durch erneuerbare Energien, neue Verbraucher - wie Elektromobilität, Wärmepumpen, Rechenzentren und elektrifizierte industrielle Prozess - und leistungselektronische Komponenten geprägt ist. Dadurch steigen die Anforderungen an **Flexibilität, Stabilität, Transparenz** und **Effizienz** im Netzbetrieb erheblich.

Die bestehenden Netzinfrastrukturen sind **für diese steigende Dynamik nicht ausgelegt**. In den Verteilnetzen fehlen oft **digitale Zustandsinformationen, Automatisierung** sowie die **systematische Nutzung**

---

<sup>2</sup> Bei der Zusammenstellung der „relevanten Informationen“ aus dem Netz müssen auch die Anforderungen der im Juni 2026 erschienenen „Strategic Roadmap for Digitalisation and AI in the Energy Sector“ der Europäischen Union beachtet werden – mit „Flagship action 5“ sollen Netzdaten für das Training von KI-Modellen bereitgestellt werden.

**vorhandener Flexibilitäten.** Der klassische Netzausbau ist häufig zu langsam, oder er ist zumindest kurz- und mittelfristig nicht die wirtschaftlich optimale Lösung, um zeitnah auf steigende Anforderungen zu reagieren. Ohne integrierte digitale Regel- und Schutzfunktionen können Lasten kaum dynamisch umverteilt und Fehlfunktionen nicht proaktiv adressiert werden – die angestrebte Steigerung von **Betriebseffizienz** und **Sicherheit** ist damit begrenzt. Automatisierte Steuerungs- und Assistenzsysteme können das Netz zu einem **aktiven, adaptiven System** entwickeln.

ENSURE-Ergebnisse belegen, dass innovative Technologien bereits heute einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung und Effizienzsteigerung des Netzbetriebs leisten und künftig noch stärker an Bedeutung gewinnen. Automatisierte Energiemanagementsysteme und die **Bündelung dezentraler Anlagen zu Flexibilitätsclustern** ermöglichen gezielte Steuerung von Lasten und Einspeisungen und entlasten das Netz.

- **Netzbetreiber** sollten innovative Technologien und Betriebskonzepte zur höheren Auslastung von Betriebsmitteln und zur Nutzung von Flexibilitäten konsequent prüfen und, wenn vorteilhaft, **schrittweise integrieren** (z. B. automatisierte Energiemanagementsysteme, Flexibilitätscluster, aktive Verteilnetze, virtuelle Kraftwerke).
  - o **Neue Konzepte** (Energy Hubs, DC-Netze, intelligente Sensorik, innovative Speicherlösungen) sollten in engpasskritischen Bereichen pilotiert und bei Eignung skaliert werden.
- Der **Automatisierungsgrad** im Netzbetrieb sollte erhöht werden, etwa durch den Einsatz von **Assistenzsystemen**, automatisierten Steuerungslogiken sowie adaptiven Netzkonfigurationen, um schneller und effizienter auf sich verändernde Netzsituationen reagieren zu können.
  - o Der Datenaustausch zwischen Netzbetreibern, insbesondere zwischen den Leitsystemen, sollte weiter standardisiert und heutige technische Kommunikationssysteme entsprechend weiterentwickelt und eingeführt werden.
  - o Der Nutzen von Assistenzsystemen sollte anhand validierter Methoden bewertet werden, bevor neue Assistenzsysteme in die Umsetzung gebracht werden.
- Topologieänderungen wie beispielsweise dynamische Vermaschung in Verteilnetzen können vorhandene Netzkapazitäten besser nutzen und damit den Ausbaubedarf reduzieren. Adaptive Schutzsysteme sind notwendig, um solche dynamischen Änderungen im Betrieb sicher umsetzen zu können. Automatisierte Tools müssen die Koordination von Schutzsystemen und Einstellparameter untersuchen können, um im Vorhinein sichere Betriebszustände zu gewährleisten.
- Um bei weiter steigendem Anteil leistungselektronischer Betriebsmittel im elektrischen Netz auch in Zukunft stabilen Netzbetrieb zu ermöglichen, sollen leistungselektronik-dominierte Netze weiter erforscht und die Erkenntnisse für alle Netzbetreiber aufbereitet und verbreitet werden, z.B. über Verbände.

Durch den gezielten Einsatz **umfassenderer Zustandserfassung und Automatisierung** kann die bestehende Netzinfrastruktur adaptiver und damit **effizienter genutzt** und ihre Leistungsfähigkeit **ohne unmittelbaren Ausbau** erhöht werden. Dezentrale Flexibilitäten und topologische Maßnahmen im Netz reduzieren Netzengpässe und verschieben den Netzausbaubedarf. Eine verbesserte Datengrundlage sowie automatisierte Steuerungs- und Entscheidungsprozesse ermöglichen eine **frühzeitige Engpass-Erkennung** und gezielte Bewältigung. Dies senkt die Betriebskosten und verbessert die Integration erneuerbarer Energien. Die Kombination aus **Digitalisierung, Automatisierung und flexiblen Betriebsstrategien** gewährleistet Stabilität und Versorgungssicherheit in einem zunehmend komplexen Energiesystem.

- **ENSURE empfiehlt: Vorhandene Kapazitäten bestehender Anlagen in den Netzen umfangreicher nutzen, die Netze bedarfsgerecht ausbauen und eine vorausschauende Instandhaltung einführen (Handlungsempfehlung Infrastruktur)**

Die Stromnetze stehen unter erheblichem Transformationsdruck - Erneuerbare Energien, Speicher, Wärmepumpen, Elektromobilität, Elektrolyseure und neue industrielle Lasten müssen schneller integriert werden. Die vorhandene elektrische Netzinfrastuktur<sup>3</sup> reicht für diese Aufgaben nicht aus, weshalb die Netzbetreiber entsprechend §11 EnWG das Netz weiter optimieren, verstärken und ausbauen<sup>4</sup>. Ausbau und Verstärkung können reduziert oder sogar in Einzelfällen vermieden werden, wenn die **Infrastruktur bei gleicher Sicherheit stärker ausgelastet** werden kann. Digitalisierung und gezielterer Ressourceneinsatz sind die Basis; sonst drohen eine **konservative Nutzung** vorhandener Kapazitäten und Ausbauplanungen nach **pauschalen Annahmen** – die optimale Nutzung von Ressourcen bleibt aus.

ENSURE zeigt, dass datenbasierte, flexible und adaptive Betriebs- und Planungsansätze eine höhere Netzauslastung ermöglichen, ohne negative Auswirkungen auf den Netzbetrieb. Eine präzise Kenntnis des aktuellen und zukünftigen Netzzustands mithilfe von in ENSURE entwickelten Verfahren ermöglicht die **fundierte Bewertung** von Engpässen, Überlastungen und Unsicherheiten. So können **Netzanschlüsse, Investitionen und Maßnahmen zur Instandhaltung gezielter** geplant werden. Entscheidend ist ein **integrierter Blick** auf Planung, Betrieb und notwendige Daten, der den regulatorischen Rahmen, technische Restriktionen sowie technische Weiterentwicklungen berücksichtigt.

- **Verteilnetzbetreiber** sollten die Weiterentwicklung bestehender Netzstrukturen stärker **datenbasiert** priorisieren. In stark ausgelasteten Bereichen mit hoher Dynamik bei Einspeisung und Verbrauch müssen **Netzzustand, Netzbelastung und Technologieverbreitung systematisch erfasst und bewertet** werden. Daraus ergeben sich Maßnahmen, die Investitionen dorthin zu lenken, wo tatsächliche oder absehbare Engpässe den größten Handlungsbedarf erzeugen.
- **Alle Netzbetreiber** sollten bestehende Anlagen durch **verbesserte Zustandsbewertung, vorausschauende Instandhaltung und angepasste Betriebsstrategien** gezielter nutzen. Wo technische Grenzen sicher überwacht und wirtschaftlich bewertet werden können, kann eine bessere Auslastung bestehender Infrastruktur helfen, Engpässe in der Übergangsphase zu reduzieren und die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen. Ferner kann die Kenntnis des Betriebsmittelzustands zu einer längeren Nutzung alter/abgeschriebener Betriebsmittel führen und somit den Investitionsbedarf verzögern, so dass der Fokus auf den Netzausbau gelegt werden kann.
- **Regulierungsbehörden und politische Entscheidungsträger müssen** Rahmenbedingungen schaffen, die neben klassischem Netzausbau auch die **sichere, daten- und digital-gestützte Nutzung vorhandener Infrastruktur** anreizen. Dazu gehören Anreize für Digitalisierung, Datenqualität, flexible Betriebsführung, vorausschauende Instandhaltung und lebenszyklusorientierte Bewertung von Betriebsmitteln.

<sup>3</sup> Netzinfrastuktur bezieht sich in diesem Kontext auf die Primärtechnik, also vor allem Leitungen, Umspannwerke, Konverteranlagen

<sup>4</sup> Vom FNN wird das NOVA-Konzept zum **NOXVA-Prinzip** (Netz-Optimierung vor *Flexibilität* vor Verstärkung vor Ausbau) erweitert. Hierbei wird das klassische Modell um intelligente, flexible Netzelemente ergänzt, um Engpässe gezielt zu umgehen, bevor bauliche Maßnahmen ergriffen werden.

Durch die koordinierte Nutzung vorhandener Infrastruktur und gezielten Einsatz neuer Technologien entsteht zusätzlicher **Handlungsspielraum**: Elektrische Netze, die keine eigene direkte Speicherkapazität haben, können heutigen und zukünftigen Anforderungen insbesondere an flexible Leistungsaufnahme und -abgabe besser gerecht werden. Gerade in der Übergangsphase bis zum Zielnetzausbau verbindet dies **Versorgungssicherheit** und **Transformationsgeschwindigkeit**.

➤ **ENSURE empfiehlt: Einen „digitalen Zwilling“ des Stromsystems als gemeinsame Entscheidungs-, Prüf- und Lerninfrastruktur institutionalisieren (Handlungsempfehlung Simulationszentrum)**

Der Ausbau leistungselektronikbasierter Anlagen (EE, Batteriespeicher, Rechenzentren ...) und der gleichzeitige Rückbau konventioneller Erzeuger verändern die **Systemdynamik** erheblich. **Digitale Zwillinge** (virtuelle, datenbasierte Abbilder realer Netze, Anlagen und Betriebszustände) ermöglichen das **Vorabtesten** zukünftiger Systemzustände, Netzanschlüsse, Schutzkonzepte und Betriebsstrategien. Ergänzend erlauben **Hardware-in-the-Loop-Tests** (HiL) die Kopplung realer Geräte an digitale Echtzeitsimulationen. Zu diesen Geräten gehören insbesondere Anlagenregelungen (sog. Regelungsreplika), Schutzgeräte oder Assistenzsysteme für die Netzfürhrung. Der Test von Regelungsrepliken realer großtechnischer Anlagen, wie multiterminaler HGÜ-Systeme, beschleunigt dabei die Projektumsetzung und minimiert gleichzeitig technische Risiken.

Aufgrund der Vielzahl neuer Technologien sind für die sichere Integration in das bestehende Netz Tests erforderlich, die über komponentennahe Einzelprüfungen hinausgehen. Entscheidend ist, wie Anlagen, Regelungen, Schutzsysteme und Netzfürhrungsprozesse **im Gesamtsystem zusammenwirken**. Solche Untersuchungen können nicht im realen Netz durchgeführt werden. Bisherige **Echtzeitlabore** an deutschen Universitäten sind projektgebunden und nicht dauerhaft als Testinfrastruktur organisiert; harmonisierte Prüfverfahren und belastbare Entscheidungshilfen fehlen.

Die ENSURE Co-Demonstrationsplattform zeigt, dass **systemische Echtzeitsimulationen** technisch umsetzbar und methodisch belastbar sind. Durch Kombination detaillierter Netzmodelle, gekoppelter Simulationen verschiedener Dynamikbereiche und verteilter Labore lassen sich **Stabilität, Interoperabilität, Schutzkonzepte und Betriebsstrategien** realitätsnah prüfen. Perspektivisch würde jedoch eine dauerhaft finanzierte **Digitaler-Zwilling-Plattform** ineffiziente Mehrfachentwicklungen verhindern und vergleichbare Testergebnisse ermöglichen.

- **Bundesnetzagentur** und **Netzbetreiber** sollen eine dauerhaft finanzierte, nationale Simulations- und Digitaler-Zwilling-Infrastruktur etablieren, die als operative Einheit Netzbetreiber, Industrie, Regulierung, Normung und Forschung vernetzt.
- **Bundesnetzagentur** und **BMWE** sollen zusammen mit Normungs- und Standardisierungsgremien einen **regulatorischen Rahmen** für die Plattform entwickeln (Datenvertraulichkeit, Modellqualität, Prüftiefe, Ergebnisdokumentation, Nutzung in Netzanschluss- und Stabilitätsbewertungen).
- **Übertragungs-** und **Verteilnetzbetreiber** sollen konkrete System- und Fehlerzustände, Schutzkonzepte und Stabilitätsfragen definieren und geschützte Netzmodelle bereitstellen – damit auch kleinere Betreiber und Stadtwerke Zugriff erhalten.
- **Industrie** soll reale Steuergeräte, Prototypen, Anlagenmodelle und Schnittstellen in geschützte Testumgebungen einbringen, um Interoperabilität und Netzverträglichkeit zu prüfen, ohne sensible Daten offenzulegen.

- **Forschungseinrichtungen** sollen ihre Echtzeitlabore, Modellierungs- und Anwendungskompetenzen in eine **verstetigte Struktur** überführen; die Politik sollte hierfür eine Grundfinanzierung schaffen, ergänzt durch nutzungsbezogene Beiträge von Netzbetreibern, Industrie und öffentlichen Programmen.

Digitale Zwillinge und Systemsimulationen, durchgeführt in einem öffentlich nutzbaren nationalen Zentrum, unterstützen Entscheidungen, indem sie Folgen unterschiedlicher Planungs-, Betriebs- und Regulierungsoptionen sichtbar machen. So können kritische Systemzustände vorgedacht, Alternativen verglichen und Entscheidungen auf eine transparente Evidenzbasis gestellt werden. Eine institutionalisierte Digitale-Zwillinge- und Simulationsinfrastruktur ermöglicht es, die Energiewende technisch vorzudenken, statt nur reaktiv zu begleiten. Zukünftige Netzsituationen, neue Technologien und kritische Wechselwirkungen können vor der realen Umsetzung getestet werden. Dadurch werden Risiken früher sichtbar, Fehlentwicklungen vermeidbar und Investitionsentscheidungen belastbarer.

➤ **ENSURE empfiehlt: Den regulatorischen Rahmen schaffen, um den Einsatz von innovativen Lösungen in den Stromnetzen durch die Netzbetreiber zu ermöglichen (Handlungsempfehlung Innovationen)**

Innovative Lösungen im Netz sind ein zentraler Bestandteil der Energiewende. Es ist daher notwendig, dass der regulatorische Rahmen Netzbetreiber befähigt, innovative Lösungsoptionen zu entwickeln und einzusetzen. Der Ausbau der Stromnetze bleibt mittel- und langfristig unerlässlich. Um eine zügige und effiziente Integration neuer Verbraucher und dezentraler Erzeuger zu gewährleisten sind jedoch neben konventionellem Netzausbau oder der Netzerhöhung mit bewährten Mitteln, auch innovative Lösungsoptionen notwendig.

Die in ENSURE erarbeiteten technischen Lösungen, die die Probleme eines sich dynamisch wandelnden Energiesystems adressieren, benötigen einen passenden regulatorischen Rahmen. Dieser soll ermöglichen, dass Innovationen zunächst zur Praxisreife geführt werden und schließlich ein praktischer Einsatz möglich ist. Die notwendigen regulatorischen Anpassungen gliedern sich in zwei Bereiche:

- Der Einsatz innovativer Technologien darf in der Praxis regulatorisch nicht benachteiligt werden, da neue Technologien in der Regel OPEX-lastig sind. Rein regulatorisch werden bisher kapitalintensive Lösungen bevorzugt.
- Netzbetreiber müssen befähigt werden, innovative Lösungen zu entwickeln und in die Praxis zu überführen. Den Netzbetreibern entstehen Kosten für Forschung und Entwicklung (F&E), wohingegen sich etwaige resultierende Einsparungen mit hohem Zeitverzug in den Einnahmen widerspiegeln. Durch die aktuelle Ausgestaltung des regulatorischen Rahmens kann dies zu einer Schmälerung des regulierten Effizienzwerts im Effizienzvergleich führen und damit zu Mindereinnahmen. Diese Tatsache kann bei Netzbetreibern geringere Anreize bewirken, F&E voranzutreiben, selbst wenn finanzielle Mittel dafür bereitstünden. Eine Ausnahme sind Kosten von F&E in staatlich geförderten Projekten, siehe unten.

Die RAMEN-Reform im aktuellen NEST-Prozess der Bundesnetzagentur geht bereits einen Schritt in Richtung eines verstärkten Einsatzes innovativer Lösungsoptionen im Netzbetrieb. Die in den ENSURE-Studien identifizierte Verzerrung zwischen CAPEX- und OPEX-lastigen Lösungen wird damit in Teilen adressiert, womit auch innovative Lösungen im Netzbetrieb stärker angereizt werden. Die Verzerrung hin

zu CAPEX-lastigen Lösungen ist jedoch noch nicht vollständig aufgelöst. So wird beispielsweise die Dauer der Regulierungsperiode ab der sechsten Regulierungsperiode (ab 2034) von fünf auf drei Jahre verkürzt. Dies ermöglicht es Netzbetreibern, alle drei Jahre ihre Betriebskosten in der Erlösobergrenze nachzuführen. Damit können OPEX früher angerechnet werden. Zugleich verringert eine kürzere Regulierungsperiode aber auch den Zeitraum, in dem ein Innovationsvorsprung genutzt werden kann: Effizienzgewinne aus Innovationen entfalten somit künftig für eine kürzere Zeit Wirkung, was den Innovationsanreiz verringern könnte.

Auch die Zielgröße „Energiewendekompetenz“ wird im Rahmen des Qualitätselements in die Regulierung aufgenommen und soll sich perspektivisch auf die Erlösobergrenze auswirken. Anhand von Kennzahlen soll beurteilt werden, wie vorausschauend Netzbetreiber wirtschaften und wie gut sie in der Lage sind, Anlagen zeitnah an das Netz anzuschließen. Ergänzend soll ein Digitalisierungsindex transparent machen, welchen Digitalisierungsgrad ein Netzbetreiber im Vergleich zum Branchendurchschnitt erreicht hat, ohne direkte finanzielle Auswirkungen zu entfalten. Ein solches „Sunshine-Instrument“ hilft Netzbetreibern mögliche Schwachstellen im Bereich Digitalisierung zu identifizieren.

Bei der Behandlung der F&E-Kosten kommt es hingegen im Rahmen des NEST-Prozesses zu keiner merklichen Änderung. F&E-Kosten werden weiterhin nur insoweit anerkannt, wie sie aus der Teilnahme an staatlich geförderten Projekten resultieren. Anreize für eigene ergebnisoffene F&E bleiben damit weitgehend aus. Es ist daher fraglich, ob Netzbetreiber allein aufgrund der aktuellen Reform des Regulierungsrahmens in größerem Umfang in Forschung und Entwicklung investieren werden.

Der Blick auf andere Länder zeigt, dass Innovationen eine deutlich größere Rolle in der Anreizregulierung spielen können. Erprobte Instrumente sind unter anderem Innovationsbudgets und Innovationsfonds (etwa die britische Network Innovation Allowance oder der Strategic Innovation Fund) sowie Regulatory Sandboxes, die das Erproben innovativer Lösungen in einem begrenzten räumlichen und zeitlichen Rahmen ermöglichen, entweder mit Hilfe von regulatorischen Ausnahmen oder durch das gezielte Testen neuer regulatorischer Optionen (z. B. die italienischen Experimente zur Innovationsförderung der ARERA oder die deutsche SINTEG-Verordnung).

Um Innovationen durch Netzbetreiber zu ermöglichen und gezielt zu fördern, sollten **Regulierungsbehörden und politischen Entscheidungsträgern** den regulatorischen Rahmen entlang der folgenden Ansatzpunkte weiterentwickeln:

- **Datengrundlage schaffen und die Energiewendekompetenz konsequent weiterdenken.** Mit fortschreitender Digitalisierung und besserer Datenverfügbarkeit lassen sich zusätzliche, treffsichere Kennzahlen formulieren. Führt das Instrument nicht dazu, dass innovative Lösungen vermehrt in der Praxis ausgerollt werden, sollte es weiterentwickelt werden.
- **Erprobungsräume (Regulatory Sandboxes) ermöglichen.** Es soll ein Rahmen geschaffen werden, in dem neue technische Lösungen und Regulierungen gemeinsam erprobt werden können, ohne negative Konsequenzen beispielsweise bei der Qualitätsregulierung fürchten zu müssen.
- **Gezieltere Finanzierung von F&E prüfen.** Ein Forschungsbudget, das Aufwendungen für F&E deckt, ohne unmittelbare Effizienzsteigerungen nachweisen zu müssen, könnte Anreize für zusätzliche F&E Investitionen generieren. Dieses Instrument sollte durch die Regulierungsbehörde geprüft werden. Ergänzend kann nach dem britischen Vorbild, ein auf Netzbetreiber zugeschnittenes, durch die Regulierungsbehörde oder ein vom Bundesministerium eng begleitetes Forschungsprogramm aufgestellt werden.
- **Verbreitung der Ergebnisse sicherstellen.** Da F&E-Aktivitäten letztlich über die Netzentgelte von der Allgemeinheit finanziert werden, sollten erarbeitete Lösungen geteilt und über

alle Netzbetreiber hinweg nutzbar gemacht werden. Dies gilt umso mehr, wenn die eingesetzten Finanzmittel aus dem in letzterer Empfehlung erwähnten Forschungsprogramm stammen. Eine Veröffentlichungspflicht und der Austausch über Verbände unterstützen den systemweiten Transfer.

In ENSURE wurden zahlreiche technische Lösungen entwickelt, deren systemweiter Nutzen sich erst entfaltet, wenn der regulatorische Rahmen ihre Erprobung und ihren breiten Einsatz aktiv ermöglicht. Ein innovationsfreundlicher Rahmen ist damit die Voraussetzung dafür, dass die übrigen technischen Empfehlungen dieses Berichts in der Praxis wirksam werden.

➤ **ENSURE empfiehlt: Im Netz verfügbare Flexibilitäten gezielt aktivieren und koordinieren, um den Betrieb des Stromsystems zu unterstützen (Handlungsempfehlung Flexibilitäten)**

Der steigende Anteil erneuerbarer, fluktuierender Stromerzeugung verändert die **Systemlogik: Erzeugung lässt sich nicht mehr exakt nach Nachfrage bereitstellen**. Für stabile Netze sind daher **Flexibilitäten** in der Erzeugung ebenso wie im Verbrauch nötig – zusätzliche kurzfristige und saisonale Speicherlösungen sind notwendig, wenn Flexibilitätspotenziale nicht ausreichen. Während auf der Erzeugungsseite zunehmend entsprechende Optionen entstehen, bleibt auf der Nachfrageseite das Potenzial bislang unzureichend erschlossen.

Erste Anreize zur **verbrauchsseitigen Flexibilisierung** wurden gesetzt, bleiben jedoch **fragmentiert** und entfalten im Gesamtsystem noch keine ausreichende Wirkung. Ohne eine breite, konsistente Integration von Flexibilitätsoptionen in Marktmechanismen, Netzbetrieb und Investitionsentscheidungen werden vorhandene Potenziale nur punktuell genutzt; Schwankungen werden weiterhin überwiegend über Erzeugungs- oder Infrastrukturmaßnahmen ausgeglichen.

ENSURE-Analysen zeigen, dass verbrauchsseitige Flexibilität aus **technischer Perspektive breit verfügbar** sein könnte, ihre **systemische Nutzung** jedoch noch im Aufbau ist. Untersuchungen in der Niederspannung belegen, dass **Lastverschiebungen** und **Speichereinsatz** die Notwendigkeit eines Netzausbaus signifikant reduzieren können – ein direktes Potenzial zur Senkung netzseitiger Investitionen. Erste regulatorische Anreize (z. B. § 14a EnWG für Haushalte) zeigen, dass die Integration bereits aktiv vorangetrieben wird. Ferner adressieren laufende Reformvorhaben (u.a. zur ‘Bandlastregelung’ nach §19 Abs. 2 StromNEV) bestehende Hemmnisse mit dem Ziel, auch industrielle Flexibilität anzureizen.

Jedoch **fehlt bislang die breite Wirksamkeit**. Die bestehenden Ansätze zur Erschließung von Flexibilität im Stromsystem sollten gezielt ergänzt, weiterentwickelt und wo möglich **miteinander verzahnt** werden. Hierfür sind regulatorische Rahmenbedingungen, Marktmechanismen, Netzentgelte und Anforderungen des Netzbetriebs so aufeinander abzustimmen, dass Flexibilitäten auf Erzeugungs- und Nachfrageseite wirtschaftlich nutzbar und technisch integrierbar werden. Auf der Erzeugungsseite sollten **vorhandene Flexibilitätsoptionen konsequent in den Systembetrieb eingebunden** und mit bestehenden sowie zusätzlichen Potenzialen auf der Nachfrageseite verknüpft werden.

- **Regulierungs- und Gesetzgebungsebene** sollten bestehende Instrumente weiterentwickeln und auf eine systemweite Wirksamkeit ausrichten. Insbesondere sollte die Nutzung von Flexibilitäten stärker angereizt werden, sodass diese prioritär entwickelt werden bevor ein Ausbau des Netzes erfolgt.

- **Netzbetreiber** – insbesondere in den Verteilnetzen – sollten Flexibilitätsbedarfe und Netzrestriktionen transparenter machen und geeignete Schnittstellen für deren Nutzung bereitstellen.
- **Marktakteure** und **Aggregatoren** sollten Flexibilität unter Berücksichtigung der Netzrestriktionen bündeln und wirtschaftlich nutzbar machen.
- Auf der **Verbrauchsseite** soll Flexibilität sowohl im industriellen als auch im haushaltsnahen Bereich gezielt erschlossen werden. Dazu gehört insbesondere die **flexible Betriebsweise** geeigneter Anlagen auf Basis **geeigneter Preis- und Steuerungssignale**. Voraussetzung im Haushaltsbereich sind dabei geeignete technische Ausstattungen, standardisierte Schnittstellen sowie einfach nutzbare und transparente Angebote, die eine informierte und aktive Teilhabe ermöglichen. Für die Industrie sollte eine Reform der Stromnetzentgelte bestehende Flexibilitätshemmnisse abbauen und Anreize für netzdienliche Flexibilität setzen. Durch zusätzliche Investitionen in die Elektrifizierung steigen die Potenziale und die Mehrwerte industrieller Flexibilität.
- Speicherlösungen sollten als Flexibilitätsoption gestärkt werden. Dabei sollten regulatorische und marktliche Rahmenbedingungen so ausgestaltet werden, dass Speicher unterschiedlicher sowohl zur Integration erneuerbarer Energien als auch zur netzdienlichen Bereitstellung von Flexibilität beitragen können.

Solange verbrauchsseitige Flexibilität nicht in passendem Maße erschlossen und integriert wird wie auf der Erzeugungsseite, bleibt die systemische Nutzung vorhandener Flexibilitätsoptionen begrenzt. Ohne eine sektorübergreifende koordinierte Nutzung von Flexibilität über Erzeugung, Verbrauch und Netzbetrieb hinweg, werden systemische Anpassungen primär mit Netzausbau oder Eingriffen in die Erzeugung realisiert, die aus systemischer Perspektive notwendig sind, aber höhere Kosten verursachen können.

➤ **ENSURE empfiehlt: Das Wissen aller Akteure über die Energiewende gezielt stärken, damit diese als Teil des Energiesystems nachhaltige Entscheidungen treffen können (Handlungsempfehlung Wissensbasis)**

Privatpersonen treffen zunehmend Entscheidungen, die vom bestehenden Energiesystem beeinflusst werden, aber auch auf dieses zurückwirken. Dazu zählen besonders die **Anschaffung** von Wärmepumpen, PV-Anlagen, Batteriespeichern, Wallboxen oder Elektroautos sowie der Abschluss von dynamischen Stromtarifen. Neben den gewünschten / erhofften privaten finanziellen Vorteilen und der erwarteten Klimaschutzwirkung haben diese **Entscheidungen Auswirkungen auf den Netzbetrieb** und auf andere Akteure im Energiesystem. Um die eigenen Anschaffungen und Verträge **in den Energiesystem-Kontext einzuordnen**, ist ein technisches, naturwissenschaftliches, ökonomische, ökologisches und soziales Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge im Energiesystem nötig (sogenannte **Energy Literacy**). Systemwissen kann Privatpersonen dabei unterstützen, ihre Einzelentscheidungen nicht mehr isoliert, sondern bewusst in einem größeren Zusammenhang zu treffen.

**Finanzielle Entscheidungskompetenz im Energiebereich (Energy-related Financial Literacy, kurz: EFL) ist jedoch stark sozial ungleich verteilt.** Technologie-besitzende Haushalte oder Personen mit höherem Einkommen zeigen typischerweise höhere EFL, während Haushalte mit geringem sozioökonomischem Status, ältere Menschen oder Menschen ohne technischen Hintergrund häufig **große Wissenslücken** aufweisen. Diese Lücken führen dazu, dass **Informationsangebote häufig nicht ausreichend** sind, um fundierte Entscheidungen zu ermöglichen; das erhöht das Risiko von **Fehlentscheidungen** und kann die **Akzeptanz der Energiewende** beeinträchtigen.

ENSURE-Ergebnisse verdeutlichen, dass **nicht nur Information über technische Themen (Handlungs- und Transferwissen)**, sondern deren **Verknüpfung mit finanziellen Aspekten** entscheidend ist. Insbesondere muss das **Zusammenspiel von technischem Systemwissen und finanziellen Rahmenbedingungen** (Anschaffungskosten, laufende Kosten, Förderungen, Amortisationszeiten, Investitionsrisiken) verständlich dargestellt werden.

Die Informations- und Beratungsangebote sollten stärker zielgruppenspezifisch und mit Fokus auf Befähigung gestaltet werden. Dabei sind die technischen, systemischen und finanziellen Aspekte verknüpft und nachvollziehbar darzustellen: relevante Technologien, Systemzusammenhänge, Kosten, Einsparungen, Förderungen und Unsicherheiten.

- **Alle Stakeholder** sollten in der Kommunikation beachten, dass Privatpersonen tendenziell eine niedrige EFL haben, als Akteure, die die Energiewende vorantreiben, und deshalb **mehr Erläuterung, kompakte Beispiele und klare Sprache** benötigen als andere Gesprächspartner.
- **Verbraucherverbände, Sozialverbände, Mieterorganisationen, Umweltverbände und Energieberatungsverbände** sollten sich dafür einsetzen, möglichst niedrigschwellige Formate anzubieten und weiterzuentwickeln, die Fachsprache zu reduzieren, konkrete Beispiele zu nennen, einfache Kostenvergleiche zu ermöglichen, verständliche Langfristeffekte aufzuzeigen und in die **unabhängige Beratung** einzubinden. Besonderer Fokus sollte auf **Haushalte ohne Vorerfahrung** gelegt werden.
- **Industrie, Netzbetreiber, Handwerk und Forschung** sollten Kennenlern- und Bildungsangebote für Schüler und Interessierte ausbauen. Ziel ist, praxisnahes **technisches Wissen mit finanziellen Entscheidungs- und Risikokompetenzen** zu verknüpfen, um langfristig die energiebezogene finanzielle Entscheidungsfähigkeit in der Bevölkerung zu erhöhen.
- **Forschungsförderung** sollte **Transfer- und Kommunikationsaktivitäten** in technisch geprägten Förderprojekten stärker gewichten. Förderprogramme sollten explizit Mittel für die Aufbereitung von Forschungsergebnissen in bürgernahe Formate (Workshops, Leitfäden, digitale Lernmodule) vorsehen, sodass technisches und nicht-technisches Wissen integriert wird.
- **Politische Entscheidungsträger** sollten sicherstellen, dass **Förderprogramme für Energie- und Klimaschutz** gezielt **Schulungen** zur energiebezogenen finanziellen Entscheidungsfähigkeit für Antragstellende enthalten, um die **Antragstellung** zu vereinfachen und Fehlinterpretationen von Förderbedingungen zu vermeiden.
- **Kommunen** sollen **lokale Energieberatungsstellen** ausbauen, die nicht nur technische Beratung, sondern **individuelle Finanzanalysen** (z. B. Kosten-Nutzen-Rechnungen) anbieten, um die Entscheidungsbasis der Bürger zu stärken.

Durch die Kombination von verständlichen Informationen, transparenter Darstellung finanzieller Konsequenzen und zielgruppenspezifischer Aufbereitung können **das Energiewissen und die energiebezogene finanzielle Entscheidungskompetenz** nachhaltig gesteigert werden. Damit wird nicht nur die **Eigenständigkeit** bei energiebezogenen Entscheidungen gefördert, sondern auch die **Akzeptabilität** und **Wirksamkeit** von Maßnahmen zur Energiewende nachhaltig verbessert.

➤ **ENSURE empfiehlt: Gemeinsam getragene Visionen für die Umsetzung der Energiewende entwickeln, um viele Akteure für eine aktive Beteiligung zu motivieren (Handlungsempfehlung Energiewende-Visionen)**

Die Energiewende findet überall statt – mal leichter und mal mit größeren Herausforderungen. Die dafür nötigen lokalen Transformationsprozesse sind komplex und erfordern die dauerhafte **Akzeptanz** sowie das **Mitwirken vieler Akteure**. Ein gewisses technisches und systemisches Grundverständnis der Energieversorgung sowie der eigenen Gestaltungsmöglichkeiten und Selbstwirksamkeit bei allen Beteiligten ist Voraussetzung, um bestehende regionale Identitäten und unterschiedliche Kulturen einbinden zu können.

Regionale Rahmenbedingungen, die durch gesellschaftliche, kulturelle und wirtschaftliche Entwicklungen, aber auch durch die geographischen Bedingungen vor Ort bestimmt werden, und nationale Maßnahmen, z.B. im Übertragungsnetz, bestimmen das **Maß an Transformationsbedarf** in den jeweiligen Regionen. Die Herausforderung besteht darin, die **Vielzahl potenzieller Maßnahmen zu identifizieren** und aus diesem Set die **beste Lösung für die Region** im Gesamtkontext der nationalen Energiewende auszuhandeln – bedingt durch die jeweiligen technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Gegebenheiten.

ENSURE belegt, dass die Transformation dort besonders erfolgreich ist, wo **gemeinsam getragene Ideen** und ein **Selbstverständnis** über die lokale Energiewende existieren (Energiewende-Visionen und -Narrative). Die Übersetzung erfolgreicher Ideen aus anderen Regionen in den eigenen Kontext kann nicht nur die **Motivation** steigern, sondern auch **finanzielle Vorteile** (z. B. durch Energiegenossenschaften, Teilhabemodelle) bringen. Ein **integrierter, informierter, mehrstufiger Transfer- und Informationsworkflow**, der den Akteuren „Ihre“ gemeinsame Energiewende vor Ort ermöglicht, kann das unterstützen. Dieser soll für alle Akteure – Stadtverwaltung, Energieversorger, Industrie, Bürgerinnen und Bürger, Regulierungsbehörden und Verbände – maßgeschneiderte, aber kompatible Arbeitspakete bereitstellen.

- **Kommunale Verwaltungen** sollen eine kompakte **Checkliste** erstellen, die politische, technische, ökonomische und soziale Rahmenbedingungen der Kommune abbildet. Damit können bewährte Maßnahmen aus anderen Regionen abgeglichen werden.
- **Bürgerinnen und Bürger** sollen frühzeitig über lokale Gegebenheiten und Zielsetzungen informiert werden; leichte, verständliche Informationsblätter (in Zusammenarbeit mit Energieversorgern) unterstützen dies. Mit Umfragen können Interessen identifiziert und darauf aufbauend gemeinsame **Workshops**, d.h. in für alle Stakeholder sowie Bürgerinnen und Bürgern offenen Workshop, angeboten werden, die zur Priorisierung der attraktivsten Maßnahmen beitragen.
- **Bundesnetzagentur und Gesetzgeber** sollen geeignete Rahmenbedingungen schaffen, innerhalb derer die Umsetzung von Teilhabemodellen (z.B. Mieterstrom, gemeinschaftliche Gebäudeversorgung, Energy Sharing) durch Akteure vor Ort unter vertretbarem Aufwand und Kosten möglich wird.
- **Lokale Energieversorger** sollen relevante **Netz- und Lastdaten** ermitteln und zur Verfügung stellen, das eigene Portfolio mit anderen abgleichen und einen **Pilotplan** entwickeln, der Finanzierung möglicher zukünftiger Versorgungsoptionen, notwendige Genehmigungen und Kommunikationsstrategien berücksichtigt – so wird der Dialog mit anderen Akteuren konkret und praxisbezogen unterstützt.
- **Industrie** soll den eigenen Energiebedarf ermitteln, geplante Produktionsänderungen oder Bauvorhaben prüfen und aktuelle sowie prospektive **Erkenntnisse konstruktiv in den Austausch mit regionalen Akteuren einbringen**.

- **Verbände** (Interessenvertretungen der Industrie, Städte, Gemeinden und Gesellschaft) sollen einen **Katalog erfolgreicher Projekte** ihrer Mitglieder erstellen, kostenfreie **Matching-Beratung** anbieten, um lokale Bedarfe mit Beispielen zu verknüpfen, und **co-kreative Workshops** mit geeigneten Moderatoren und Methodik-Material unterstützen. Gemeinsam mit den Vertretern lokaler Industrie- und Handelskammern (IHK) und Handwerkskammern (HWK) können **regional angepasste Policy-Papers** entwickelt werden, die die politischen Rahmenbedingungen für die Umsetzung begünstigen.

Die Transformation des Energiesystems greift tief in technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Strukturen ein und erfordert die **Mitwirkung vielfältiger Akteure**. Ohne breite Beteiligung und ein gemeinsames Verständnis von Zielbildern entstehen Risiken von **Akzeptanzkonflikten**, Verzögerungen und ineffizienten Einzelentscheidungen. **Gemeinsam entwickelte, regional verankerte Energiewende-Visionen** schaffen Orientierung, ermöglichen Koordination, erhöhen die Verbindlichkeit von Umsetzungsprozessen und lassen Zielkonflikte frühzeitig sichtbar werden – so können vor Ort tragfähige Lösungen entstehen.

➤ **ENSURE empfiehlt: Die Ausgestaltung der Energiewende vor Ort mit einer Vielfalt von Beteiligten unterstützen (Handlungsempfehlung Prozessgestaltung)**

Auch lokale Transformationsprozesse im Rahmen der Energiewende sind komplex und müssen unter **Zeitdruck**, unsicheren sowie **sich ändernden Randbedingungen** umgesetzt werden. Die jeweiligen Bedingungen vor Ort sind geprägt durch lokal spezifische Problemlagen und Akteurskonstellationen, historisch gewachsenen Wirtschafts- und Energiestrukturen sowie konkurrierende Zielvorstellungen und divergierenden Kenntnisse über die Chancen, Risiken und Nebenfolgen der Energiewende. Gleichzeitig stehen Kommunen in der Verantwortung, politische Zielsetzungen der Bundes- und Länderebene umzusetzen, ohne dass hierfür passgenaue oder übertragbare Vorgehensweisen existieren.

Die hohe **Komplexität des Energiesystems** wird bei einem typischen Verwaltungsvorgehen im deutschen Föderalismus nur unzureichend berücksichtigt. Sie ergibt sich vor allem aus dem Zusammenspiel seiner **technischen, ökonomischen sowie gesellschaftlichen Begebenheiten vor Ort**. Verwaltungsvorgehen als formalisierte Vorgehensweisen erleichtern prinzipiell die Umsetzung gesetzlicher Vorgaben, bieten aber ggf. wenig Raum für die **Berücksichtigung lokaler Besonderheiten** und damit einhergehender Herausforderungen und Möglichkeiten in der Gestaltung der Energiewende.

Die ENSURE-Arbeiten in den Modellregionen zeigen, dass die Transformation unter den beschriebenen Bedingungen dort besonders gut gelingt, wo ein **Lern- und Gestaltungsprozess gemeinsam mit den Akteuren vor Ort** umgesetzt wird. Zentrale Erkenntnis ist, dass das **benötigte Wissen über die Bedingungen einer erfolgreichen Transformation, die nötige Steuerung der Aushandlungsprozesse zwischen den beteiligten Stakeholdern und die konkrete Umsetzung** der beschlossenen Maßnahmen am erfolgreichsten gemeinsam, d.h. unter Einbeziehung aller Stakeholder in iterativen Aushandlungs- und Lernprozessen, erarbeitet wird. So können die unterschiedlichen Kenntnisse und Vorstellungen über die (lokale) Energiewende integriert, Konflikte über die Ziele der Energiewende vor Ort und über die und möglichen Vorgehen, diese zu erreichen, sowie die divergierenden Bedingungen, in denen beteiligte Stakeholder agieren, sichtbar gemacht werden. Sind alle lokal relevanten Akteure in diesen Prozess eingebunden, können gemeinsame Handlungsmöglichkeiten und Gestaltungsspielräume offengelegt werden.

Die Ausgestaltung der lokalen Transformation sollte als ein Prozess verstanden werden, der durch die Bedingungen und Akteure vor Ort bestimmt wird. Die Findung einer tragfähigen Maßnahme sollte nicht das Ergebnis vorab definierter Lösungen sein, sondern sich **aus einem gemeinsamen politischen und gesellschaftlichen Entscheidungsprozess (Governance) entlang gemeinsam entwickelter Verfahren**

**ergeben (Lernendes Verfahren).** Problembeschreibung, Zieldefinition, Maßnahmenentwicklung und Evaluation der Maßnahmen sollten im Dialog abgestimmt und integrativ erfolgen.

- Den **kommunalen Spitzenverbänden (Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB), Deutscher Landkreistag (DLT), Deutscher Städtetag)** wird empfohlen, Leitfäden zu entwickeln, die die nötigen Aushandlungsprozesse auf kommunaler und regionaler Ebene, ggf. auf überregionaler Ebene anleiten und strukturieren.
- Den **Verbänden**, die die Interessen der Industrie und Netzbetreiber vertreten (z.B. **BDI, VEA, ZVEI**) und den **Kammern (IHK, HWK)** wird empfohlen, sich in den Prozess aktiv einzubringen und den Transfer für ihre Zielgruppen, inklusive der Erstellung eigener Leitfadenmodule, voranzutreiben, um ein möglichst verzahntes Vorgehen zu unterstützen.
- Den **politischen Akteuren** auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene, die mit Netzprojekten betraut sind, wird empfohlen, bei der Regulierung und Umsetzungsgestaltung von Planungs- und Bauvorhaben, auf die Implementierung passender Organisationsstrukturen und zugehöriger Leitfäden hinzuwirken.
- Den **Netzbetreibern** und **Stadtwerken** wird empfohlen, für einen möglichst transparenten und nachvollziehbaren Transferprozess die Verbände in der Erstellung und die Kommunen in der Anwendung entsprechender Leitfäden zu unterstützen und diese, wo nötig, einzufordern.

Eine solche integrierte Ausrichtung der für die Energiewende nötigen Veränderungen **erhöht die lokale Umsetzungsfähigkeit** nationaler und lokaler Transformationsstrategien. Sie stärkt die lokale Handlungsfähigkeit, integriert die Akteure vor Ort und verbessert damit die Robustheit von Entscheidungen. Die aktive, passgenaue Prozessgestaltung ermöglicht es, unterschiedliche Kenntnisse zusammenzuführen, Lernprozesse zu strukturieren und Aushandlungsprozesse kontinuierlich weiterzuentwickeln. Dadurch wird das gemeinsame Vorgehen vor Ort unterstützt und demokratisch legitimiert, da sie auf geteiltem Problemverständnis, gemeinsamer Verantwortung und institutionell anschlussfähigen Lernprozessen beruhen.

### 3. Optionen und Empfehlungen für verschiedene Stakeholder

In diesem Kapitel werden Optionen und Empfehlungen für verschiedene Stakeholder zusammengestellt. Dadurch ergeben sich thematische Überlappungen zum vorherigen Kapitel.

Die folgenden Unterkapitel haben keine einheitliche Struktur und nutzen teilweise Fachbegriffe, die im Kontext des jeweiligen Stakeholders geläufig sind. Teilweise werden auch Begriffe aus ENSURE verwendet, wie sie in den Fachveröffentlichungen verwendet werden. Die Kapitel sind aus internen Berichten des ENSURE-Projekts zusammengestellt.

#### 3.1. Optionen und Empfehlungen für Stromnetzbetreiber

Die detaillierten Optionen und Empfehlungen für Stromnetzbetreiber finden sich im Bericht „Systemisches Gesamtbild“, sie werden hier nicht wiederholt, sondern nur einige Hinweise zu dem Bericht gegeben.

Für Netzbetreiber bietet der Bericht einen strukturierten Ansatz, um die eigene Ausgangssituation einzuordnen und Prioritäten für die Weiterentwicklung der Netze abzuleiten. Besonders hilfreich ist dabei Kapitel 4 mit der Zuordnung von Herausforderungen zu Netzebenen und Lösungsansätzen, wodurch sichtbar wird, welche Handlungsfelder für die jeweilige Spannungsebene bereits adressiert werden und wo weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Bei der Beschreibung einzelner Lösungen ist auch angegeben, welcher der zehn ENSURE-Handlungsempfehlungen sie zentral zugeordnet werden kann.

Bei der Nutzung des Berichts sollte berücksichtigt werden, dass viele der beschriebenen Lösungen noch von regulatorischen, organisatorischen oder technischen Rahmenbedingungen abhängen. Die dargestellten Ansätze sind daher nicht als unmittelbare Umsetzungsempfehlungen zu verstehen, sondern als Beitrag zur strategischen Planung und Bewertung zukünftiger Investitions-, Digitalisierungs- und Innovationsmaßnahmen.

#### **3.2. Optionen und Empfehlungen: Technologien nur für das System von morgen und für die Integration in das System von heute entwickeln. Innovationen konsequent an Interoperabilität, Standardisierung, Skalierbarkeit und regulatorischer Anschlussfähigkeit ausrichten und damit die Voraussetzungen für eine schnelle und breite Umsetzung in Netzbetrieb und Energiemärkten schaffen.**

Die Empfehlungen aus Arbeiten in den technischen Bausteinen zeigen, dass technologische Innovation für ein netzdienliches Energiesystem weniger in isolierten Produktinnovationen liegt, sondern in der systemischen Auslegung, Standardisierung, regulatorischen Anschlussfähigkeit und praxisnahen Erprobung neuer Technologien. Für die Technologieentwicklung relevant sind daher vor allem Lösungen, die skalierbar, interoperabel und in bestehende Netz- und Marktprozesse integrierbar sind.

##### 3.2.1. Systemfähige Technologien statt Einzelkomponenten (Netzdienlichkeit als Produkteigenschaft)

Die zunehmende Komplexität des Energiesystems erfordert eine stärkere Ausrichtung der Technologieentwicklung auf das Zusammenspiel von Komponenten innerhalb des Gesamtsystems. Zukünftige Technologien müssen daher nicht nur ihre primäre Funktion erfüllen, sondern zusätzlich netzdienliche Eigenschaften bereitstellen und sich flexibel an unterschiedliche Betriebsbedingungen anpassen können. Von

besonderer Bedeutung sind dabei Steuerbarkeit, Kommunikationsfähigkeit und die Möglichkeit, technologische Lösungen in übergeordnete Betriebs- und Optimierungskonzepte einzubinden.

Insbesondere flexible Verbraucher, Speicher, Energy Hubs, leistungselektronische Komponenten sowie moderne Gleichstromtechnologien zeigen das Potenzial, bestehende Netzinfrastruktur effizienter zu nutzen und zusätzliche Flexibilitäten für Netzbetrieb und Systemdienstleistungen bereitzustellen. Technologien sollten daher zunehmend so entwickelt werden, dass sie sowohl lokale Anforderungen erfüllen als auch systemübergreifend zur Reduzierung von Engpässen, zur Integration erneuerbarer Energien und zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen können. Gleichzeitig sollte bei der Entwicklung neuer Technologien bereits berücksichtigt werden, dass ihr Nutzen häufig aus dem Zusammenspiel mehrerer Anlagen und nicht aus dem isolierten Einsatz einzelner Komponenten entsteht.

### **Forschungsergebnisse aus ENSURE**

In folgenden werden die ENSURE-Forschungsergebnisse anhand diesen vier Cluster präsentiert:

- Dynamische Betriebsgrenzen & Überlastfähigkeit
- Systemdienliche Umrichter & Aggregation
- Systemintegration von DC-Technologien
- Flexibilitätsintegration im Verteilnetz

#### **Dynamische Betriebsgrenzen & Überlastfähigkeit**

##### **Dynamische Kapazität von HGÜ-Systemen**

Die temporäre Höherauslastung von HGÜ-Systemen kann dazu beitragen, aktuell und mittelfristig (bis zum weitgehenden Ausbau eines Zielnetzes) bestehende temporäre Engpässe im Übertragungsnetz zu bewältigen. Da eine temporäre Höherauslastung einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der HGÜ-Systeme haben kann müssen vor dem Einsatz dieser Lösung die betroffenen Netzkomponenten von den Herstellern freigegeben werden. Zudem muss beim Netzbetreiber eine kurative Systemführung etabliert sein. Der Aufwand zur Vorbereitung und die Mehrkosten einer Realisierung der Lösung müssen gegenüber dem erwarteten Nutzen abgewogen werden.

#### **Systemdienliche Umrichter & Aggregation**

##### **Dynamisches Virtuelles Kraftwerk**

In Verteilnetzen bei denen Engpässen aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten (wie steuerbare Lasten, Speicher, Energy Hub) vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und das Dimmen von Lasten minimiert wird.

##### **MVDC-Kollektornetz im netzbildenden Betrieb**

Das Konzept der MVDC-Kollektornetze sollte weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu bieten sich Regionen mit hohen Anschlussraten erneuerbarer Energien und unzureichenden Kapazitäten im Verteilnetz an, in denen ein direkter Anschluss neuer EE-Anlagen an höhere Spannungsebenen vorteilhaft ist. Weiter zu untersuchen sind u.a. der angemessene Grad der Standardisierung des Konzepts, der den Planungs- und Realisierungsaufwand begrenzt und dennoch auf die konkreten Anwendungsfälle angepasst werden

kann. Der Einsatz einer Vielzahl an netzbildenden Umrichtern im künftigen Netz erfordert zudem wirksame koordinierende Verfahren. Im Fall einer erfolgreichen Erprobung können MVDC-Kollektornetze ein wichtiger Baustein der weiteren Netzentwicklung in Regionen mit hohen EE-Zubauraten sein.

### **Systemintegration von DC-Technologien**

#### **Solid-State Transformator (SST) und SST-basierte LVDC Microgrids**

Der Einsatz von LVDC-Netzen sollte dann erwogen werden, wenn in räumlich begrenzten Verteilnetzen eine hohe Durchdringung mit erneuerbarer Stromerzeugung inkl. Speichern besteht und / oder verschiedene AC-basierte Infrastrukturen an das Stromnetz angeschlossen werden sollen. Weitere Anwendungsfälle sind Inselnetze, z.B. unter Einbindung von elektrifizierten Prozessen in der Industrie oder Quartierslösungen, die von einer DC-Infrastruktur profitieren würden. Die Technologieanbieter sollten die neuesten Entwicklungen in eine neue Generation von SST umsetzen und deren Anwendung in Verbindung mit LVDC-Netzen unterstützen. Hierbei muss insbesondere eine Kostenreduktion bei der DC-Technik erreicht werden. Die Verteilnetzbetreiber sollten geeignete Einsatzfälle identifizieren und die Wirtschaftlichkeit im Fall einer Verfügbarkeit kostengünstiger technischer Lösungen bewerten. Seitens der Regulierer sollten die regulatorischen Anreize für die Netzbetreiber angepasst werden (TCO-Regulierung).

### **Flexibilitätsintegration im Verteilnetz**

#### **Engpassmanagement im Verteilnetz durch Flexibilitäten**

In Verteilnetzen bei denen Engpässen aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten (wie steuerbare Lasten, Speicher, Energy Hub) vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und Dimmung von Lasten minimiert wird.

#### **Automatisierte, dezentrale Energiemanagementsysteme im Verteilnetz**

Der regulatorische Rahmen für Verteilnetzbetreiber sollte so weiterentwickelt werden, dass Anreize für die Mobilisierung der Flexibilitätspotenziale in Ortsnetzen und deren koordinierten Einsatz zur Entlastung der Netze entstehen. Verteilnetzbetreiber sollten den Einsatz intelligenter Energiemanagementsysteme zur koordinierten Steuerung dezentraler Flexibilitäten prüfen und diese Systeme ggf. bei der zukünftigen Systemauslegung berücksichtigen und implementieren. Solche Systeme können genutzt werden, um Lastspitzen in der Nieder- und Mittelspannung zu glätten, ohne dass die Endkunden einen Komfortverlust erfahren. Auch eine Kooperation zwischen den Betreibern von benachbarten Verteilnetzen kann realisiert werden. Hierdurch wird ein längerfristig erforderlicher Netzausbau i.d.R. zwar nicht vermieden, aber er kann zeitlich aufgeschoben werden und zwischenzeitlich kann die Fähigkeit der Netze zur Aufnahme von erneuerbarer Stromerzeugung erhöht werden.

### **3.2.2. Digitale Grundfähigkeit als Voraussetzung neuer Technologien (Daten, Modelle, Automatisierung)**

Viele Technologiepfade setzen eine hohe digitale Reife voraus. Technologieentwicklung und Digitalisierung sind nicht trennbar. Die erfolgreiche Umsetzung vieler zukünftiger Energietechnologien setzt eine

leistungsfähige digitale Infrastruktur voraus. Mess-, Kommunikations- und Datenverarbeitungssysteme entwickeln sich dabei zu einem integralen Bestandteil technologischer Lösungen. Die Erfassung von Betriebszuständen in Echtzeit, die Nutzung historischer Daten sowie die kontinuierliche Bewertung von Netz- und Anlagenzuständen ermöglichen eine effizientere Nutzung bestehender Infrastruktur und schaffen die Grundlage für automatisierte Betriebs- und Planungsprozesse.

Besondere Bedeutung kommt dabei Verfahren zu, die Unsicherheiten in Betrieb und Planung explizit berücksichtigen. Mit zunehmender Volatilität von Erzeugung und Verbrauch sowie einer steigenden Anzahl dezentraler Anlagen gewinnt die probabilistische Bewertung von Zuständen, Lasten und Netzengpässen an Relevanz. Technologien sollten daher zunehmend in der Lage sein, Daten nicht nur zu erfassen, sondern auch für Prognosen, Zustandsbewertungen und automatisierte Entscheidungen nutzbar zu machen. Darüber hinaus sollte die Entwicklung digitaler Zwillinge und datenbasierter Assistenzsysteme weiter vorangetrieben werden, um Netzbetriebs- und Planungsentscheidungen auf einer fundierten Informationsbasis treffen zu können.

### **Forschungsergebnisse aus ENSURE**

- Netzzustands- & Topologieerfassung
- Digitale Grundlagen für Flexibilitätssteuerung
- Digitale Schutz- und Assistenzsysteme

Die Forschungsergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben.

#### **Netzzustands- & Topologieerfassung**

Automatisierte, dezentrale Energiemanagementsysteme im Verteilnetz

Der regulatorische Rahmen für Verteilnetzbetreiber sollte so weiterentwickelt werden, dass Anreize für die Mobilisierung der Flexibilitätspotenziale in Ortsnetzen und deren koordinierten Einsatz zur Entlastung der Netze entstehen.

Verteilnetzbetreiber sollten den Einsatz intelligenter Energiemanagementsysteme zur koordinierten Steuerung dezentraler Flexibilitäten prüfen und diese Systeme ggf. bei der zukünftigen Systemauslegung berücksichtigen und implementieren. Solche Systeme können genutzt werden, um Lastspitzen in der Nieder- und Mittelspannung zu glätten, ohne dass die Endkunden einen Komfortverlust erfahren. Auch eine Kooperation zwischen den Betreibern von benachbarten Verteilnetzen kann realisiert werden. Hierdurch wird ein längerfristig erforderlicher Netzausbau i.d.R. zwar nicht vermieden, aber er kann zeitlich aufgeschoben werden und zwischenzeitlich kann die Fähigkeit der Netze zur Aufnahme von erneuerbarer Stromerzeugung erhöht werden.

Assistenzsystem zur Netzzustandsermittlung

Der Einsatz eines Assistenzsystems zur Netzzustandsermittlung sollte insbesondere in stark ausgelasteten Verteilnetzen geprüft werden, in denen die netzorientierte Steuerung von Verbrauchseinrichtungen gemäß §14a EnWG häufig angewendet wird und operative Entscheidungen des Netzbetriebs datenbasiert erfolgen müssen. Bei der Bewertung von Aufwand und Nutzen eines Assistenzsystems sind die aktuelle und künftig erwartete Netzbelastung und die Durchdringung des Netzes mit steuerbaren Verbrauchern relevante Parameter.

Datenbasierte Zustands- und Systemerfassung für ein effizientes Engpassmanagement

Die Netzzustandserfassung auf unteren Spannungsebenen bildet die zentrale Grundlage für die Steuerung von Flexibilitäten im Verteilnetz und ermöglicht damit eine höhere Integration erneuerbarer Energien und eine bessere Auslastung der bestehenden Netzinfrastruktur. Die hier entwickelten Tools zur datenbasierten Zustands- und Systemerfassung sollten insbesondere in Verteilnetzen mit steigender Last- und Einspeisedynamik eingesetzt werden, in denen klassische Planungsannahmen zunehmend unsicher werden. Damit die Lösung eingesetzt werden kann, muss eine ausreichende messtechnische Infrastruktur für die Netzzustandserfassung vorliegen, die eine zeitnahe Erkennung von Überlastungen und Spannungsbandverletzungen erlaubt. In sehr kleinen oder statischen Netzen mit geringer Durchdringung von erneuerbarer Erzeugung und Flexibilitäten ist der Nutzen der Lösung im Vergleich zu ihrem Aufwand i.d.R. begrenzt.

#### Netzdienlicher Einsatz flexibler, lokaler Anlagen

Der netzdienliche Einsatz dezentraler, autarker Steuerungen für flexible lokale Anlagen in der Niederspannung wird als Rückfallebene und Übergangslösung empfohlen, insbesondere im Fall von Kommunikationsstörungen oder Ausfällen zentraler Systeme. Dafür sind regulatorische Anpassungen notwendig, um den Fallback-Betrieb ohne externe Netzdaten einzusetzen. Zur Vermeidung neuer Leistungsspitzen und instabiler Netzzustände wird grundsätzlich eine stufenweise bzw. rampenbasierte Steuerung beim Dimmen und bei der Wiederfreigabe steuerbarer Verbraucher empfohlen.

#### Datenbasierte Zustands- und Systemerfassung zur optimierten Netzanschlussprüfung und für einen effizienten Netzausbau

Eine retrospektive Zustandsschätzung und Verfahren zur Topologieerkennung sind zentrale Enabler für einen präzisen digitalen Zwilling des Verteilnetzes. In diesem Modell können das Netz und das Verhalten von Netzkunden und dezentralen Erzeugern abgebildet werden. Dies schafft eine Grundlage für vorausschauende, effiziente und resiliente Netzplanung und Netzbetriebsführung. Aufgrund der hohen Unsicherheit von Prognosen sollte diese Planung unsicherheitsbewusst erfolgen und verschiedene Topologievarianten berücksichtigen, um eine robuste Priorisierung zu ermöglichen. Der Einsatz der Zustands- und Systemerfassung für die Analyse realer und potenzieller Überlastungen kann Netzbetreibern dabei helfen, Investitionen gezielt dort einzusetzen, wo der größte Nutzen entsteht.

### **Digitale Grundlagen für Flexibilitätssteuerung**

#### Engpassmanagement im Verteilnetz durch Flexibilitäten

In Verteilnetzen mit Engpässen, die aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und Dimmung von Lasten minimiert wird.

#### Netzdienlicher Einsatz flexibler, lokaler Anlagen

Der netzdienliche Einsatz dezentraler, autarker Steuerungen für flexible lokale Anlagen in der Niederspannung wird als Rückfallebene und Übergangslösung empfohlen, insbesondere im Fall von Kommunikationsstörungen oder Ausfällen zentraler Systeme. Dafür sind regulatorische Anpassungen notwendig, um den Fallback-Betrieb ohne externe Netzdaten einzusetzen. Zur Vermeidung neuer Leistungsspitzen und instabiler Netzzustände wird grundsätzlich eine stufenweise bzw. rampenbasierte Steuerung beim Dimmen und bei der Wiederfreigabe steuerbarer Verbraucher empfohlen.

## **Digitale Schutz- und Assistenzsysteme**

Assistenzsysteme für eine autonome Betriebsführung

Hersteller von Leitsystemen für den Netzbetrieb sollten bei der Entwicklung und Implementierung von Assistenzsystemen die Entlastung des Operators maximieren und diese auch objektiv messen. Für einen effizienten Einsatz der Assistenzsysteme sollte die in ENSURE entwickelte Bewertungsmethodik eingesetzt werden.

Adaptivschutz mittels Protection-Toolchain

Die Protection-Toolchain ist ein zentraler Enabler für eine sichere, flexible und automatisierte Schutztechnik in zunehmend komplexen, erneuerbaren und digitalisierten Stromnetzen. Die Netzbetreiber sollten die Toolchain in Netzen einsetzen, die durch Komplexität, häufige Änderungen (z.B. durch erneuerbare Energien) und einen hohen Digitalisierungsgrad geprägt sind. Voraussetzung für den Einsatz ist eine hohe, aktuelle und digital verfügbare Datenbasis (Netz- und Schutzdaten). Vor dem Rollout empfiehlt sich eine Pilotphase in ausgewählten Netzabschnitten, um Prozesse, Schnittstellen und die Qualität der automatisierten Schutzkonzepte zu validieren.

### **3.2.3. Standards, Schnittstellen und Interoperabilität als Innovationshebel und als Voraussetzung für Skalierung (von proprietären Lösungen zu skalierbaren Märkten)**

Technologieentwicklung stößt weniger an physikalische, sondern an Standardisierungs- und Schnittstellengrenzen. Interoperabilität wird zum Wettbewerbsfaktor.

Mit der fortschreitenden Digitalisierung und der stärkeren Vernetzung von Anlagen, Netzebenen und Marktakteuren wächst die Bedeutung standardisierter Schnittstellen und interoperabler Systemarchitekturen. Die Skalierung innovativer Lösungen hängt zunehmend davon ab, wie einfach sie sich in bestehende Betriebs-, Kommunikations- und Datenstrukturen integrieren lassen. Technologieentwicklung sollte deshalb frühzeitig Aspekte wie offene Schnittstellen, standardisierte Datenformate und die Kompatibilität mit bestehenden Kommunikationsstandards berücksichtigen.

Gleichzeitig zeigen neue Technologiefelder wie Gleichstromanwendungen, intelligente Plattformlösungen oder herstellerübergreifende Datenarchitekturen, dass bestehende Standards nicht alle zukünftigen Anforderungen vollständig abdecken. In diesen Bereichen besteht weiterer Entwicklungsbedarf, insbesondere hinsichtlich gemeinsamer Datenmodelle, Sicherheitsmechanismen und standardisierter Kommunikationsprozesse. Ziel sollte es sein, technologische Innovationen so zu gestalten, dass sie einerseits Freiräume für neue Lösungsansätze ermöglichen und andererseits eine spätere breite Integration und Skalierung nicht erschweren.

## **Forschungsergebnisse aus ENSURE**

- Leitsystem- & Datenaustauschgrenzen
- Geringe Standardisierung als Chance & Risiko
- Firmware- und Patchmanagement

Die Forschungsergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben.

## **Leitsystem- & Datenaustauschgrenzen**

## Komplexer Datenaustausch auf Leitsystemebene zwischen Netzebenen

Die im Rahmen von ENSURE durchgeführten Analysen zeigen, dass moderne Strukturen für die Haltung und den Austausch der deutlich wachsenden Datenvolumina im Prozessnetz zwischen Netzbetreibern verfügbar gemacht werden sollten. Netzbetreiber und Regulierer sollten koordinierte, hersteller- und netzbetreiberübergreifende Pilotprojekte zu interoperablen, sicheren und zukunftsfähigen Standards künftiger Kommunikationsprotokolle und Kommunikationsarchitekturen im Prozessnetz vorantreiben. Hierbei ist eine frühzeitige Koordinierung mit europäischen und internationalen Branchen- und Normungsgremien sinnvoll.

## Geringe Standardisierung als Chance & Risiko

### MVDC-Kollektornetz im netzbildenden Betrieb

Das Konzept der MVDC-Kollektornetze sollte weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu bieten sich Regionen mit hohen Anschlussraten erneuerbarer Energien und unzureichenden Kapazitäten im Verteilnetz an, in denen ein direkter Anschluss neuer EE-Anlagen an höhere Spannungsebenen vorteilhaft ist. Weiter zu untersuchen sind u.a. der angemessene Grad der Standardisierung des Konzepts, der den Planungs- und Realisierungsaufwand begrenzt und dennoch auf die konkreten Anwendungsfälle angepasst werden kann. Der Einsatz einer Vielzahl an netzbildenden Umrichtern im künftigen Netz erfordert zudem wirkungsvolle koordinierende Verfahren. Im Fall einer erfolgreichen Erprobung können MVDC-Kollektornetze ein wichtiger Baustein der weiteren Netzentwicklung in Regionen mit hohen EE-Zubauraten sein.

### Solid-State Transformator (SST) und SST-basierte LVDC Microgrids

Der Einsatz von LVDC-Netzen sollte dann erwogen werden, wenn in räumlich begrenzten Verteilnetzen eine hohe Durchdringung mit erneuerbarer Stromerzeugung inkl. Speichern besteht und / oder verschiedene AC-basierte Infrastrukturen an das Stromnetz angeschlossen werden sollen. Weitere Anwendungsfälle sind Insel-netze, z.B. unter Einbindung von elektrifizierten Prozessen in der Industrie oder Quartierslösungen, die von einer DC-Infrastruktur profitieren würden. Die Technologieanbieter sollten die neuesten Entwicklungen in eine neue Generation von SST umsetzen und deren Anwendung in Verbindung mit LVDC-Netzen unterstützen. Hierbei muss insbesondere eine Kostenreduktion bei der DC-Technik erreicht werden. Die Verteilnetzbetreiber sollten geeignete Einsatzfälle identifizieren und die Wirtschaftlichkeit im Fall einer Verfügbarkeit kostengünstiger technischer Lösungen bewerten. Seitens der Regulierer sollten die regulatorischen Anreize für die Netzbetreiber angepasst werden (TCO-Regulierung).

## Firmware- und Patchmanagement

### Asset-, Patch- und Konfigurationsmanagement

Das in ENSURE entwickelte herstellerübergreifende Systematik für das Asset-, Patch- und Konfigurationsmanagement von digitalisierten Komponenten sollte von allen Netzbetreibern für den Einsatz geprüft werden. Zudem sollte schon beim Einkauf von Betriebsmitteln geprüft werden, ob deren Hersteller die Einbindung der Komponenten in ein solches Managementsystem durch die Bereitstellung der erforderlichen Daten unterstützen. Um dies herstellerübergreifend bestmöglich zu unterstützen, sollten Technologiehersteller und Forschungseinrichtungen die Standardisierung der für diese Managementsysteme erforderlichen Daten vorantreiben.

### 3.2.4. Technologieentwicklung unter regulatorischer Anschlussfähigkeit (“Regulierungsrobuste” Innovation)

Neue Technologien entfalten ihren Nutzen nur dann vollständig, wenn sie mit den regulatorischen und organisatorischen Rahmenbedingungen des Energiesystems kompatibel sind. Technologieentwicklung muss regulatorische Randbedingungen antizipieren, nicht nur erfüllen.

Die Entwicklung technischer Lösungen sollte daher frühzeitig berücksichtigen, wie diese in bestehende Netzbetriebs-, Markt- und Planungsprozesse eingebunden werden können. Dies gilt insbesondere für Technologien zur Flexibilitätsnutzung, für automatisierte Steuerungs- und Optimierungssysteme sowie für sektorenübergreifende Lösungen. Umgekehrt müssen regulatorische Anforderungen dem technischen Fortschritt angepasst werden.

Darüber hinaus sollten neue Technologien transparente Entscheidungs- und Steuerungsmechanismen bereitstellen, damit ihre Wirkungsweise nachvollziehbar bleibt und eine sichere Integration in betriebliche Abläufe möglich ist. Auch die Verfügbarkeit robuster Rückfallmechanismen gewinnt mit zunehmender Automatisierung an Bedeutung. Regulatorische Anforderungen sollten dabei nicht ausschließlich als Randbedingung betrachtet werden, sondern als wichtiger Orientierungsrahmen für die Entwicklung langfristig marktfähiger und breit einsetzbarer Technologien.

#### **Forschungsergebnisse aus ENSURE**

- Flexibilitätslösungen und Redispatch 2.0
- Asset-Monitoring & regulatorische Anreize
- Sektorenkopplung & Infrastrukturplanung

Die Forschungsergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben.

#### **Flexibilitätslösungen und Redispatch 2.0**

##### Engpassmanagement im Verteilnetz durch Flexibilitäten

In Verteilnetzen mit Engpässen, die aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten (wie steuerbare Lasten, Speicher, Energy Hub) vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und Dimmung von Lasten minimiert wird.

##### Automatisierte, dezentrale Energiemanagementsysteme im Verteilnetz

Der regulatorische Rahmen für Verteilnetzbetreiber sollte so weiterentwickelt werden, dass Anreize für die Mobilisierung der Flexibilitätspotenziale in Ortsnetzen und deren koordinierten Einsatz zur Entlastung der Netze entstehen. Verteilnetzbetreiber sollten den Einsatz intelligenter Energiemanagementsysteme zur koordinierten Steuerung dezentraler Flexibilitäten prüfen und diese Systeme ggf. bei der zukünftigen Systemauslegung berücksichtigen und implementieren. Solche Systeme können genutzt werden, um Lastspitzen in der Nieder- und Mittelspannung zu glätten, ohne dass die Endkunden einen Komfortverlust erfahren. Auch eine Kooperation

zwischen den Betreibern von benachbarten Verteilnetzen kann realisiert werden. Hierdurch wird ein längerfristig erforderlicher Netzausbau i.d.R. zwar nicht vermieden, aber er kann zeitlich aufgeschoben werden und zwischenzeitlich kann die Fähigkeit der Netze zur Aufnahme von erneuerbarer Stromerzeugung erhöht werden.

### **Asset-Monitoring & regulatorische Anreize**

Optimierung von Instandhaltungsmanagement und Asset-Management-Strategien

Betreiber von Übertragungsnetzen sollten ihre Instandhaltungsprozesse von zeitbasierten auf zustandsorientierte Verfahren umstellen. Hierzu sind als zentrale Voraussetzungen eine cybersichere Kommunikationsinfrastruktur und eine standardisierte IT-Infrastruktur erforderlich. Damit die KI-basierte Zustandsbewertung gute Ergebnisse liefert, sind Trainingsdaten in hoher Qualität und präzise definierte Kriterien zur Bewertung alternativer Szenarien erforderlich.

Die Regulierer sollten geeignete Anreize für die Netzbetreiber für eine längere Nutzung von bestehenden Anlagen schaffen. Die Technologieanbieter und Netzbetreiber sollten gemeinsam prüfen, ob und unter welchen Rahmenbedingungen die erstellten Optimierungsverfahren auch für den Einsatz in Verteilnetzen geeignet sind und diese ggf. entsprechend fortentwickeln.

### **Sektorenkopplung & Infrastrukturplanung**

Energy Hubs mit adaptierbarer Betriebsstrategie in Mittel- und Hochspannung

Energy Hubs ermöglichen die Speicherung unterschiedlicher Energieformen und deren bedarfsgerechte Bereitstellung durch die Nutzung von Sektorenkopplung und verschiedener Speichertechnologien. Der Energy Hub kann zur Bereitstellung von Flexibilität in Mittelspannungsnetzen eingesetzt werden und Netzengpässe entgegenwirken. Damit unterstützt er den Netzausbau und verhindert die Abregelung von erneuerbarer Erzeugung. Das Konzept kann auf die konkreten Verhältnisse eines Einsatzortes skaliert werden.

Die wirtschaftlich sinnvollen Einsatzmöglichkeiten eines Energy Hubs sind von der konkreten Netztopologie und den im Netz installierten Anlagen sowie den Ursachen des zu behebbenden Netzengpasses abhängig. Um die jeweils optimale Ausgestaltung zu identifizieren, sollten die Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Netzausbaumaßnahmen sowie die Auswirkungen auf Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien anhand von Modellrechnungen bewertet werden. Hierzu kann eine in ENSURE entwickelte Methodik verwendet werden.

Prognose der zukünftigen Verteilung von Verbrauchern und Einspeisern im Rahmen einer sektorenübergreifenden lokalen Energieleitplanung

Die entwickelte Lösung kann für die Prognose der Entwicklung der Wärmeversorgung von Wohngebäuden bereits eingesetzt werden. Für die Wärmeversorgung von Nichtwohngebäuden sowie eine Zuordnung von PV-Anlagen und Ladesäulen für E-Mobilität sind entsprechende automatisierte Verfahren noch zu entwickeln. Zu-dem sollte die bisher aus der Perspektive des Netzbetreibers entwickelte Methode noch um eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung aus der Perspektive z.B. der Gemeinde ergänzt werden.

Prognose der zukünftigen Verbreitung von Energiewendetechnologien auf Gebäudeebene

im Rahmen einer sektorenübergreifenden lokalen Energieleitplanung

Betreiber von Verteilnetzen können das Prognoseverfahren einsetzen, um Prognosen für die Durchdringung ihres Netzes mit Photovoltaik und Wärmepumpen in Wohngebäuden zu entwickeln. Hierzu ist es erforderlich, Annahmen zur generellen Durchdringung des Netzes mit diesen Technologien und einigen relevanten Einflussfaktoren zu treffen. Um eine Anwendung des Verfahrens auch für andere Energiewendetechnologien auf Gebäudeebene zu ermöglichen, sollte der Ansatz weiterentwickelt werden.

Analyse der künftigen Entwicklung von Heizungstechnologien im Rahmen einer sektorenübergreifenden Energieleitplanung

Der Einsatz von Wärmenetzen ist generell vor allem in verdichteten Siedlungsstrukturen mit hohen Wärmedichten sinnvoll. Mit Wärmepumpen gespeiste Wärmenetze können eine Flexibilitätsoption im Stromnetz darstellen, wenn sie mit Wärmespeichern verknüpft werden. Die Flexibilität kann erhöht werden, wenn zudem gasbetriebene Spitzenlastkessel eingesetzt werden.

Modellierung des Wasserstofftransportnetzes

Das Wasserstoffkernnetz sollte grundsätzlich so wie aktuell geplant realisiert werden. Bei seiner detaillierten Auslegung sollte die absehbare Fahrweise von mit Wasserstoff betriebenen Kraftwerken und von Elektrolyseuren umfassend analysiert und die Möglichkeit zur optimalen Einbindung von Wasserstoffspeichern berücksichtigt werden.

### 3.2.5. Erprobungsräume als Bestandteil der Technologieentwicklung und Beschleuniger von Innovation (vom Prototyp zur skalierbaren Lösung)

Innovationen benötigen geschützte Erprobungsräume, die Bestandteil der Technologieentwicklung sind – nicht deren Abschluss.

Die Entwicklung innovativer Energietechnologien erfordert somit geeignete Möglichkeiten zur praktischen Erprobung unter realitätsnahen Bedingungen. Reallabore, Pilotprojekte, Demonstrationsumgebungen und Hardware-in-the-Loop-Anwendungen leisten einen wichtigen Beitrag, um neue Technologien, Betriebsstrategien und Steuerungskonzepte schrittweise in Richtung Marktreife zu entwickeln. Sie ermöglichen die Validierung technischer Konzepte, die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten und die Identifikation möglicher Hemmnisse bei der praktischen Umsetzung.

Gleichzeitig bieten solche Erprobungsräume die Möglichkeit, Erfahrungen im Umgang mit neuen Technologien zu sammeln und Fragen der Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Standardisierung und Akzeptanz frühzeitig zu adressieren. Insbesondere für hochautomatisierte Netzbetriebs- und Schutzkonzepte, neue Flexibilitätsmechanismen, Gleichstromanwendungen sowie sektorenübergreifende Lösungen sind Demonstrations- und Pilotumgebungen ein wesentliches Instrument, um technische Risiken zu reduzieren und die spätere Skalierung zu erleichtern. Innovations- und Erprobungsräume sollten daher als fester Bestandteil von Technologieentwicklungsprozessen verstanden werden und nicht erst am Ende der Entwicklungskette zum Einsatz kommen.

#### **Forschungsergebnisse aus ENSURE**

- Engpassmanagement & Flexibilitätskoordination
- Assistenz- & Schutzsysteme
- DVPP, Netzbremse, MVDC, SST

Die Forschungsergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben.

### **Engpassmanagement & Flexibilitätskoordination**

#### Engpassmanagement im Verteilnetz durch Flexibilitäten

In Verteilnetzen mit Engpässen, die aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten (wie steuerbare Lasten, Speicher, Energy Hub) vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und Dimmung von Lasten minimiert wird.

### **Assistenz- & Schutzsysteme**

#### Assistenzsysteme für eine autonome Betriebsführung

Hersteller von Leitsystemen für den Netzbetrieb sollten bei der Entwicklung und Implementierung von Assistenzsystemen die Entlastung des Operators maximieren und diese auch objektiv messen. Für einen effizienten Einsatz der Assistenzsysteme sollte die in ENSURE entwickelte Bewertungsmethodik eingesetzt werden.

#### Adaptivschutz mittels Protection-Toolchain

Die Protection-Toolchain ist ein zentraler Enabler für eine sichere, flexible und automatisierte Schutztechnik in zunehmend komplexen, erneuerbaren und digitalisierten Stromnetzen. Die Netzbetreiber sollten die Toolchain in Netzen einsetzen, die durch Komplexität, häufige Änderungen (z.B. durch erneuerbare Energien) und einen hohen Digitalisierungsgrad geprägt sind. Voraussetzung für den Einsatz ist eine hohe, aktuelle und digital verfügbare Datenbasis (Netz- und Schutzdaten). Vor dem Rollout empfiehlt sich eine Pilotphase in ausgewählten Netzabschnitten, um Prozesse, Schnittstellen und die Qualität der automatisierten Schutzkonzepte zu validieren.

### **DVPP, Netzbremse, MVDC, SST**

#### Engpassmanagement im Verteilnetz durch Flexibilitäten

In Verteilnetzen mit Engpässen, die aufgrund guter Datenlage und vorhandener Netzmodellierung vorausschauend erkannt werden können, und in denen koordinierbare Flexibilitäten (wie steuerbare Lasten, Speicher, Energy Hub) vorhanden sind, sollte geprüft werden, ob das hier entwickelte System als integrierter Baustein der Netzführung eingesetzt werden kann. Bei Einsatz des Systems sollten die vorhandenen Flexibilitäten nach Möglichkeit so eingesetzt werden, dass die notwendige Abregelung erneuerbarer Einspeisung und Dimmung von Lasten minimiert wird.

#### Netzbremse – Systemdienstleistungen aus dem Verteilnetz

Die Bereitstellung von Flexibilität durch dezentrale Anlagen, die in den Verteilnetzen angeschlossen sind, ist eine wichtige Komponente in einem klimaneutralen Stromsystem. Betreiber von Verteilnetzen mit einem ausreichenden Umfang an steuerbaren Erzeugern, Verbrauchern und Speichern sowie einer guten Datenlage zu ihrem Netzzustand sollten prüfen, ob sie diese Anlagen zu Clustern bündeln und mit diesen einen aktiven Verteilnetzbetrieb realisieren können. Die Steuerung der Cluster kann zur Stabilisierung des

eigenen Verteilnetzes eingesetzt werden. In Koordination mit den Betreibern der vorgelagerten Netzebenen können die Cluster auch zur Vermeidung von Engpässen an der Schnittstelle der Netzebenen verwendet werden.

#### MVDC-Kollektornetz im netzbildenden Betrieb

Das Konzept der MVDC-Kollektornetze sollte weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu bieten sich Regionen mit hohen Anschlussraten erneuerbarer Energien und unzureichenden Kapazitäten im Verteilnetz an, in denen ein direkter Anschluss neuer EE-Anlagen an höhere Spannungsebenen vorteilhaft ist. Weiter zu untersuchen sind u.a. der angemessene Grad der Standardisierung des Konzepts, der den Planungs- und Realisierungsaufwand begrenzt und dennoch auf die konkreten Anwendungsfälle angepasst werden kann. Der Einsatz einer Vielzahl an netzbildenden Umrichtern im künftigen Netz erfordert zudem wirkungsvolle koordinierende Verfahren. Im Fall einer erfolgreichen Erprobung können MVDC-Kollektornetze ein wichtiger Baustein der weiteren Netzentwicklung in Regionen mit hohen EE-Zubauraten sein.

#### Solid-State Transformator (SST) und SST-basierte LVDC Microgrids

Der Einsatz von LVDC-Netzen sollte dann erwogen werden, wenn in räumlich begrenzten Verteilnetzen eine hohe Durchdringung mit erneuerbarer Stromerzeugung inkl. Speichern besteht und / oder verschiedene AC-basierte Infrastrukturen an das Stromnetz angeschlossen werden sollen. Weitere Anwendungsfälle sind Inselnetze, z.B. unter Einbindung von elektrifizierten Prozessen in der Industrie oder Quartierslösungen, die von einer DC-Infrastruktur profitieren würden. Die Technologieanbieter sollten die neuesten Entwicklungen in eine neue Generation von SST umsetzen und deren Anwendung in Verbindung mit LVDC-Netzen unterstützen. Hierbei muss insbesondere eine Kostenreduktion bei der DC-Technik erreicht werden. Die Verteilnetzbetreiber sollten geeignete Einsatzfälle identifizieren und die Wirtschaftlichkeit im Fall einer Verfügbarkeit kostengünstiger technischer Lösungen bewerten. Seitens der Regulierer sollten die regulatorischen Anreize für die Netzbetreiber angepasst werden (TCO-Regulierung).

### 3.2.6. Neue Geschäftsmodelle und industriepolitische Perspektive

Die Transformation des Energiesystems eröffnet neben technischen Innovationen auch neue Möglichkeiten für Wertschöpfung und Geschäftsmodelle. Insbesondere die zunehmende Digitalisierung, die stärkere Nutzung von Flexibilitäten sowie die Kopplung verschiedener Energieträger schaffen neue Markt- und Anwendungsfelder für Technologielieferanten, Netzbetreiber und Energiedienstleister.

Ein wesentliches Potenzial liegt in der Bündelung und koordinierten Nutzung dezentraler Anlagen. Durch die Aggregation von Speichern, erneuerbaren Erzeugungsanlagen und flexiblen Verbrauchern können neue Dienstleistungen zur Unterstützung des Netzbetriebs bereitgestellt werden. Gleichzeitig entstehen neue Anforderungen an Steuerungs-, Optimierungs- und Plattformlösungen, die eine koordinierte Nutzung dieser Flexibilitäten ermöglichen. Darüber hinaus zeigen Konzepte wie Energy Hubs, dass die Kombination von Erzeugung, Speicherung und sektorübergreifenden Energieanwendungen neue Formen der Energieversorgung und Systemintegration ermöglichen kann.

Auch im Bereich des Asset Managements eröffnen datenbasierte Ansätze neue Wertschöpfungsmöglichkeiten. Zustandsüberwachung, vorausschauende Instandhaltung und KI-gestützte Optimierungsverfahren schaffen die Grundlage für serviceorientierte Geschäftsmodelle, die über die reine Bereitstellung von Hardware hinausgehen. Gleichzeitig gewinnt die Entwicklung standardisierter und skalierbarer Lösungen an Bedeutung, um neue Technologien wirtschaftlich in größerem Umfang einsetzen zu können.

Aus industriepolitischer Sicht bieten insbesondere Leistungselektronik, Gleichstromtechnologien, intelligente Energiemanagementsysteme sowie Wasserstoff- und Speicherinfrastrukturen Potenzial für den Aufbau neuer Wertschöpfungsketten. Die frühzeitige Entwicklung entsprechender Kompetenzen, Produkte und Dienstleistungen kann dazu beitragen, technologische Führungspositionen aufzubauen und die Umsetzung eines klimaneutralen Energiesystems zu unterstützen. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Demonstrationsprojekte, Pilotanwendungen und Standardisierungsaktivitäten wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Markteinführung und Skalierung neuer Technologien darstellen.

### 3.2.7. Fazit Technologieentwicklung

Die Empfehlungen für die Technologieentwicklung verdeutlichen, dass zukünftige Lösungen vor allem systemfähig, digital integrierbar und standardisierungsfähig gestaltet werden sollten. Entscheidend ist dabei nicht die isolierte Weiterentwicklung einzelner Technologien, sondern die Entwicklung interoperabler Technologiebausteine, die Netzdienlichkeit, Flexibilität und Systemstabilität unterstützen und sich in bestehende Infrastrukturen, Betriebsprozesse und regulatorische Rahmenbedingungen integrieren lassen.

Gleichzeitig zeigt sich, dass die erfolgreiche Einführung neuer Technologien zunehmend von ihrer Einbettung in ein digitales, vernetztes und sektorübergreifendes Energiesystem abhängt. Digitale Fähigkeiten, offene Schnittstellen, standardisierte Kommunikationsmechanismen sowie praxisnahe Erprobungs- und Demonstrationsumgebungen werden damit zu zentralen Voraussetzungen für die Skalierung innovativer Lösungen.

Neben den technologischen Fortschritten eröffnen sich dadurch auch neue Möglichkeiten für Wertschöpfung und Geschäftsmodelle. Insbesondere in den Bereichen Flexibilitätsnutzung, Energiemanagement, intelligente Betriebsführung, Asset Management, Leistungselektronik, Speicher- und Wasserstoffinfrastrukturen entstehen neue Anwendungsfelder für Produkte und Dienstleistungen. Die frühzeitige Entwicklung entsprechender Kompetenzen, Technologien und Standards kann dazu beitragen, Innovationspotenziale schneller in die Anwendung zu überführen und die Transformation des Energiesystems nachhaltig zu unterstützen.

Für die weitere Entwicklung erscheint es daher wichtig, Technologieentwicklung, Standardisierung, regulatorische Weiterentwicklung und praktische Erprobung eng miteinander zu verzahnen. So können die Voraussetzungen geschaffen werden, um innovative Lösungen nicht nur technisch erfolgreich zu entwickeln, sondern auch wirtschaftlich tragfähig und in großem Maßstab einsetzbar zu machen.

## 3.3. Optionen und Empfehlungen für Gesellschaftliche Vertretungen

**Tl;dr:** Gesellschaftliche Vertretungen sollten die Energiewende durch transparente, verständliche und wissenschaftlich fundierte Kommunikation und Beteiligungsangebote begleiten und bei der Mitgestaltung unterstützen. (Handlungsempfehlung für Gesellschaft)

**Kurz:** Die Energiewende ist eine technische, politische und gesellschaftliche Gestaltungsaufgabe. Sie erfordert den Umbau von Energieversorgung, Netzen und Infrastruktur sowie die Abstimmung vieler Akteure auf kommunaler und regionaler Ebene. Die Forschung in ENSURE zeigt, dass erfolgreiche Energiewendeprozesse dort gelingen, wo Beteiligung, Koordination und Teilhabe zusammenkommen können. Dabei gibt es keine Lösungen, die sich auf alle Regionen und Kommunen übertragen lassen. Unterschiedliche Ausgangsbedingungen, Akteurskonstellationen und lokale Erfahrungen erfordern angepasste

Vorgehensweisen. Erfolgreiche Prozesse zeichnen sich durch transparente Planung, faire Beteiligungsmöglichkeiten, nachvollziehbare Entscheidungen und gemeinsame Vorstellungen einer zukünftigen Energieversorgung aus.

Eine zentrale Voraussetzung dafür ist Wissen über das Energiesystem. Bürgerinnen und Bürger benötigen verständliche und verlässliche Informationen und Dialogstrukturen, um die Auswirkungen energiebezogener Entscheidungen einschätzen und eigene Handlungsmöglichkeiten erkennen zu können. Verbände, Interessenvertretungen und zivilgesellschaftliche Organisationen können hierbei eine wichtige Brückenfunktion übernehmen. Sie tragen wissenschaftliche Erkenntnisse in die Gesellschaft, unterstützen Dialog und Beteiligung, vermitteln zwischen verschiedenen Akteursgruppen und fördern den Austausch von Erfahrungen. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag, um die Energiewende verständlich, nachvollziehbar und gemeinsam gestaltbar zu machen.

**Lang:**

## **Verbände und gesellschaftliche Organisationen als Brückenakteure der Energiewende**

Verbände, Interessenvertretungen und zivilgesellschaftliche Organisationen übernehmen bereits eine wichtige Rolle für das Gelingen der Energiewende. Sie bringen wissenschaftliche Erkenntnisse in gesellschaftliche Debatten ein, unterstützen die dialogische Vermittlung komplexer Zusammenhänge und moderieren den Austausch zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen. Damit tragen sie dazu bei, dass Bürgerinnen und Bürger, Unternehmen, Kommunen und weitere Beteiligte informierte Entscheidungen treffen und sich aktiv an der Gestaltung der Energiewende beteiligen können.

Die Arbeiten in ENSURE zeigen, dass die **Energiewende als Transformation des Energiesystems auch ein Aushandlungsprozess zwischen vielen unterschiedlichen Akteuren** ist. Kommunen, Energieunternehmen, Netzbetreiber, Politik, Verbände sowie Bürgerinnen und Bürger verfolgen teilweise unterschiedliche Interessen, verfügen über unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten und bringen unterschiedliche Vorstellungen über die Zukunft des Energiesystems ein. Erfolgreiche Energiewendeprozesse erfordern deshalb mehr als technische Lösungen. Sie benötigen Verfahren und Strukturen, die Zusammenarbeit, Abstimmung und Beteiligung ermöglichen. Dabei gibt es keine allgemeingültige Lösung für alle. Historisch gewachsene Energiestrukturen in Regionen, wirtschaftliche Rahmenbedingungen vor Ort, soziale Voraussetzungen und regionale Erfahrungen unterscheiden sich erheblich. Was in einer Region funktioniert, muss daher nicht zwangsläufig auf andere Regionen übertragbar sein. Energiewendeprojekte und Beteiligungsprozesse müssen an lokale und regionale Gegebenheiten angepasst werden.

Auch die ENSURE-Forschung macht deutlich, dass **erfolgreiche Transformationsprozesse** insbesondere von drei Faktoren abhängen. Erstens braucht es geeignete Beteiligungs- und Entscheidungsverfahren, die unterschiedliche Perspektiven einbeziehen und transparente Aushandlungsprozesse ermöglichen. Zweitens spielt die faire Verteilung von Lasten, Kosten und Vorteilen eine wichtige Rolle. Akzeptanz entsteht nicht allein durch Information, sondern auch dadurch, dass Menschen die Möglichkeit haben, an den Vorteilen der Energiewende teilzuhaben. Drittens benötigen Regionen gemeinsame Zukunftsbilder, die Orientierung schaffen und einzelne Maßnahmen in einen nachvollziehbaren Gesamtzusammenhang einordnen. Wenn deutlich wird, wie einzelne Projekte zu einer langfristigen regionalen Entwicklung beitragen, können sie besser verstanden und bewertet werden.

Für die praktische Umsetzung der Energiewende ist deshalb eine **enge Abstimmung zwischen den beteiligten Akteuren** erforderlich. Dies zeigt sich beispielsweise bei der kommunalen Wärmeplanung. Die Wärmeversorgung muss zunehmend mit der Strom-, Gas- und Wärmenetzplanung abgestimmt werden.

Gleichzeitig bedarf es einer Koordination zwischen benachbarten Kommunen, die auf gemeinsame Infrastrukturen angewiesen sind. Die Arbeiten in ENSURE weisen darauf hin, dass unzureichend abgestimmte Planungen erhebliche Herausforderungen verursachen können, etwa wenn Kommunen den Ausstieg aus fossilen Energieträgern vorbereiten, während Netzbetreiber weiterhin in bestehende Infrastrukturen investieren.

Eine wichtige **Voraussetzung für erfolgreiche Beteiligung und Mitgestaltung ist aktives Wissen über das Energiesystem**. Die Energiewende ist mit komplexen technischen, wirtschaftlichen und politischen Fragen verbunden. Gleichzeitig sollen Haushalte häufig weitreichende Entscheidungen treffen, beispielsweise zu Heizsystemen, Photovoltaikanlagen oder Elektromobilität. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass verständliche Informationen, nachvollziehbare Beispiele, transparente Kostenbetrachtungen und unabhängige Beratungsangebote wesentlich dazu beitragen können, die Entscheidungskompetenz zu stärken. Hier kommt Verbänden und gesellschaftlichen Organisationen eine besondere Bedeutung zu. Sie können wissenschaftliche Erkenntnisse verständlich aufbereiten, Fachsprache übersetzen, Orientierung bieten und Dialogräume schaffen. Verbraucherverbände, Sozialverbände, Mieterorganisationen, Umweltverbände und Energieberatungsorganisationen können dazu beitragen, niedrighschwellige Informations- und Beratungsangebote bereitzustellen und insbesondere Menschen ohne Vorerfahrungen bei energiebezogenen Entscheidungen zu unterstützen.

So können Verbände den **Transfer von Erfahrungen zwischen Regionen fördern**. Viele Kommunen und Organisationen stehen vor ähnlichen Herausforderungen, verfügen jedoch über unterschiedliche Erfahrungen und stehen vor einer Fülle an verfügbaren Lösungsansätzen. Der Austausch erfolgreicher Praxisbeispiele, die Bereitstellung von Leitfäden sowie die Unterstützung von Dialog- und Beteiligungsformaten können dazu beitragen, vorhandenes Wissen breiter nutzbar zu machen und lokale Akteure bei der Umsetzung zu unterstützen. Insgesamt verdeutlichen die Arbeiten in ENSURE, dass die Energiewende weder allein technisch noch allein politisch gestaltet werden kann. Sie ist ein gesellschaftlicher Transformationsprozess, der auf Wissen, Beteiligung, Koordination und Teilhabe angewiesen ist. Verbände, Interessenvertretungen und zivilgesellschaftliche Organisationen können dabei eine zentrale Brückenfunktion übernehmen, indem sie wissenschaftliche Erkenntnisse in gesellschaftliche Diskussionen übersetzen, regionale Dialoge unterstützen und die Mitgestaltung der Energiewende fördern.

### 3.4. Optionen und Empfehlungen für Regulierung

Der regulatorische Rahmen ist ein eigenständiger Hebel der Energiewende. Dieser ist mitentscheidend, ob Netznutzer und Netzbetreiber in Netzkapazität, gesicherte Leistung und Flexibilität investieren und wie sie diese Ressourcen einsetzen. Die folgenden Handlungsoptionen verdichten Ergebnisse aus zehn Jahren ENSURE-Forschung. Hauptadressatin ist die Bundesnetzagentur (BNetzA). Viele Optionen docken unmittelbar an ihre laufenden Verfahren an, insbesondere an den neu gefassten Rahmen der Anreizregulierung (NEST) sowie die Festlegung der allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes). Die hier aufgelisteten Handlungsoptionen beziehen sich, wenn nicht anders kommuniziert, auf den noch geltenden Regulierungsrahmen. Viele der dargestellten Verzerrungen und der skizzierten Handlungsoptionen werden bereits von den veröffentlichten Orientierungspunkten zu AgNes aufgegriffen. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung werden möglicherweise weitere Punkte durch das AgNes Verfahren sowie den NEST-Prozess überholt sein.

#### 3.4.1. Infrastrukturen integriert und robust planen

Strom-, Gas-, Wasserstoff- und Wärmeinfrastrukturen wachsen über Kopplungstechnologien wie Elektrolyseure, Gaskraftwerke und Wärmepumpen eng zusammen. Ein Elektrolyseur hängt zugleich am Strom- und am Wasserstoffnetz, seine Standortwahl verschiebt den Transportbedarf zwischen den Netzen. Die kostenminimale Lösung lässt sich deshalb nur über alle Netze hinweg bestimmen. Der physischen Kopplung steht eine

fragmentierte Steuerung gegenüber: Planung, Regulierung und Refinanzierung sind nach Sektoren, Netzbetreibern, Netzebenen, Verwaltungsebenen und Zeithorizonten getrennt organisiert. Weil Energieinfrastrukturen über Jahrzehnte wirken, führt unkoordinierte Planung über punktuelle Ineffizienzen hinaus zu langfristigen Fehlinvestitionen. Die Systementwicklungsstrategie richtet den Blick bereits sektorübergreifend auf die Energieinfrastrukturen, bleibt bislang aber ein grober Rahmen mit Richtliniencharakter.

Der internationale Vergleich mit den Niederlanden, Großbritannien und Österreich zeigt, dass eine integrierte Infrastrukturplanung praktikabel ist, und macht übertragbare Merkmale entlang von Prozess, Planungskultur und Umsetzung sichtbar. Dezentrale, marktbasierte Entscheidungen führen nur dann zum Systemoptimum, wenn ein konsistenter Rahmen sie einbettet, denn keinem einzelnen Akteur ist die Gesamtwirkung seiner Entscheidung zugeordnet. Wie stark Standortentscheidungen wirken, zeigen die ENSURE-Analysen zu Power-to-Gas: Anlagen in Regionen mit großem Stromüberschuss minimieren die Gesamtkosten des Energiesystems. Beim Wasserstoff unterschätzt eine deterministische Planung auf Basis einzelner Wetterjahre den tatsächlichen Flexibilitäts- und Speicherbedarf.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Die Systementwicklungsstrategie zu einer integrierten Infrastrukturplanung ausbauen.** Dazu gehören die regelmäßige Reflexion der betrachteten Energieträger, Infrastrukturbedarfe und Methoden sowie die schrittweise Integration der Planungsansätze der Netzbetreiber, etwa über gemeinsam entwickelte Szenarien.
- **Robust planen und Unsicherheit berücksichtigen.** Stochastische Modelle bestimmen die Kapazitäten künftiger Infrastruktur wetterrobust und machen Importrisiken sichtbar. Indifferenzpunkt-Analysen liefern den Maßstab für die ökonomische Abwägung zwischen Importkosten und Versorgungssicherheit. Der Ausbau großskaliger Wasserstoffspeicher verdient Priorität, weil er zugleich gegen Erzeugungsschwankungen und Importstörungen absichert. Diese Wasserstoffspeicher sollten dann auch netzdienlich betrieben werden können.
- **Systemdienliche Standorte für Power-to-Gas anreizen.** Die Positionierung erzeugungsnah in Regionen mit möglichst großem Stromüberschuss senkt den Infrastrukturbedarf über alle Netze hinweg.

Auch die Handlungsempfehlung Rechtsrahmen sowie Kapitel 3.1 im systemischen Gesamtbild widmen sich der integrierten Infrastrukturplanung. Die gesetzgeberische Seite des Themas behandelt Kapitel 3.5.1.

#### **3.4.2. Gasnetze bei strukturell sinkender Nachfrage neu regulieren**

Wie eng Planung und Regulierung zusammenhängen, zeigt sich deutlich auch bei den Gasnetzen. Die Umsetzung der Klimaziele senkt die Nachfrage nach fossilem Erdgas strukturell und dauerhaft, zugleich reichen die Abschreibungszeiträume vieler Gasnetze über das Jahr 2045 hinaus. Die kommunale Wärmeplanung entscheidet faktisch mit, welche Quartiere elektrifiziert oder an Wärmenetze angeschlossen werden, und damit über die künftige Gasnachfrage. Die bisherige lineare Abschreibung hält die Netzentgelte zunächst niedrig und lässt sie in der Spätphase der Netznutzung stark ansteigen. Damit droht eine sich selbst verstärkende Entgeltspirale („Death-Spiral“): Steigende Entgelte bewegen Haushalte zum vorzeitigen Heizungswechsel, die Fixkosten verteilen sich auf immer weniger verbleibende Kunden, der Abwanderungsdruck wächst weiter. Diese Dynamik gefährdet die Refinanzierung der Investitionen und belastet am Ende überproportional die Haushalte, die erst spät auf alternative Heizsysteme umsteigen können.

Die ENSURE-Modellierung der Entscheidungen von Haushalten, Netzbetreibern und Regulierung zeigt, dass degressive Erlösobergrenzen wohlfahrtsoptimal sind. Die Entgelte liegen anfangs höher, solange viele Haushalte im Netz verbleiben, und sinken anschließend schrittweise. Die frühe Refinanzierung reduziert Zinseszinsseffekte und damit die Gesamtkosten der Kapitalrückgewinnung. Sie mindert zudem die Gefahr einer abrupten Netzflucht und senkt die sozialen Kosten nicht abgeschriebener Investitionen.

#### ENSURE-Handlungsoptionen:

- **Degressive Erlösobergrenzen als Standardinstrument für Gasnetze mit dauerhaft sinkender Nachfrage einführen.** Die bestehenden Ansätze der BNetzA zur Ermöglichung degressiver Abschreibungen sollten auf alle relevanten Bestandteile der Gasnetzinfrastruktur ausgeweitet werden.
- **Die Einführung auf belastbare Nachfrageprognosen stützen.** Netzbetreiber und BNetzA prüfen vorab die Nachfrageentwicklung über die verbleibenden Abschreibungszeiträume und das Risiko verllorener Investitionen im Einzelfall.
- **Einen rechtssicheren Rahmen für Stilllegung, Umwidmung und Rückbau von Gasnetzen schaffen.** Dieser baut Fehlanreize für den Verbleib in fossilen Strukturen ab und gibt Planungssicherheit für Netzbetreiber und Kunden. Durch einen rechtssicheren Rahmen wird darüber hinaus das Risiko von unwirtschaftlichen Netzen mit sehr wenigen verbleibenden Anschlüssen (z.B. Mietwohnungen) und damit sehr hohen Netzentgelten reduziert. Diese Handlungsoption ist bereits im Regulierungsrahmen RAMEN Gas vorgesehen, aber noch nicht gesetzlich umgesetzt.

So findet die Regulierung die Balance zwischen einer angemessenen Kostenrückgewinnung für Investoren und der Belastung der verbleibenden Haushalte, und sie beschleunigt den Übergang zu einer dekarbonisierten Wärmeversorgung sozialverträglich.

#### 3.4.3. Netzentgelte auf netzdienliche Flexibilität ausrichten

Wer heute seine Netzentgelte minimiert, handelt nicht zwangsläufig netzdienlich. Sinnbild ist das Bandlastprivileg nach § 19 Abs. 2 Satz 2 und 3 StromNEV: Es entlohnt einen möglichst konstanten industriellen Verbrauch. Die Flexibilisierung industrieller Lasten bestraft es damit, und es verlagert Kosten auf die übrigen Netznutzer. Die ENSURE-Analysen zum Einsatz von Batteriespeichern in Industriebetrieben unter § 19 StromNEV belegen diese Fehlsteuerung anhand von Lastprofilen, Spitzenlasten und Entgeltzahlungen. Sie zeigen zugleich die Grenze einer rein marktlichen Korrektur: Hängen Flexibilitätsanreize allein an Marktsignalen, entstehen neue, gleichzeitige Lastspitzen, die Netzengpässe verstärken. Der Anreiz muss engpass- und netzorientiert sein.

#### ENSURE-Handlungsoptionen:

- **Das Bandlastprivileg durch ein flexibilitätsorientiertes Sondernetzentgelt ablösen.** Unternehmen erhalten Entgeltrabatte für graduell ansteigende prozentuale Verbrauchsanpassungen in Hoch- und Niedriglastfenstern, die die Netzbetreiber ausweisen.
- **Das Rabattvolumen begrenzen.** Ein Schwellenwert für die Jahresarbeit als Zugangsvoraussetzung und Bemessung der Rabatte anhand tatsächlich bewirkter netzkostenrelevanter Entlastungen halten den Aufschlag für besondere Netznutzung klein, der die Rabatte finanziert.
- **Das künftige Grundmodell der Netzentgelte auf Kapazitäts- und dynamische Arbeitspreise stellen.** Eine ortsbezogene, engpassorientierte dynamische Arbeitskomponente sollte auch für die stromintensive Industrie gelten, wie es die Orientierungspunkte der BNetzA im AgNes-Verfahren vorsehen.<sup>5</sup>

#### 3.4.4. Teilhabemodelle wie Energy Sharing skalierbar und netzdienlich machen

Die Entgeltsystematik entscheidet auch darüber, ob neue Nutzungsmodelle im Verteilnetz tragen. Mit § 42c EnWG hat der Gesetzgeber im November 2025 die Grundlage für Energy Sharing geschaffen, also für die gemeinsame Erzeugung, Speicherung und Nutzung erneuerbaren Stroms über das öffentliche Netz. Energy

---

<sup>5</sup>BNetzA, Industrienetzentgelte: Orientierungspunkte der BNetzA (AgNes, GBK-25-01-1#3), 22.04.2026, URL: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1\\_GZ/GBK-GZ/2025/GBK-25-01-1x3\\_AgNes/Downloads/Orientierungspunkte\\_Industr\\_NetzE.pdf](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2025/GBK-25-01-1x3_AgNes/Downloads/Orientierungspunkte_Industr_NetzE.pdf)

Sharing kann Mieterinnen und Mietern sowie einkommensärmeren Haushalten die Teilhabe an der Energiewende ermöglichen, den Zubau erneuerbarer Energien fördern und die Stromnetze entlasten. Die ENSURE-Analysen zeigen aber: Die Skalierung hängt an der Vereinfachung, Standardisierung und Digitalisierung der zugehörigen energiewirtschaftlichen Prozesse, übergangsweise zusätzlich an dezidierter Förderung. Netzdienlich wird Energy Sharing erst mit deutlichen Fortschritten bei der Digitalisierung der Verteilnetze und mit passenden Anreizsystemen. Für Prosumer kann es mittelfristig eine Alternative zur Einspeisevergütung und zur anderweitigen Direktvermarktung von Überschussstrom aus PV-Dachanlagen werden.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Geeignete Rahmenbedingungen schaffen**, innerhalb derer die Umsetzung von Teilhabemodellen wie Energy Sharing, Mieterstrom und gemeinschaftlicher Gebäudeversorgung durch Akteure vor Ort unter vertretbarem Aufwand und Kosten möglich wird.
- **Marktkommunikation standardisieren**. Kommunikationsformate, Schnittstellen und Fristen für den Datenaustausch zwischen etablierten Marktparteien und Energy-Sharing-Gemeinschaften schnellstmöglich festlegen, weitere Festlegungen zur Netzzugangsplattform nach § 20b EnWG zügig treffen und die Weiterentwicklung der Marktkommunikation im Festlegungsverfahren zum MaBiS-Hub dafür nutzen.
- **Verteilnetze für Energy Sharing fit machen**. Energy Sharing rechnet mit viertelstündlichen Messwerten und setzt Smart Meter bei den Teilnehmenden voraus. Die BNetzA sollte den Rollout beschleunigen, etwa über automatisierte Strafzahlungen bei Zielverfehlung sowie Netzleistungsfähigkeit und Servicequalität der Verteilnetzbetreiber in der Qualitätsregulierung monetarisieren.
- **Netzdienliche Umsetzung anreizen**. Im AgNES-Verfahren die flächendeckende Einführung zeitvariabler Netzentgelte beschließen, mit der Perspektive, diese schrittweise zu dynamisieren.

Viele der vorgestellten Handlungsoptionen hängen eng mit der Digitalisierung der Netze zusammen, ein Thema mit dem sich auch die Handlungsempfehlungen Zustandserfassung, Infrastruktur und Innovationen befassen.

#### **3.4.5. Anreizregulierung für Innovation, Digitalisierung und lange Anlagennutzung öffnen**

Die Anreizregulierung bestimmt, welche Lösungen sich für Netzbetreiber rechnen. Der noch bestehende Rahmen behandelt Kapital- und Betriebskosten regulatorisch ungleich. Physischer Netzausbau erscheint attraktiver als eine innovative, flexibilitätsbasierte Betriebsführung, die denselben Engpass mitunter kostengünstiger löst. Auch die längere Nutzung bestehender Anlagen und Investitionen in Digitalisierung zahlen sich regulatorisch kaum aus. Dabei zeigen die ENSURE-Lösungen zu Assistenzsystemen in der Betriebsführung, zum herstellerübergreifenden Asset-, Patch- und Konfigurationsmanagement sowie zur Optimierung von Ersatzteilbeschaffung und Abschaltplanungen, wie digitalisierte Betriebsführung Kosten senkt und Anlagen länger nutzbar hält (vgl. Kapitel 4 im systemischen Gesamtbild). Mit dem NEST-Prozess hat die BNetzA den Rahmen der Anreizregulierung bereits neu gefasst, sein Grundgedanke deckt sich mit der ENSURE-Empfehlung. Auf die konsequente Ausgestaltung kommt es nun an.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Den Blick der Regulierung von den Ausgaben auf die Ergebnisse lenken**. Vermiedener Netzausbau, abgeschlossene erneuerbare Leistung, aktivierte Flexibilität und der Digitalisierungsgrad der Netze sollten als Leistung in der Erlösobergrenze anerkannt werden (vgl. hierzu auch Handlungsempfehlung Flexibilitäten).
- **Ein Forschungsbudget prüfen**. Es deckt Aufwendungen für Forschung und Entwicklung, ohne dass unmittelbare Effizienzsteigerungen nachzuweisen sind, und setzt so Anreize für eigene, ergebnisoffene Entwicklungsarbeit der Netzbetreiber (vgl. Handlungsempfehlung Innovationen). Hierbei ist zu prüfen, ob zusätzliche Budgets notwendig sind oder ob Anreize geschaffen werden können, vorhandene Budgets für Forschung und Entwicklung zu verwenden.

- **Die längere Nutzung bestehender Anlagen belohnen.** Digitalisierte Instandhaltung und optimierte Abschaltplanungen verlängern die Lebensdauer der Betriebsmittel. Die Regulierung sollte diese Betriebsstrategie gegenüber der Ersatzinvestition mindestens gleichstellen.
- **Rahmenbedingungen für Interoperabilität schaffen.** Verbindliche Regelungen für offene Datenstandards und Cybersecurity-Anforderungen, die den Austausch zwischen Netzbetreibern, Industrie und Endverbrauchern erleichtern und gleichzeitig den sicheren Betrieb gewährleisten (vgl. Handlungsempfehlung Zustandserfassung).

### 3.5. Optionen und Empfehlungen für Politik

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) und der Gesetzgeber setzen den Rahmen, in dem Netzbetreiber, Regulierer und Kommunen die Energiewende umsetzen. Sie entscheiden z. B. über das Marktdesign für gesicherte Leistung, den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur, die Refinanzierung der Wärmenetze und die Architektur der Infrastrukturplanung. Zehn Jahre Forschung im Kopernikus-Projekt ENSURE zeigen, inwiefern der bestehende Rahmen die Transformation unterstützt und eröffnet konkrete Ansatzpunkte für eine zielgerichtete Weiterentwicklung. Daraus leiten sich Empfehlungen für wirksame politische Anpassungen ab.

#### 3.5.1. Energieinfrastrukturen integriert planen

Strom, Gas, Wasserstoff und Wärme wachsen zu einem System zusammen. Elektrolyseure verbinden Strom- und Wasserstoffnetze, Großwärmepumpen koppeln Strom- und Wärmenetze, wasserstofffähige Kraftwerke sichern die Stromversorgung. Die Infrastrukturplanung folgt dieser Kopplung bislang nur teilweise. Die Netzentwicklungspläne für Strom und Gas entstehen in getrennten Prozessen bei den jeweiligen Netzbetreibern, die Wärmeplanung liegt bei den Kommunen. Mit der Systementwicklungsstrategie hat der Bund einen übergreifenden Rahmen geschaffen, der den Einzelplanungen eine gemeinsame Orientierung geben soll. Planen die Sparten weiter getrennt, drohen überdimensionierte oder fehlende Infrastrukturen, und die wirtschaftlichen Interessen der planenden Netzbetreiber können die Ergebnisse verzerren. ENSURE hat bestehende Planungsansätze und die damit gesammelten Erfahrungen vergleichend ausgewertet und daraus Eigenschaften abgeleitet, mit denen sich die Systementwicklungsstrategie weiterentwickeln lässt.

#### ENSURE-Handlungsoptionen:

- **Die Systementwicklungsstrategie regelmäßig überprüfen.** Bildet diese alle relevanten Energieträger und deren Infrastrukturbedarfe ab und nutzt sie die aktuellen methodischen Ansätze?
- **Eine neutrale Koordinations- und Kontrollinstanz etablieren.** Eine unabhängige, wissenschaftlich begleitete Instanz prüft Planungsentwürfe und Regularien auf Konsistenz mit dem Gesamtsystem. Die Investitions- und Marktentscheidungen selbst bleiben dezentral.
- **Gasnetzregulierung und kommunale Wärmeplanung verzahnen.** Die Abstimmung setzt handlungsfähige Kommunen mit gesicherten personellen und fachlichen Kapazitäten voraus, etwa über spezialisierte Einheiten („Team Wärmewende“) Eine aktive Kommunikation nimmt die Bürgerinnen und Bürger bei der Umstellung mit (vgl. Handlungsempfehlungen Prozessgestaltung und Wissensbasis). Darüber hinaus sollten die entsprechenden Netzbetreiber verpflichtend an der Kommunalen Wärmeplanung beteiligt sein, um den Einfluss bestehender Infrastruktur im Planungsprozess mit zu berücksichtigen.

Eine integrierte Planung deckt Wechselwirkungen zwischen den Infrastrukturen auf, bevor Investitionen fließen. Sie senkt das Risiko von Fehl- und Doppelinvestitionen, erhöht die Flexibilität im Gesamtsystem und stärkt

das Vertrauen in die Planungsergebnisse. Die Handlungsempfehlung Rechtsrahmen adressiert auch die integrierten Infrastrukturplanung. Die regulatorische Seite dieses Themas behandelt Kapitel 3.4.1.

### 3.5.2. Versorgungssicherheit aus Speichern, Nachfrageflexibilität und Netzen

In einem von Wind- und Solarenergie geprägten Stromsystem werden die Verfügbarkeit gesicherter Leistung und die Bereitstellung von Flexibilität zu den entscheidenden Voraussetzungen für Versorgungssicherheit. Der Energy-only-Markt setzt derzeit keine ausreichenden Investitionsanreize für Leistung, die auch in der Dunkelflaute bereitsteht. Kapazitätsmechanismen sollen diese Lücke schließen. Offen ist, wie ein Kapazitätsmarkt die Klimaziele stützt und welche Technologien dieser bevorzugt anreizen soll. Wie können zudem bisher ungenutzte Flexibilitätsquellen aktiviert werden? Großbatterien treffen auf ein Marktdesign, das ihren Systemnutzen unvollständig abbildet. Flexibilitäten durch Elektrofahrzeuge scheitern an praktischen und regulatorischen Hürden.

Die ENSURE-Analysen zum Marktdesign zeigen, dass es derzeit keinen einzelnen Mechanismus gibt, der die Klimafreundlichkeit eines Kapazitätsmarktes zuverlässig sicherstellt. Es sollte jedoch eine Kombination verschiedener Technologien genutzt werden, um die verschiedenen Eigenschaften optimal zu nutzen. Vorrang sollten Speicher, flexible Stromnachfrage und der Netzausbau haben. Die Versorgungssicherheit wird durch steuerbare Kraftwerke mit klimafreundlichen Brennstoffen verlässlich ergänzt. Großbatteriespeicher können Preisspitzen und Engpässe im Stromsystem wirksam abmildern, wenn sie ausreichend dimensioniert sind. Zu kleine Speicher können Knappheitssituationen hingegen sogar verschärfen. Den größten Systemnutzen entfalten die Speicher, wenn das Marktdesign sie als kollektive Flexibilitätsressource einbindet und klar von privaten Speichern trennt.

#### ENSURE-Handlungsoptionen:

- **Kapazitätsmechanismen auf Speicher, Nachfrageflexibilität und Netzausbau ausrichten** und durch steuerbare Kraftwerke mit möglichst klimaverträglichen Brennstoffen ergänzen.
- **Großskalige Batteriespeicher in ein übergeordnetes Marktdesign integrieren**, sie als kollektive Flexibilitätsressource betreiben und klar von privaten Speichern trennen.
- **Die Randbedingungen für Vehicle-to-Grid schaffen.** Anreize für die Produktion bidirektional ladefähiger Elektrofahrzeuge setzen, eine flächendeckende Ladeinfrastruktur mit standortunabhängigen Nutzerkonten aufbauen, Fahrzeughalter gezielt über die Vorteile einer Teilnahme informieren und eine Doppelbelastung zwischengespeicherter Energie mit Stromnebenkosten vermeiden.
- **Industriepolitische Entlastungen aus den Netzentgelten herauslösen.** Weiterreichende Stromkostenentlastungen wirken als staatliche Beihilfen, geknüpft an eine grüne Konditionalität, systemeffizienter und verteilungsgerechter als versteckte Rabatte in der Entgeltsystematik.

Die Prioritätenfolge sichert die Versorgung zu geringen Systemkosten und hält den Kapazitätsmarkt mit den Klimazielen vereinbar. Speicher und Nachfrageflexibilität stehen schneller bereit als neue Kraftwerke und nutzen Investitionen, die Haushalte und Unternehmen ohnehin tätigen.

Wie Regulierung und Netzentgelte diese Flexibilität im Netz aktivieren, beschreibt Kapitel 3.4.3. Die Handlungsempfehlung Flexibilitäten widmet sich auch dem Thema der Nachfrageflexibilität.

### 3.5.3. Europäische Marktintegration: Wohlfahrtsgewinne politisch absichern

Die Energiewende endet nicht an der Grenze. Interkonnektoren gleichen Wetterlagen zwischen den Ländern aus, senken die Systemkosten und stärken die Versorgungssicherheit. Ihr Ausbau scheitert dennoch regelmäßig

am politischen Widerstand, weil die Gewinne ungleich verteilt sind. Steigen nach dem Netzausbau die Preise im Exportland, verlieren dessen Konsumenten, obwohl die Wohlfahrt insgesamt wächst. Innerhalb Deutschlands steht zugleich die Entscheidung über den Zuschnitt der Gebotszone an, verbunden mit der Sorge, dass kleinere Zonen einzelnen Anbietern lokale Marktmacht verschaffen.

ENSURE hat Politikinstrumente untersucht, die aus solchen Win-Lose-Situationen Pareto-Verbesserungen machen, also Wohlfahrt und Konsumentenrente in mindestens einem Land erhöhen, ohne sie im anderen zu senken. Drei Hebel wirken zusammen. Asymmetrisches Cost- und Benefit-Sharing verteilt Investitionskosten und Engpasserlöse gezielt ungleich und schützt so die Konsumenten der Exportländer vor Preissteigerungen. Die Umverteilung staatlicher Produzentengewinne, etwa bei Unternehmen wie Vattenfall, ergänzt die Kostenteilung. Die Vorab-Optimierung der Marktkonfiguration, etwa des Gebotszonenzuschnitts, dämpft Preisdifferenzen so weit, dass Projekte ohne zusätzliche Transferzahlungen politisch tragfähig werden. Zur deutschen Gebotszonendebatte zeigt die Wettbewerbsanalyse: Eine Teilung in drei oder mehr Zonen eröffnet theoretisch Spielräume für lokale Marktmacht, die enge Vernetzung der Zonen hält dieses Potenzial jedoch verhältnismäßig klein. Eine fundierte Entscheidung über die optimale Zonenzahl verlangt den Vergleich mit den zu erwartenden Einsparungen bei den Redispatchkosten.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Die asymmetrische Aufteilung von Kosten und Engpasserlösen als Standardinstrument nutzen.** Die bestehenden Leitlinien zur Cross-Border Cost Allocation (CBCA) erlauben diese bereits.
- **Staatliche Produzentenrenten zur Kompensation einsetzen.** Länder mit hohem staatlichem Anteil an der Energieerzeugung sollten zusätzliche Produzentenrenten gezielt an die belasteten Endverbraucher zurückgeben.
- **Gebotszonenzuschnitte priorisiert prüfen.** Ein Split der deutschen Gebotszone schärft die räumlichen Preissignale, der strukturelle Umverteilungsbedarf sinkt.
- **Kosten-Nutzen-Analysen um Verteilungsanalysen erweitern.** Bewertungen von Interkonnektorprojekten sollten Verteilungswirkungen und redistributive Politikoptionen standardmäßig ausweisen.
- **Die Beschaffung gesicherter Leistung grenzüberschreitend abstimmen.** Eine koordinierte Kapazitätsbeschaffung hebt europäische Wohlfahrtsgewinne nur, wenn die Konsumentenverluste einzelner Länder ausgeglichen werden und nationale Interessen effiziente Lösungen nicht blockieren. Wer Verteilungskonflikte im Voraus entschärft, beschleunigt den grenzüberschreitenden Netzausbau und hebt Wohlfahrtsgewinne, die sonst blockiert blieben. Das senkt die Kosten der Energiewende für alle Beteiligten und macht die Versorgung wetterunabhängiger.

#### **3.5.4. Wasserstoffwirtschaft robust und europäisch aufbauen**

Wasserstoff trägt im klimaneutralen Energiesystem zur saisonalen Speicherung von Energie und zur Stabilisierung des Systems bei. Regelbare Power-to-Gas-Anlagen und steuerbare Wasserstoffkraftwerke tragen aktiv zur Frequenz- und Spannungshaltung bei und wirken Netzengpässe entgegen. Mit dem Wasserstoffkernnetz wurde die erste Ausbaustufe der Infrastruktur beschlossen und ist in der Umsetzung. Der künftige Markt bleibt jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Markterfahrung fehlt, Kosten und Nachfrage streuen stark und Importe könnten sich auf wenige Lieferanten konzentrieren. Wetterabhängige Erzeugung im In- und Ausland erschwert die Dimensionierung der Infrastruktur und deterministische Planungsmodelle bilden solche Schwankungen unzureichend ab.

Die ENSURE-Analysen zum entstehenden Wasserstoffmarkt zeigen: Der Bezug grünen Wasserstoffs sollte sich auf inländische Erzeugung und pipelinebasierte Importe aus der EU und den Anrainerstaaten konzentrieren. Schiffsimporte aus Übersee sind nicht wettbewerbsfähig und angesichts des ausreichenden, kostengünstigen

Potenzials erneuerbarer Energien in Europa auch nicht notwendig. Stochastische Modelle bestimmen die notwendigen Kapazitäten wetterrobust. Indifferenzpunkt-Analysen liefern den ökonomischen Maßstab für die Abwägung zwischen Importkosten und Versorgungssicherheit. Großskalige Wasserstoffspeicher sichern gegen wetterbedingte Erzeugungsschwankungen und Importstörungen ab. Ein wesentlicher Teil der bestehenden Erdgasinfrastruktur lässt sich für Wasserstoff umwidmen. Das senkt die Investitionskosten erheblich und beschleunigt den Aufbau.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Das Wasserstoffkernnetz wie geplant realisieren.** Bei der Detailauslegung die absehbare Fahrweise von Wasserstoffkraftwerken und Elektrolyseuren umfassend analysieren und die optimale Einbindung von Wasserstoffspeichern von Beginn an berücksichtigen.
- **Den Ausbau großskaliger Wasserstoffspeicher priorisieren** und den Speichern bei Netzengpässen über die Steuerung durch die Bilanzkreisverantwortlichen netzdienliche Aufgaben übertragen.
- **Wasserstofffähige Gaskraftwerke als strategische Reserve** für die Versorgungssicherheit ermöglichen bzw. ausschreiben und diese auf den Betrieb mit klimaneutralem Wasserstoff ausrichten.
- **Die Importstrategie auf die EU und die Anrainerstaaten ausrichten.** Pipelineimporte und inländische Erzeugung bilden das Rückgrat der Versorgung.
- **Infrastrukturkapazitäten wetterrobust dimensionieren.** Stochastische Modelle ersetzen deterministische Rechnungen, Indifferenzpunkt-Analysen dienen als Maßstab für das Verhältnis von Importkosten und Versorgungssicherheit.

Das Kapitel 3.1 des systemischen Gesamtbilds widmet sich auch dem Thema Wasserstoff.

Diese Strategie macht den Hochlauf robust gegen Importstörungen und Wetterrisiken, hält die Kosten niedrig und nutzt vorhandene Infrastruktur weiter. Investoren in Speicher, Elektrolyseure und Kraftwerke erhalten einen klaren Rahmen, Deutschland eine realistische, europäisch verankerte Bezugsstrategie.

#### **3.5.5. Wärmewende: Refinanzierung sichern, Kommunen stärken**

Das Wärmeplanungsgesetz schreibt die vollständige Dekarbonisierung der Wärmenetze bis 2045 vor. Mit der kommunalen Wärmeplanung legen die Kommunen das Fundament für mögliche neue Wärmenetze.

In dicht bebauten Quartieren sind Wärmenetzen oft eine naheliegende Option und mit Wärmepumpen, Power-to-Heat-Anlagen und Wärmespeichern ausgestattete Netze bieten zugleich Flexibilität für das Stromsystem, ergänzt um gasbetriebene Spitzenlastkessel. Wärmenetzbetreiber agieren jedoch in einem quasi-monopolistischen Umfeld mit langfristig gebundenen Kunden. Die Preisbildung in laufenden Verträgen regelt § 24 AVB-FernwärmeV über kostenorientierte Preisänderungsklauseln. Der Rechtsrahmen passt allerdings nicht zur anstehenden Investitionswelle. Die Preisänderungsklauseln bilden Schwankungen fossiler Brennstoffkosten ab; die massiven Investitionen in Geothermie oder Großwärmepumpen können sie in laufenden Verträgen kaum abbilden. Unternehmen weichen deswegen auf risikoreiche Änderungskündigungen aus, was wiederum die Investitionsbereitschaft der Betreiber negativ beeinflussen kann. Heterogene Klauseln und unpassende Marktindizes machen die Preise für Haushalte schwer nachvollziehbar. Den Kommunen droht zugleich der Verlust ihrer finanziellen Handlungsfähigkeit, auch weil Einnahmen aus dem Gasgeschäft der Stadtwerke wegfallen. Kalte Nahwärmenetze, die häufig ehrenamtlich oder genossenschaftlich entstehen, treffen auf ungeklärte rechtliche und organisatorische Bedingungen.

ENSURE hat über 100 Preisänderungsklauseln empirisch ausgewertet. Die Analyse belegt eine enorme Heterogenität der Berechnungslogiken, teils intransparente Basispreise und ein strukturelles Ungleichgewicht zwischen der Kostenstruktur erneuerbarer Wärme und der vertraglichen Preisfortschreibung. Der europäische

Vergleich lehrt, dass starre Preisobergrenzen Preisschocks verstärken, wie früher in den Niederlanden, während Transparenz und institutionalisierter Dialog die Akzeptanz für notwendige Anpassungen erhöhen, wie in Schweden. Für die Transformation der Netze steht ein Kapitalbedarf von rund 14,5 Mrd. € im Raum. Zur kalten Nahwärme zeigt die rechtliche Einordnung: Ausnahmeregelungen wie eine pauschale Abrechnung ohne Wärmemessung sind europarechtlich problematisch und können das Verhältnis von Versorgern und Kunden belasten. Übergeordnete Strukturen und spezialisierte Dienstleister sind besser geeignet, um kleine Netze zu entlasten, weil sie Expertise bereitstellen und administrative, rechtliche und finanzielle Aufgaben übernehmen. Für die kommunale Wärmeplanung gilt, dass Kommunen ohne gesicherte Finanzierung ihre Pläne nicht umsetzen können.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **§ 24 AVBFernwärmeV novellieren.** Preisänderungsklauseln müssen die investitionsbasierten Kosten der Dekarbonisierung präzise abbilden können, ohne die Verbraucher unverhältnismäßig zu belasten. Das verankert die Refinanzierung der Transformation rechtssicher im ordnungsrechtlichen Rahmen.
- **Transparenz zur Pflicht machen.** Versorger legen die Kosten- und Indexstruktur offen, mit Basispreis, Gewichtung und Indexwahl. Der Ordnungsgeber prüft fortlaufend, ob das Marktelement der Preisformeln zu einem dekarbonisierten Wärmemarkt passt. Das ermöglicht Vergleichbarkeit und Benchmarking.
- **Die finanzielle Handlungsfähigkeit der Kommunen sichern,** einschließlich tragfähiger Lösungen für wegfallende Einnahmen aus dem Gasgeschäft der Stadtwerke.
- **Auf rechtliche Ausnahmeregelungen für die kalte Nahwärme verzichten** und übergeordnete Strukturen sowie Dienstleister stärken, die ehrenamtliche und genossenschaftliche Projekte bei Gründung, Förderfragen, Regulatorik und Administration unterstützen.

Die Empfehlung stellt die Balance zwischen Investitionssicherheit für Netzbetreiber und wirksamem Verbraucherschutz her. Eine konsistente Kostenweitergabe erlaubt erst die realistische ökonomische Bewertung von Wärmenetzen im Vergleich zu dezentralen Technologien und verhindert, dass die Dekarbonisierung am fehlenden Refinanzierungsweg für rund 14,5 Mrd. € scheitert. Transparenz über die Preisbildung baut Informationsasymmetrien ab, beugt unberechtigten Preissteigerungen durch Indexkopplungen vor und stärkt das Vertrauen der Kunden - die Grundvoraussetzung für das Gelingen der Wärmewende.

Das regulatorische Gegenstück für die Gasnetze, degressive und wohlfahrtsoptimale Erlösbergrenzen, beschreibt Kapitel 3.4.2.

#### **3.5.6. Energy Sharing skalierbar und netzdienlich machen**

Mit § 42c EnWG hat der Gesetzgeber im November 2025 die Grundlage für Energy Sharing geschaffen, also für die gemeinsame Erzeugung, Speicherung und Nutzung erneuerbaren Stroms über das öffentliche Netz. Energy Sharing kann Mieterinnen und Mietern sowie einkommensärmeren Haushalten die Teilhabe an der Energiewende öffnen, den Zubau erneuerbarer Energien fördern und die Stromnetze entlasten. Die ENSURE-Analysen zeigen aber: Die Skalierung hängt an der Vereinfachung, Standardisierung und Digitalisierung der zugehörigen energiewirtschaftlichen Prozesse, übergangsweise zusätzlich an dezidiert Förderung. Netzdienlich wird Energy Sharing erst mit deutlichen Fortschritten bei der Digitalisierung der Verteilnetze und mit passenden Anreizsystemen. Für Prosumer kann es mittelfristig eine Alternative zur Einspeisevergütung und zur anderweitigen Direktvermarktung von Überschussstrom aus PV-Dachanlagen werden.

#### **ENSURE-Handlungsoptionen:**

- **Verteilnetze für Energy Sharing fit machen.** Energy Sharing rechnet mit viertelstündlichen Messwerten und setzt Smart Meter bei den Teilnehmenden voraus.
- Das BMWF sollte den Smart Meter Rollout beschleunigen, etwa über Prüfung eines Smart Meter Light für reine Verbraucherinnen und Verbraucher.
- **Netzdienliche Umsetzung anreizen.** Im AgNES-Verfahren die flächendeckende Einführung zeitvariabler Netzentgelte beschließen, mit der Perspektive, sie schrittweise zu dynamisieren. Die anfängliche Begrenzung auf einzelne Bilanzierungsgebiete stärkt die Netzdienlichkeit. Die Pflicht zur Ausweitung auf ein angrenzendes Bilanzierungsgebiet ab Juni 2028 (§ 42c Abs. 4 EnWG) wirkt dagegen übereilt und schafft regulatorische Unsicherheit (Gesetzgeber).
- **Wirtschaftlichkeit übergangsweise sichern.** Die bestehende EEG-Förderung für Überschussstrom aus Energy-Sharing-Anlagen bewahren, die Direktvermarktung von Strommengen aus kleinen Erzeugungsanlagen vereinfachen und die Stromsteuerreduktion nach § 9 StromStG für lokal direktvermarktete Strommengen in der Umsetzung berücksichtigen.
- **Information und Beratung bündeln.** Eine zentrale Beratungsstelle unterstützt die Umsetzung mit Handreichungen, Best-Practice-Beispielen und Musterverträgen, in Kooperation mit regionalen und kommunalen Beratungsstellen. Das Vorbild liefert die österreichische Koordinierungsstelle für Energiegemeinschaften

Die Handlungsempfehlung Energiewende-Visionen zielt auf dieses Instrument sowie weitere Teilhabemodelle. Damit die Privatpersonen auch fundierte Entscheidungen bezüglich möglicher Mitwirkung an den Teilhabemodellen sowie bei Anschaffungen, die das Energiesystem beeinflussen (Wärmepumpe, PV-Anlagen, ...), treffen können, zeigt die Handlungsempfehlung Wissensbasis Optionen auf, die die Politik adressieren sollte.