

Forschungsbericht 2026-1

ReStEP

**Regionale Strategische Energieplanung
Abschlussbericht des DLR**

Jan Buschmann und Karl-Kiên Cao

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Vernetzte Energiesysteme
Oldenburg & Stuttgart

Forschungsbericht 2026-1

ReStEP

**Regionale Strategische Energieplanung
Abschlussbericht des DLR**

Jan Buschmann und Karl-Kiên Cao

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Vernetzte Energiesysteme
Oldenburg & Stuttgart

22 Seiten
7 Bilder
3 Tabellen
22 Literaturstellen



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2026-1
Erscheinungsjahr 2026

DOI: 10.57676/z456-w702

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons „Namensnennung – Nicht-kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International“ Lizenz.



Energiesystemanalyse, Szenarien, Optimierung

Jan Buschmann and Karl-Kiên Cao

DLR, Institut für Vernetzte Energiesysteme, Oldenburg & Stuttgart

Regionale Strategische Energieplanung:

Modellbasierte Szenarienanalyse

Abschlussbericht des DLR

In diesem Projekt wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein hochaufgelöstes, sektorengkoppeltes Energiesystemmodell, REMix-Wesermarsch, entwickelt, das die Gemeinden des Landkreises Wesermarsch und das umgebende Stromsystem Niedersachsens zur Durchführung von Szenarioanalysen integriert. Auf Basis von fünf Szenarien — einem Basisszenario und vier weiteren Energieszenarien – mit unterschiedlichen CO₂-Preisen sowie unterschiedlichen Möglichkeiten zur Realisierung einer Wasserstoffproduktion werden Energieangebot und -nachfrage in stündlicher Auflösung optimiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei gleichzeitig unbegrenzter Ausbaumöglichkeit für Batteriespeicher und Gaskraftwerke Photovoltaikanlagen nicht bis zur ermittelten Potentialobergrenze im Landkreis Wesermarsch ausgebaut werden. Die Umsetzung eines zentralen bzw. dezentralen Elektrolysekonzepts wirkt sich unterschiedlich auf die Wärmeversorgung und die Stromproduktion aus Erdgas aus: die Abwärmenutzung der dezentralen Elektrolyse führt zu einem höheren Gasverbrauch, da die unflexible Wärmenachfrage im entsprechenden Szenario auf die Abwärme der Elektrolyseure angewiesen ist, während eine zentrale Wasserstoffproduktion für Mobilitätsanwendungen zusätzliche Stromimporte bewirkt. Darüber hinaus wird die Machbarkeit einer vollständig CO₂-freien Stromversorgung aufgezeigt, was insbesondere durch die Berücksichtigung des niedersächsischen Stromversorgungssystems realisierbar ist. Die Ergebnisse verdeutlichen den Nutzen einer Gesamtsystemperspektive, um eine klimaneutrale Energieversorgung auf kommunaler Ebene zu realisieren.

energy system analysis, scenarios, optimization

Jan Buschmann and Karl-Kiên Cao

DLR, Institute of Networked Energy Systems, Oldenburg & Stuttgart

Regional Strategic Energy Planning:

Model-based Scenario Analyses

Final Report of DLR

In this project, the German Aerospace Center (DLR) has developed a highly resolved, sector-coupled energy system model, REMix-Wesermarsch, to support municipal-level energy planning in the Wesermarsch region, Lower Saxony. The model integrates existing renewable generation potentials, demand profiles for electricity and heat, and a simplified inter-regional transmission network, and is used to perform scenario analyses based on five reference cases: a basic climate-protection scenario and four additional energy scenarios that differ in CO₂-pricing and in the realization of a hydrogen production for serving mobility demands. Two of these scenarios are developed for analyses on large-scale or distributed electrolyzers.

Results show that, while gas-fired power plants and battery storage can be freely expanded, the Wesermarsch region does not exploit its full photovoltaic potential, because there are more productive locations outside the region. Decentralized electrolysis units coupled to district-level heat demand result in increased natural gas power generation when heat recovery is mandated compared to one centralized electrolyzer. The model demonstrates the feasibility of a fully CO₂-free electricity supply by exploiting synergies with the interconnected Lower Saxony power system and reveals significant potentials for waste-heat utilisation and hydrogen production for freight transport. The study underlines the benefits of an overall system perspective for achieving climate neutrality at the regional level.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	6
2	Projektziele	7
3	Daten und Modelle	8
3.1	Energiedaten Landkreis Wesermarsch	8
3.2	Szenariodaten	8
3.2.1	Szenariogruppe H ₂	9
3.2.2	Szenariogruppe CO ₂	10
3.3	Modellparametrisierung	11
3.3.1	Die Modellierungssoftware REMix	11
3.3.2	Das Modell REMix-Wesermarsch	11
4	Ergebnisse	14
4.1	Stromerzeugungs- und Speicherkapazitäten	14
4.2	Strombilanz	14
4.3	Wärmesektor	15
4.4	Elektrolyse in Szenariogruppe H ₂	15
4.5	Einschränkungen und Einordnung der Ergebnisse	17
5	Zusammenfassung	19
6	Vertiefende Analysen und Veröffentlichungen	20

1 Hintergrund

Praktisch alle Regionen in Deutschland sind heute Erzeuger von regenerativem Strom. Es gibt Zeitpunkte, in denen eine Region zum Energieexporteur aber auch –importeur wird, insbesondere bei der konventionellen Gas- und Treibstoffversorgung. Die klimaneutrale Deckung des Energiebedarfs in den verschiedenen Sektoren wird in der Zukunft durch die Sektorenkopplung erleichtert, nicht nur zwischen Strom- und Gasversorgung, sondern auch unter Einbeziehung der Wärme- und Treibstoffversorgung [1]. Auf überregionaler Ebene bestehen bereits mehrere Arten von Szenariostudien, die als Orientierungshilfe für die Energieplanung dienen. Beispiele hierfür sind:

1. Bundesregierung – Studie im Auftrag der Bundesregierung [2]
2. Netzausbau – Analyse zum zukünftigen Ausbau der Strom- und Gasnetze [3]
3. Politikberatung – Handlungsempfehlungen für die Energie- und Klimapolitik [4]
4. Wissenschaftliche Forschung – Ergebnisse aus Forschungsprojekten [5]

Parallel dazu laufen auf kommunaler Ebene Planungsprozesse, die die konkrete Umsetzung der zukünftigen Energieversorgung sicherstellen. Ein zentrales Instrument ist die Kommunale Wärmeplanung (KWP). Dabei muss bereits heute nachvollzogen werden, wie die verschiedenen Energiesektoren (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie) miteinander verknüpft sind und welche Wechselwirkungen künftig zu erwarten sind.

Allerdings werden künftige Entwicklungen wie etwa die Veränderung von Energieflüssen in den Netzen oder der vermehrte Einsatz von Energiespeichern, um lokal erneuerbare Energien zu nutzen, selten in die Planungen miteinbezogen [6]. An dieser Stelle setzen die modellbasierten Szenarioanalysen von ReStEP an.

2 Projektziele

Hauptziel der Arbeiten des DLR im Projekt ReStEP ist die Bewertung möglicher Energiezukünfte am Fallbeispiel der Region Wesermarsch in Niedersachsen unter Einbezug wesentlicher Sektoren wie Strom, Wärme und Mobilität. Folgende Teilprojektziele sind damit verbunden:

1. Ermittlung der Potentiale für eine sektorengekoppelte, klimaneutrale Energieversorgung im Landkreis Wesermarsch
2. Szenariobasierte Untersuchung der Wechselwirkung aus regionalen und überregionalen Gesamtsystem- und Energieversorgungsstrategien
3. Analyse unterschiedlicher Versorgungskonzepte zur Wärmeversorgung unter Berücksichtigung der Gesamtsystemstrategie

Der Landkreis Wesermarsch verfügt über ein besonders hohes Potential für erneuerbare Stromerzeugung und über zahlreiche lokale bzw. nahegelegene Energieinfrastrukturen – darunter Offshore-Windparks, das LNG-Terminal Wilhelmshaven, das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf und das ehemalige Kernkraftwerk Unterweser. Damit ist er ein prototypisches Beispiel dafür, wie eine vorausschauende Energieplanung einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen der gesamten Energiewende leisten kann. Entscheidend ist dabei die Umsetzung lokaler Maßnahmen, welche die Wechselwirkungen mit dem überregionalen Versorgungssystem berücksichtigen.

Zur Erstellung entsprechender Zukunftsszenarien wird ein in der Energiesystemanalyse typischer Modellierungsansatz weiterentwickelt. Hierfür wird ein gemeindescharf aufgelöstes Energiesystemmodell der Beispielregion Wesermarsch neu aufgebaut und in ein Stromsystemmodell Deutschlands integriert.¹

¹Die Bedürfnisse lokaler Stakeholder haben während der Projektdurchführung einerseits durch die Einbeziehung eines assoziierten Industriepartners, der EWE Netz GmbH, sowie andererseits durch regelmäßigen Austausch des Projektpartners Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth mit Vertreterinnen und Vertretern des Landkreises und Landratsamts Wesermarsch Eingang in die Modellbildung gefunden (z. B. in Form der Ausgestaltung von Szenarioannahmen). Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse im Rahmen eines Workshops am 2. Juni 2025 in Elsfleth interessierten, lokalen Stakeholdern vorgestellt.

3 Daten und Modelle

Voraussetzung für die Durchführung von regionalen Szenarioanalysen für die Energieplanung ist die Erstellung eines Modells, welches sowohl Daten der aktuellen Energieversorgung als auch Szenariodaten verarbeitet. Die genutzten Datenquellen, das genutzte Modellierungsframework, REMix [7], und das damit entstandene Energiesystem-Optimierungsmodell werden im Folgenden vorgestellt. Als Untersuchungsbeispiel wird letzteres für den Landkreis Wesermarsch parametrisiert, weshalb es nachfolgend als *REMix-Wesermarsch* bezeichnet wird. Das entwickelte Energiesystemmodell basiert maßgeblich auf der Bachelorarbeit von Connor Fitzgerald (2024) [8], mit der er die konzeptionelle Grundlage für die vorliegende Implementierung legte.

3.1 Energiedaten Landkreis Wesermarsch

Für die modellbasierte Energiesystemplanung werden im Wesentlichen räumlich aufgelöste Daten zur Bilanzierung von Energieangebot und -nachfrage benötigt. In diesem Kontext werden die installierte Kapazität sowie der Einsatz der Technologien zur Energiebereitstellung und -speicherung optimiert, während räumlich aufgelöste Lastprofile der Nachfrage für unterschiedliche Energieträger vordefiniert werden. Gleichzeitig ist auf Angebotsseite die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien entscheidend. Die entsprechenden Zeitreihendaten basieren in der Regel auf historischen Wetterdaten. Die Datenquellen, welche zur Parametrisierung von *REMix-Wesermarsch* genutzt werden, zeigt Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Eingangsdaten für das REMix Modell der Wesermarsch und deren Quellen

Eingangsdaten	Quelle
Stromlastprofil	eGo ⁿ Data [9]
Wärmelastprofil	eGo ⁿ Data [9]
PV-Erzeugungsprofil	projektspezifische Potentialanalyse [10]
Wind-Erzeugungsprofil	projektspezifische Potentialanalyse [10]
Bestandskraftwerke	EnergieSynergie [11]
E-Mobilitätszeitreihen	venco.py [12]
Technoökonomische Daten	UNSEEN Projekt [13]
Endenergiebedarf PKW	EnergieSynergie [11]
Endenergiebedarf Zugmaschinen und LKW	EnergieSynergie [11]

Für die Modellierung des Energieversorgungssystems werden die einzelnen Komponenten als Technologien zur Energiewandlung und -speicherung für die Nachfragesektoren Strom, Wärme und Mobilität definiert. In Tabelle 3.2 sind diese Technologien aufgelistet.

3.2 Szenariodaten

Um die verschiedenen Ausgestaltungsoptionen des Energieversorgungssystems in der Wesermarsch zu verdeutlichen, wird eine Auswahl vordefinierter Szenarien untersucht. Ausgangspunkt für die Szenarioanalyse

Tabelle 3.2: Abgebildete Sektoren, Versorgungs- und Speichertechnologien im REMix-Modell der Wesermarsch

Sektor	Technologie	Speicher
Strom	Wind Onshore	Druckluftspeicher
	Photovoltaik	Vehicle2Grid-E-PKW
	Biomasse	Lithium-Ion-Batterien
	Gaskraftwerk	
Wärme	Stromimport	
	Gas Boiler	
	Wärmepumpe	
Wasserstoff	Elektrolyseur	
Mobilität	E-PKW	

ist das sogenannte Basisszenario *Klimaschutz*, welches sich an den Vorgaben des Klimaschutzkonzepts für den Landkreis Wesermarsch [14], Stand Frühjahr 2025, orientiert. In diesem Szenario ist der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten im Landkreis bereits fest (modellexogen) vorgegeben, während der Flexibilitätsbedarf beispielsweise durch Batteriespeicher in allen Szenarien optimiert wird. Für die Berechnung der Erzeugungszeitreihen von Wind- und Photovoltaikanlagen dient das Wetterjahr 2012.

Auf dieser Grundlage werden die Annahmen bzw. Treiber der einzelnen Szenarien variiert. Die Varianten begründen sich einerseits auf dem Interesse des assoziierten Industriepartners in Hinblick auf Szenarioanalysen zu Standorten von Elektrolyseuren in der Wesermarsch (Szenariogruppe H_2). Andererseits wird wissenschaftlich motiviert die Sensitivität der Ergebnisse der Ausbauplanung in Bezug auf den Dekarbonisierungsgrad untersucht (Szenariogruppe CO_2). Die Szenariovariationen beziehen sich daher auf verschiedene Ausbaumaßnahmen für lokale Elektrolyseurkapazitäten (z. B. Umfang, Standort, Technologie) und auf unterschiedliche Ziele hinsichtlich einer Emissionsreduktion (z. B. Verdopplung der angenommenen Preise für Emissionszertifikate oder ein Netto-Null-Szenario bis 2045). Die konkreten Szenarien sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

3.2.1 Szenariogruppe H_2

Die Szenarien *Elektrolyse* und *E-Abwärme* bauen grundsätzlich auf dem Basisszenario *Klimaschutz* auf, ergänzen jedoch jeweils eine Jahresnachfrage nach Wasserstoff, die theoretisch ausreichen würde, um den gesamten Kraftstoffbedarf der LKW- und Zugmaschinen im Landkreis (Datenbasis 2019) zu decken. Die Kapazität zur Wasserstoffherzeugung kann im Modell endogen ausgebaut werden. Dabei stehen zwei Standortoptionen zur Verfügung. Zum einen der Bau und Betrieb eines Groß-Elektrolyseur in der Nähe des Kraftwerks Huntorf (Gemeinde Elsfleth) und dezentrale Elektrolyseure im Rahmen des Szenarios *E-Abwärme* in den Gemeinden Elsfleth, Brake, Nordenham und Lemwerder. Diese Kommunen besitzen eine ausreichende Einwohnerdichte (und damit ein entsprechendes Wärmebedarfspotential), sodass der Aufbau eines lokalen Wärmenetzes technisch und ökonomisch sinnvoll ist. Es wird vereinfacht angenommen, dass diese Wärmenetze von der Abwärme der Elektrolyse gespeist werden können. Hierfür wird angenommen, dass 30 % des eingesetzten Stroms für die Elektrolyse als nutzbare Abwärme verfügbar sind. Diese Annahme leitet sich aus einem typischen Effizienzbereich (60–80 %) von alkalischen Elektrolyseuren ab.¹

¹Da im Basisszenario *Klimaschutz* keine regionale Wasserstoffwirtschaft bzw. Elektrolyseure in der Wesermarsch vorgesehen sind, werden die zuvor beschriebenen Änderungen zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit ebendiesem in der anschließend beschriebenen Szenariogruppe CO_2 nicht übernommen.

	EE- Ausbau	Elek- trolyse	CO ₂ - Preis
Klimaschutz	fix	☒	130€/t
Elektrolyse	fix	zentral optimiert	130€/t
E-Abwärme	fix	dezentral optimiert	130€/t
CO ₂ price2x	optimiert	☒	260€/t
CO ₂ zero	optimiert	☒	☒

Abbildung 3.1: Übersicht über die fünf untersuchten Szenarien. *fix* steht dabei für bereits vorgegebenen Ausbau, bei *optimiert* wird die ausgebaute Kapazität dagegen vom Optimierer bestimmt. Der durchgestrichene Kreis steht für *nicht vorhanden*.

3.2.2 Szenariogruppe CO₂

Um der unsicheren Preisentwicklung für CO₂-Emissionen bzw. langfristigen Dekarbonisierung des Gesamtversorgungssystems Rechnung zu tragen, geht das Szenario *CO₂price2x* von einem CO₂-Preis von 260 €/t aus (Verdopplung im Vergleich zum Basisszenario mit 130 €/t²) und das Szenario *CO₂zero* betrachtet für den Landkreis Wesermarsch und Niedersachsen eine vollständige CO₂-Reduktion im Stromsektor. Um den zusätzlichen Bedarf an erneuerbarem Strom zu decken, können in diesen Szenarien die Erzeugungskapazitäten aus Wind- und Solarenergie bis zu den ermittelten Potentialgrenzen (siehe Tabelle 3.3) optimiert werden.

Tabelle 3.3: Ausbaupotentiale für Stromerzeugungskapazität aus Wind- und Solarenergie (berechnet nach [10])

Gemeinde	Solar in MW	Wind in MW
Butjadingen	340	140
Nordenham	240	110
Stadland	100	60
Jade	150	60
Ovelgoenne	300	120
Brake	100	40
Elsfleth	210	90
Berne	60	30
Lemwerder	180	80
Gesamt	1680	730

²Diese Annahme ist vergleichsweise konservativ und basiert auf Curcio (2025)[15], wo mit 100 €/t für das Jahr 2030 gerechnet wird.

3.3 Modellparametrisierung

3.3.1 Die Modellierungssoftware REMix

REMIX [7] ist eine quelloffene Modellierungssoftware³, die seit 2008 am DLR kontinuierlich weiterentwickelt wird, um so Energiesystem-Optimierungsmodelle für die Analyse von Energieszenarien für unterschiedliche Stakeholder zu erstellen, z. B. in der öffentlichen Verwaltung oder zur Analyse von Flexibilitätsbedarfen in der nationalen Energieversorgung [16] oder zur Ermittlung von Energiesystemtransformationspfaden [17]. Ein zentrales Ergebnis eines Energiesystem-Optimierungsmodells ist die stündliche Einsatzplanung und das Zusammenspiel verschiedener Technologien wie etwa Photovoltaikanlagen und Batteriespeicher zur Deckung eines vorgegebenen Energiebedarfs. Darüber hinaus lässt sich somit auch der optimale Technologiemix in Form von installierter Kraftwerks-, Speicher- und Netzübertragungskapazität für eine Reihe von Zukunftsannahmen bestimmen. Je nach Untersuchungsfall, wird REMix mit unterschiedlichen zeitlich und räumlich aufgelösten Datensätzen parametrisiert. Anwendungsbeispiele aus der jüngsten Vergangenheit umfassen ein breites Spektrum an Energiesystemen, die von Stromsystemmodellen des deutschen Übertragungsnetzes [18] über Multi-Energiesystemmodelle einzelner Länder [19] bis hin zu europäischen Verbundsystemmodellen unter Berücksichtigung einer Wasserstoffwirtschaft [20] reichen. Für das Energiesystem-Optimierungsmodell des Landkreises Wesermarsch wird REMix mit den oben beschriebenen Energie- und Szenariodaten parametrisiert. Das Ergebnis hiervon ist das Modell *REMIX-Wesermarsch*. Der schematische Aufbau des Modells ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

3.3.2 Das Modell REMIX-Wesermarsch

Das Modell *REMIX-Wesermarsch* bildet sämtliche Gemeinden des Landkreises Wesermarsch ab und ist in ein räumlich hochauflösendes Datenmodell von Niedersachsen eingebettet (siehe Abbildung 3.3). Zusätzlich wurde ein Modellknoten eingefügt, um den Energiefluss zwischen Wesermarsch und dem übrigen deutschen Netz zu modellieren. Wie in Abbildung 3.2 ersichtlich ist, werden im Modell für den Landkreis Wesermarsch die Sektoren Strom, Wärme und Teile des Verkehrs (Individualverkehr) abgebildet (s. farblich gekennzeichneten Demand-Symbole). Für das umliegende Versorgungssystem (Niedersachsen-Modell) und das verbleibende Bundesgebiet wurde hingegen ausschließlich der Stromsektor modelliert. Das Niedersachsen-Modell ist dabei von einem realen Höchstspannungsnetz in Niedersachsen abstrahiert. Im Gegensatz dazu nutzt das Wesermarsch-Modell die Gemeinden als Netzknoten, die mit ihren Nachbargemeinden verbunden sind. Dieses Netzwerk ist rein künstlich und erlaubt im Modell einen unbegrenzten Netzausbau, d. h. es werden keine Kapazitätsbeschränkungen für Leitungen angenommen. Die im Modell erzeugten Flüsse können anschließend anhand des für das Projekt bereitgestellten Netz-Datensatzes der EWE Netz GmbH plausibilisiert werden, um zu prüfen, ob die simulierten Strom- und Wärmeflüsse im Rahmen der realen Netzkapazitäten liegen.

Wie anhand von Tabelle 3.2 nachvollziehbar, stehen im Stromsektor folgende Erzeugungstechnologien zur Verfügung: Wind Onshore, Photovoltaik, Biomasse-/Biogasanlagen und Erdgaskraftwerke. Zur Flexibilisierung dienen Batteriespeicher sowie das bereits bestehende Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit 321 MW Kapazität. Dabei ist ein unbeschränkter Ausbau von Gaskraftwerkskapazität und Batteriespeichern möglich.⁴ Für den Ausbau von Bioenergiekraftwerken gilt eine systemweite Obergrenze (12 GW) und

³https://openenergyplatform.org/ontology/oeo/OEO_00000279

⁴Im Vergleich zu Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien werden hierfür in der Regel keine vorangestellten Potentialanalysen durchgeführt, weshalb abgesehen von groben Expertenschätzungen keine eindeutig quantifizierbaren Obergrenzen für den Ausbau dieser sogenannten Flexibilitäten für das Stromversorgungssystem definiert werden können. Insofern in den Modellergebnissen unplausible Zubauraten beobachtbar wären, können ebensolche Obergrenzen nachträglich dem Modell hinzugefügt und begründet werden.

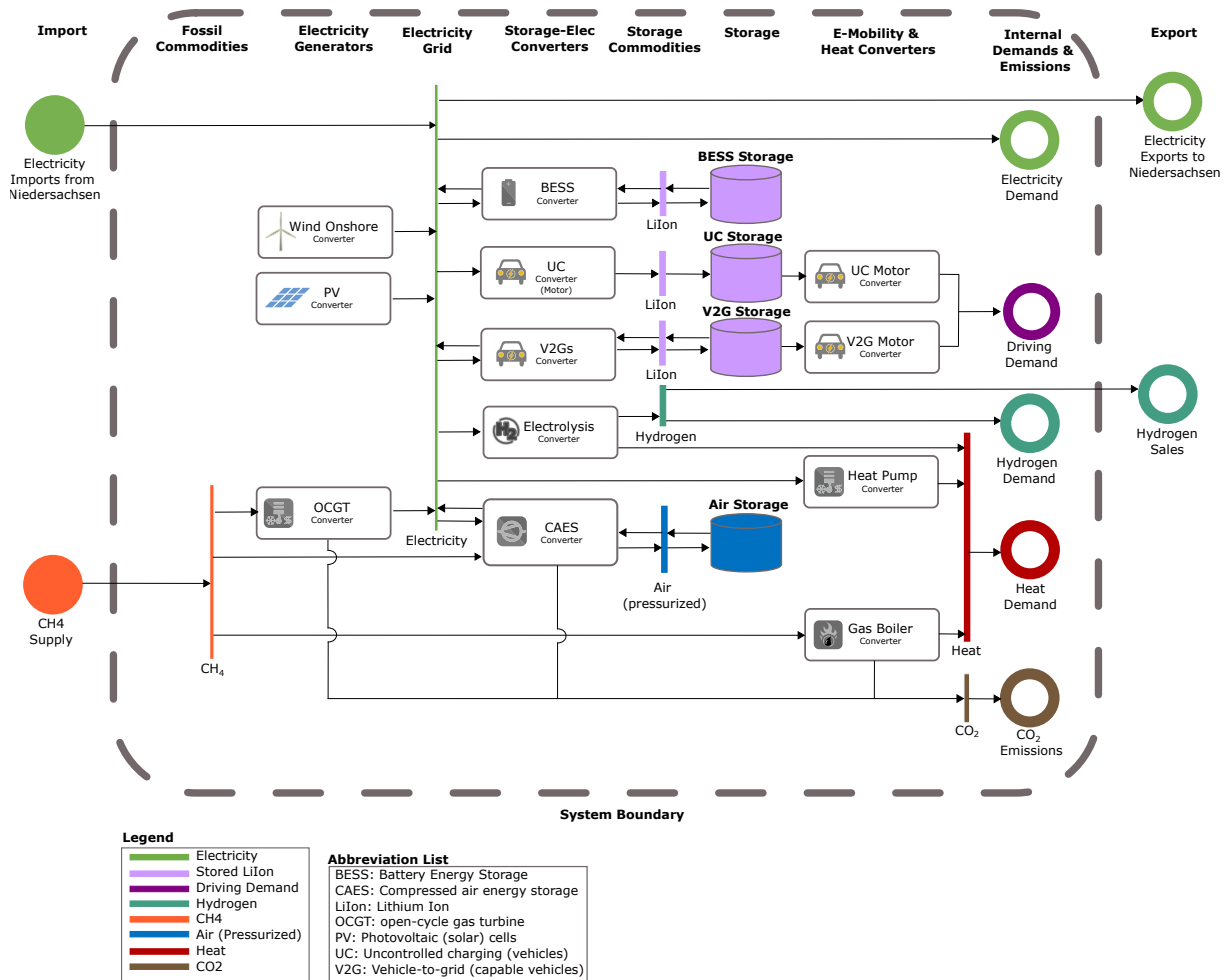


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau des *REMix-Wesermarsch* Modells mit den entsprechenden Technologien und Energieflüssen [8]

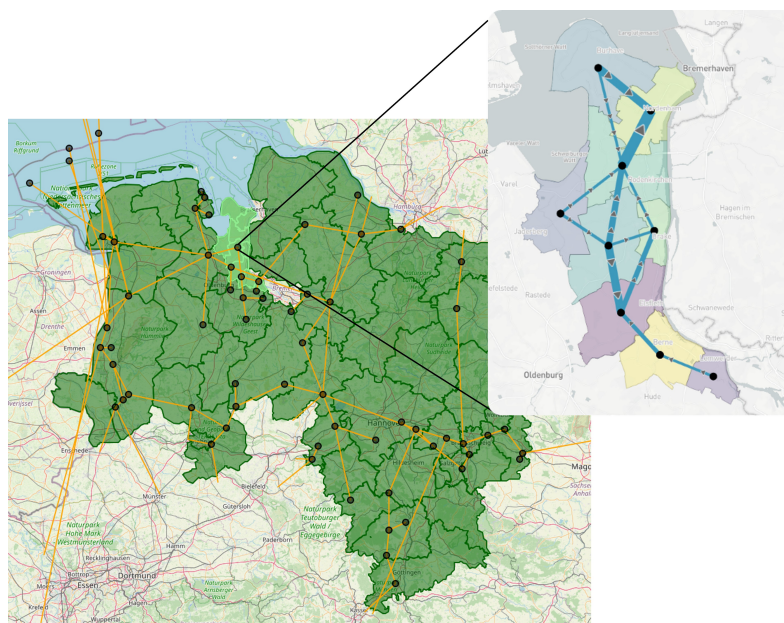


Abbildung 3.3: Karte mit Abbildung des Höchstspannungsnetzes in Niedersachsen mit eingebundener Wesermarsch in gemescharfer Auflösung

für den Landkreis Wesermarsch im speziellen von 20 MW [14]. Die Stromlast setzt sich aus der sonstigen Last (950 GWh), dem Strombedarf für E-Autos (183,2 GWh) sowie dem Wärmepumpenstrom zusammen.

Die gemeindegrenzüberschreitende räumliche Auflösung des Modells limitiert die Möglichkeit detaillierte Szenarioanalysen des Wärmesektors durchzuführen.⁵ Seine Modellierung fokussiert sich deshalb auf die Vergleichbarkeit von dezentralen und zentralen Versorgungskonzepten sowie der Konkurrenz von fossiler und erneuerbarer Raumwärmebereitstellung. Konkret bedeutet dies, dass aus dem heutigen Wärmetechnologiemix [14] die zwei dominierenden Wärmeversorgungsstechnologien berücksichtigt sind: Gasheizungen und Wärmepumpen, für welche eine Jahresarbeitszahl von 3,7 angenommen wird. Wie oben erwähnt, wird im Szenario *E-Abwärme* zusätzlich die Abwärme von Elektrolyseuren zur Wärmeversorgung genutzt.

Für die Elektrolyse-Szenarien gelten darüber hinaus weitere Randbedingungen: Es muss mindestens die doppelte Menge an erneuerbarem Strom erzeugt werden, als für den Betrieb der Elektrolyseure benötigt wird.⁶ Dieser erneuerbare Strom muss lokal im Landkreis erzeugt werden, wobei auch Biomasse zu den erneuerbaren Energien zählt. Im Szenario *Elektrolyse* ist der zentrale Großelektrolyseur am Umspannwerk Elsfleth/West an die 380 kV-Ebene angeschlossen. Im Szenario *E-Abwärme* sind dezentrale Elektrolyseure an vier Gemeinden mit hoher Wärmeliniendichte (Nordenham, Brake, Lemwerder, Elsfleth) installiert, deren Abwärme vollständig zur Wärmeversorgung genutzt werden muss.

⁵Dies ist auf Basis der hochaufgelösten Geodaten möglich und wurde in ReStEP vom Projektpartner Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth mittels eines Softwaretools zur Entscheidungsunterstützung, in welches auch die Ergebnisse der hier beschriebenen Szenarioanalysen integriert wurden, umgesetzt (siehe Kapitel 6).

⁶Hierbei handelt es sich um einen nach ersten Test-Modellläufen eingeführten Parameter zur Sicherstellung der Nutzung regionaler EE-Stromerzeugung sowohl für die Elektrolyse als auch zur Deckung des regionalen Strombedarfs.

4 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Optimierungsläufen mit dem Energiesystem-Optimierungsmodell *REMix-Wesermarsch* vorgestellt und diskutiert.

4.1 Stromerzeugungs- und Speicherkapazitäten

Abbildung 4.1 zeigt die berechneten Kraftwerks- und Speicherkapazitätsbedarfe für die verschiedenen Szenarien. Da der Ausbau der erneuerbaren Energien in den ersten drei Szenarien modellexogen festgelegt ist, begrenzen sich die Unterschiede hier vor allem auf die Batteriespeicher- und Gaskraftwerkskapazitäten. Im Vergleich dazu nutzen die Szenarien *CO₂zero* und *CO₂price2x* mit 730 MW zwar ebenfalls das gesamte Ausbaupotential für Windenergie an Land (Wind Onshore), während der Photovoltaikausbau unterschiedlich ausfällt. Bei *CO₂price2x* werden lediglich 52 MW ausgebaut, was der heute vorhandenen installierten Photovoltaik-Kapazität im Landkreis Wesermarsch entspricht. Hieraus lässt sich ableiten, dass aus Gesamtsystemperspektive insbesondere bei hohen CO₂-Preisen der Ausbau von Photovoltaikanlagen an Standorten außerhalb der Wesermarsch kosteneffizienter wäre. So steigt die Photovoltaik-Kapazität im gesamten Modell von 231,8 GW im Basisszenario *Klimaschutz* auf 334,9 GW im Szenario *CO₂price2x*. Bei *CO₂zero* wird hingegen mit 511 MW mehr Photovoltaik-Kapazität ausgebaut als im Klimaschutzkonzept anvisiert wird. Dieses Ergebnis lässt sich so interpretieren, dass zur Erreichung einer Vollversorgung mit erneuerbarer Energie sämtliche verfügbare Standorte, also auch jene mit weniger attraktiven PV-Erzeugungspotentialen genutzt werden müssen. Die Ausbaugrenze für Photovoltaik im Landkreis Wesermarsch (1,68 GW) wird in keinem Szenario erreicht, was verdeutlicht, dass es aus Systemsicht bessere Photovoltaikausbaustandorte gibt.

Ein weiterer Unterschied im Vergleich der Szenarien ist für den Batteriespeicherausbau beobachtbar. Dieser schwankt zwischen 93 MW und 450 MW Leistung und korreliert im Rahmen der betrachteten Szenarien mit der installierten Photovoltaik-Kapazität. Folglich fällt er im Szenario *CO₂price2x* (98 MW) am geringsten aus, da hier die Photovoltaik nur auf 52 MW ausgebaut wird und somit der Flexibilisierungsbedarf vergleichsweise gering ist. Auf den mit Abstand größten Ausbau im Szenario *E-Abwärme* (450 MW) wird ebenso wie auf den erhöhten Ausbau von Gaskraftwerkskapazität in Abschnitt 4.4 näher eingegangen. Der im Vergleich zum Basisszenario *Klimaschutz* (245 MW) geringere Ausbau im Szenario *CO₂zero* (154 MW) lässt sich durch den erhöhten überregionalen Batteriespeicherausbau (18,5 gegenüber 6,1 GW) in Niedersachsen erklären. Insbesondere in diesem Szenario wird deutlich mehr Flexibilität benötigt.

4.2 Strombilanz

In der Strombilanz zeigt sich über alle fünf Szenarien hinweg ein ähnliches Bild wie beim Ausbau der Technologien zu Stromerzeugung und -speicherung (Abbildung 4.2). Auffällig sind hier vor allem die Unterschiede hinsichtlich der Importe in die Wesermarsch bzw. der Exporte aus der Wesermarsch nach Niedersachsen. Es ist ersichtlich, dass zur Auslastung des Großelektrolyseurs zusätzliche Stromimporte im

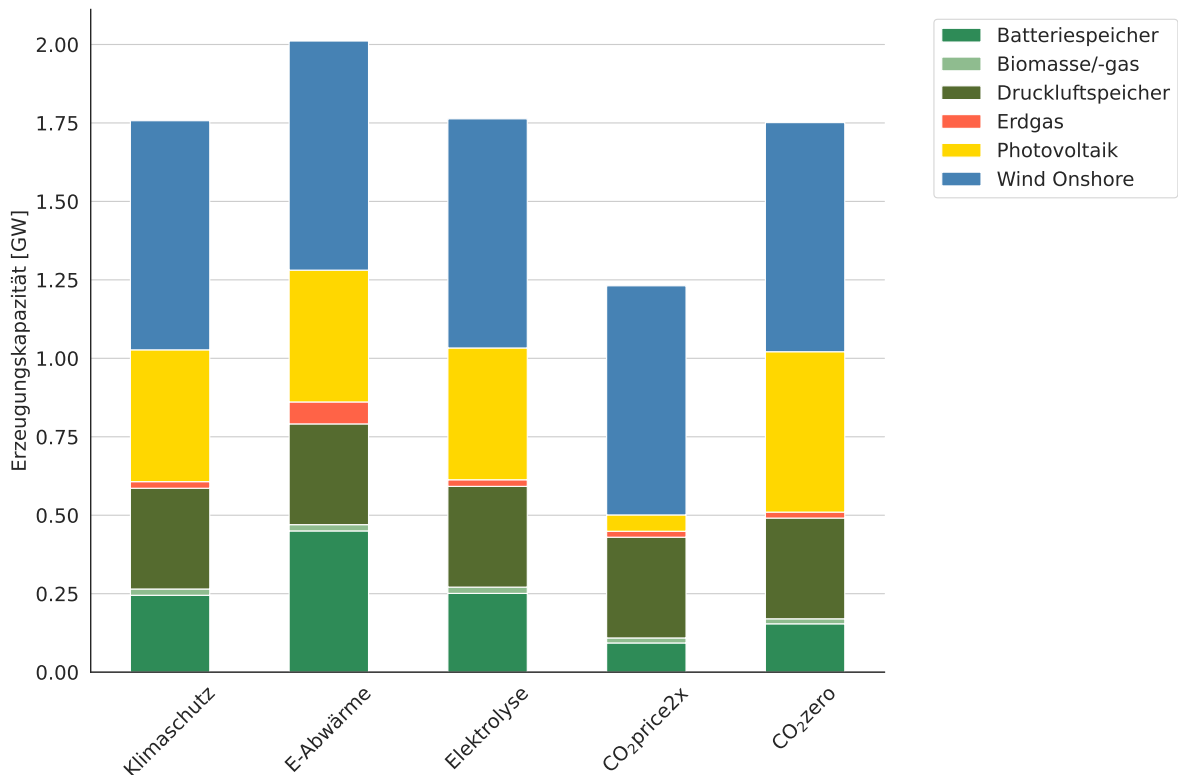


Abbildung 4.1: Stromerzeugungs- und Speicherkapazitäten der Wesermarsch in den fünf Szenarien

Szenario *Elektrolyse* genutzt werden. In allen anderen Szenarien hat die Wesermarsch einen deutlichen Exportüberschuss von 629 GWh (*E-Abwärme*) bis zu 1447,5 GWh (Basisszenario *Klimaschutz*). Es wird auch deutlich, dass die Lasterhöhung durch Wärmepumpen von bis zu 156 GWh/a in *CO₂zero* nur einen kleinen Anteil am gesamten Stromverbrauch in der Wesermarsch hat.

4.3 Wärmesektor

Abbildung 4.3 zeigt den Wärmemix sowohl dargestellt anhand der installierten Erzeugungskapazitäten als auch in Form der jährlichen Erzeugungsmengen. So ist im Basisszenario *Klimaschutz* eine Gasheizungskapazität von 139 MW installiert, die aber nur 1131 Betriebsstunden erreicht, womit 157 GWh Wärme erzeugt werden, während Wärmepumpen mit 78 MW Kapazität 423 GWh an Wärme liefern. Dies kann als eine Aufteilung von Grundlast- und Spitzenlast interpretiert werden: Wärmepumpen decken die Grundlast, Gasheizungen werden bei Spitzenlasten zugeschaltet. Im Szenario *E-Abwärme* übernimmt die Elektrolyse-Abwärme (300 GWh) die Grundlastversorgung, wodurch die Wärmepumpen-Erzeugung auf 146 GWh sinkt.

4.4 Elektrolyse in Szenariogruppe H₂

In Abbildung 4.4 sind die Standorte und die Kapazität der Elektrolyseure als Kreise dargestellt. Der Vergleich der beiden Elektrolyse-Szenarien zeigt einen unerwarteten Effekt: Das Szenario mit Abwärmenutzung (*E-Abwärme*) weist eine deutlich höhere Erdgasstromerzeugung auf (206 GWh gegenüber 45-46 GWh in den anderen Szenarien). Dies ist auf die Kopplung von Elektrolysebetrieb und Wärmeversorgung

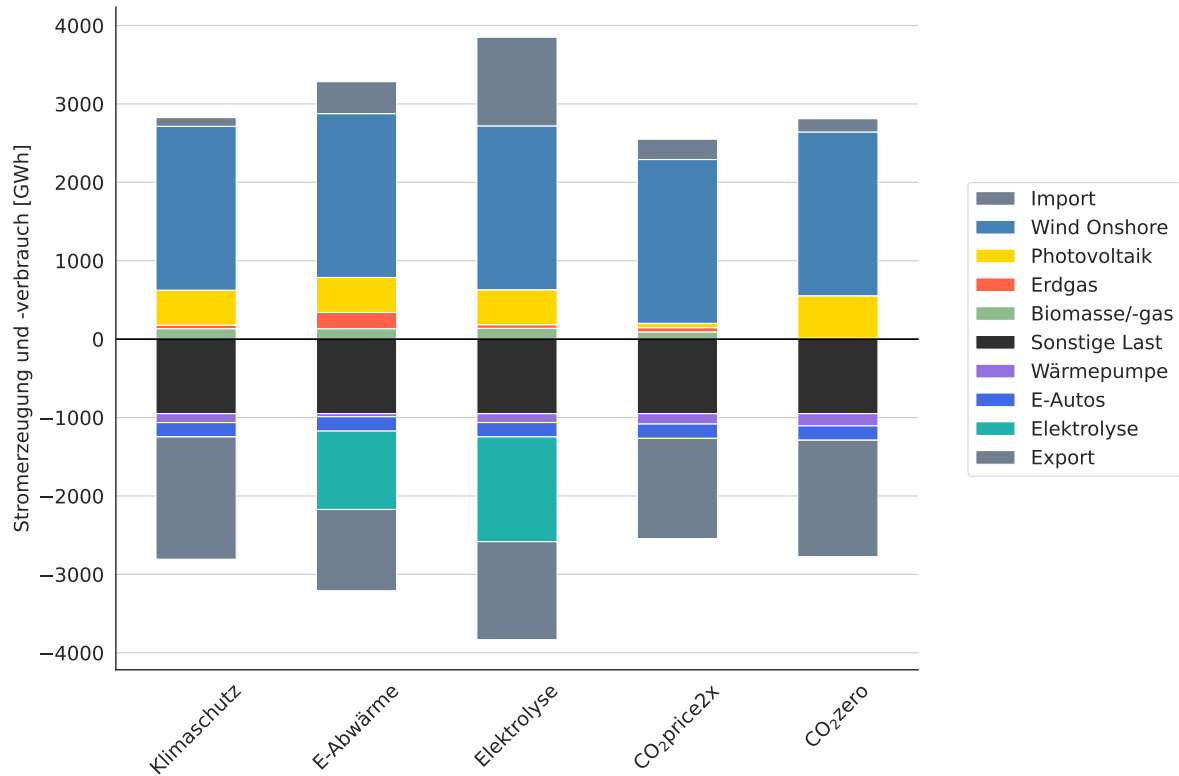


Abbildung 4.2: Energiebilanz der Wesermarsch in den fünf Szenarien

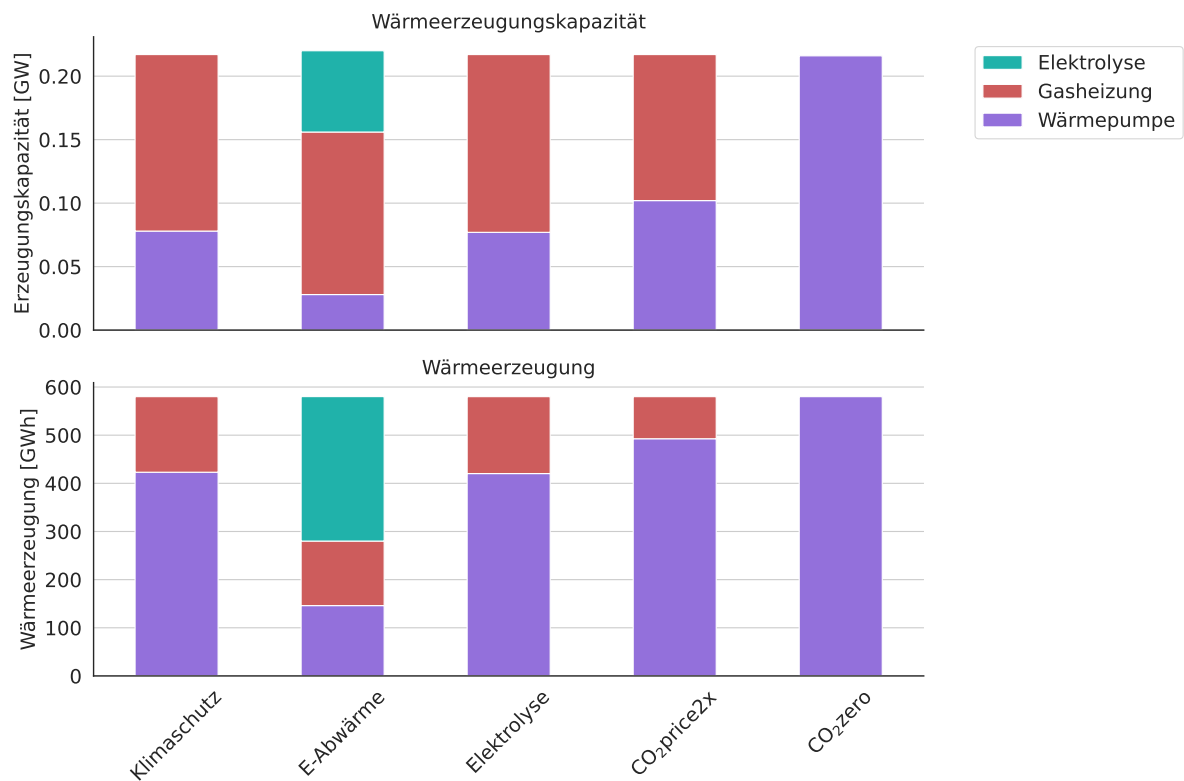


Abbildung 4.3: Wärmeerzeugungskapazitäten und Wärmeerzeugung in der Wesermarsch in den fünf Szenarien

zurückzuführen.

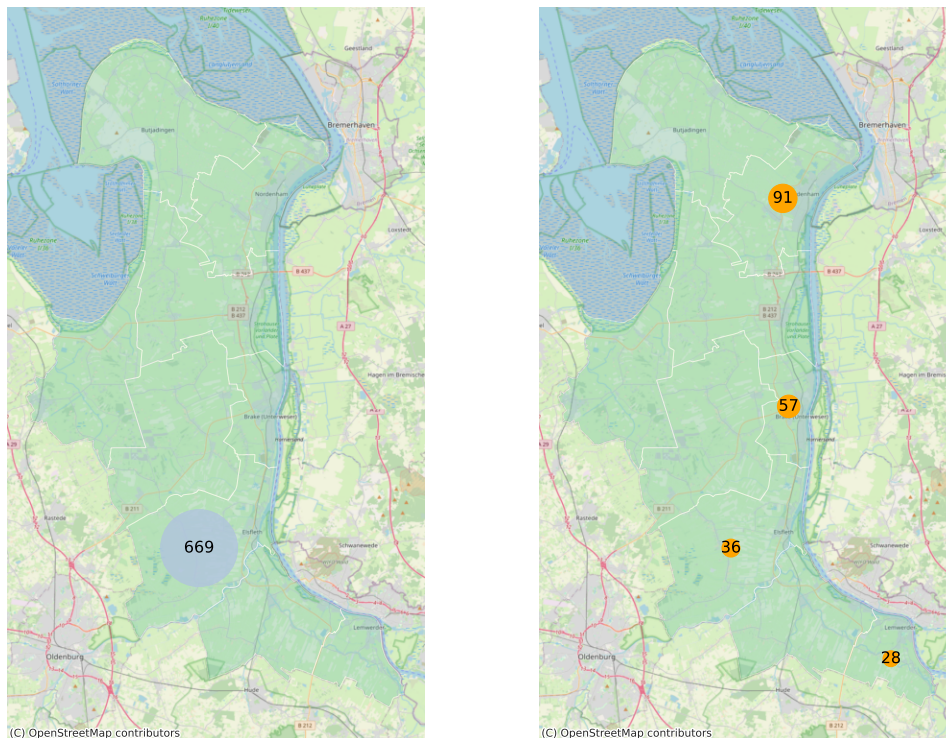


Abbildung 4.4: Karte der Wesermarsch mit den gemeindegrenzen Elektrolysestandorten inklusive der elektrischen Aufnahmeleistung in MW in den Szenarien *Elektrolyse* (links) und *E-Abwärme* (rechts)

Die dezentralen Elektrolyseure (212 MW_{el} gesamt) müssen Wärme für vier Gemeinden (Nordenham, Elsfleth, Brake, Lemwerder) liefern. Da die Modellimplementierung eine vollständige Abwärmenutzung vorsieht, ist der Elektrolysebetrieb wärmegeführt. Dies führt dazu, dass die Elektrolyse auch in Zeiten mit geringer erneuerbarer Erzeugung betrieben werden muss, was einen zusätzlichen Strombedarf verursacht. Gleichzeitig wird der Wärmepumpeneinsatz stark reduziert (146 vs. 420 GWh im Basisszenario *Klimaschutz*), obwohl Wärmepumpen energetisch effizienter sind. Im Szenario *Elektrolyse* ohne Wärmenutzung steht der zentrale Elektrolyseur (669 MW_{el}) flexibler zur Verfügung und kann besser auf die erneuerbare Stromerzeugung reagieren, was sich in deutlich geringerer Erdgasnutzung niederschlägt.

4.5 Einschränkungen und Einordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung unterliegen methodischen Einschränkungen. Die Kopplung von Elektrolyse und Wärmeversorgung ohne Speichermöglichkeit im Szenario *E-Abwärme* stellt eine stark vereinfachte Systemkonfiguration dar. Dadurch können die Elektrolyseure nur dann betrieben werden, wenn die Wärmenachfrage ausreicht, um die Abwärme vollständig aufzunehmen. Der Elektrolyseur wird dementsprechend wärmegeführt betrieben. Zusammen mit der Notwendigkeit gleichzeitig eine Mindest-Wasserstoffproduktion zu gewährleisten, führt dies zu einem suboptimalen Einsatz mit erhöhtem Strombedarf, der über die Verstromung von Erdgas realisiert wird (206 GWh vs. 45 GWh im Basisszenario *Klimaschutz*). Abhilfe für diesen aus Sicht des Klimaschutzes unerwünschten Effekt kann eine zusätzliche Flexibilisierung beispielsweise durch hier nicht modellierte (saisonale) Wärmespeicher schaffen. Die Ergebnisse zur Abwärmenutzung von Elektrolyseuren stellen daher lediglich eine Potentialabschätzung dar, welche als Ausgangspunkt

für weiterführende Analysen (z. B. durch Modellierung von Wärmespeichern und Wärmenetzen) dienen können.

Die Nebenbedingung zur erneuerbaren Stromerzeugung (mindestens doppelte Menge des Elektrolysebedarfs) gilt nur bilanziell über den modellierten Zeitraum von einem Jahr. Sie verhindert nicht, dass in einzelnen Stunden importierter oder fossil erzeugter Strom für die Elektrolyse genutzt wird. Dies ist besonders im Szenario *E-Abwärme* relevant, wo die wärmegeführte Fahrweise den Elektrolysebetrieb auch bei geringer erneuerbarer Stromerzeugung erfordert. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Nutzungspotentiale für Wärmenetze nur in diesem Szenario berücksichtigt sind. Zur Umsetzung eines Wärmeverorgungskonzepts auf Basis des Technologiemies der anderen Szenarien müsste diese Information zur Aufteilung von zentral und dezentral versorgten Wohngebieten zusätzlich Berücksichtigung finden.

Das Modell *REMix-Wesermarsch* eignet sich insbesondere dazu, um Zielkonflikte und Potentiale durch lokale Wasserstoffherzeugung, Abwärmennutzung und die systemische Reduktion von CO₂-Emissionen im Landkreis Wesermarsch und Niedersachsen zu untersuchen. Für die Analyse von detaillierten Energieflüssen im Strom- und Gasverteilnetz gibt es hingegen Verbesserungspotentiale. So werden Lastflüsse auf der Mittelspannungsebene lediglich durch ein kapazitätsbeschränktes Transportmodell abgebildet und für die Niederspannungsebene gelten keine Netzrestriktionen. Für zukünftige Energieplanungen könnte, bei Verfügbarkeit entsprechender Daten, eine detailliertere Netzmodellierung zusätzliche Engpässe oder Ausbaubedarfe aufzeigen.

Außerdem sind folgende weitere Einschränkungen zu nennen:

1. Die Sektorenkopplung beschränkt sich ausschließlich auf den räumlichen Scope des Landkreises Wesermarsch.
2. Aus der Menge möglicher, entscheidungsrelevanter Indikatoren (wie beispielsweise auch soziale oder Umwelteinflüsse) wurden vernehmlich Kosten betrachtet.
3. Die Berücksichtigung der wetterbedingten Variabilität der Einspeisung aus erneuerbarer Stromerzeugung basiert auf einem einzelnen historischen Wetterjahr

5 Zusammenfassung

Im Projekt ReStEP wurde mit dem Modell *REMix-Wesermarsch* erstmals ein sektorübergreifendes Energiesystemmodell mit gemeindescharfer Auflösung entwickelt, das gleichzeitig das angrenzende Stromversorgungssystem von Niedersachsen abbildet, sodass Szenario-Analysen sowohl für den Landkreis als auch für das überregionale Netz durchgeführt werden können. Dabei wurden die Potenziale für die lokale Erzeugung erneuerbaren Stroms (Wind, Solar, Biomasse usw.) auf Gemeinde-Ebene ermittelt und Szenarien einer vollständig CO₂-freien Stromversorgung für die Wesermarsch analysiert. Zusätzlich wurden Abwärmenutzungs-Potenziale von potentiellen Elektrolyseanlagen in der Region verdeutlicht. Im Rahmen der Wasserstoffversorgung wurden ein zentrales Konzept (großtechnische Elektrolyseur-Anlage) und ein dezentrales Konzept (klein- bis mittelgroße Elektrolyseure vor Ort) gegenübergestellt, um deren Vor- und Nachteile für die Region zu bewerten. Durch die Kombination von gemeindescharfer Modellierung und Einbindung des überregionalen Stromnetzes lassen sich sowohl die Machbarkeit einer CO₂-freien Stromversorgung als auch eine optimale Wasserstoff-Versorgungsstrategie für die Wesermarsch bewerten.

6 Vertiefende Analysen und Veröffentlichungen

Im Rahmen des vom MWK Niedersachsen geförderten *Forschungsprojekts Regionale Strategische Energieplanung* wurden unter Federführung und in Zusammenarbeit mit der Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth Fachaufsätze veröffentlicht, in welchen weiterführende Informationen und die Einbettung von *REMix-Wesermarsch* in eine Software zur Entscheidungsunterstützung beschrieben sind. [21, 22]

Literaturverzeichnis

- [1] Christiane Bernath, Gerda Deac und Frank Sensfuß. „Impact of sector coupling on the market value of renewable energies – A model-based scenario analysis“. In: *Applied Energy* 281 (2021), S. 115985. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115985>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920314331>.
- [2] BMWK. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Langfristszenarien 3)*. 2024.
- [3] BNetzA. *Genehmigung des Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan Strom 2025-2037/2045*. 2025.
- [4] Agora. *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung - Vertiefung der Szenariopfade*. 2024.
- [5] ARIADNE. *Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045*. Hrsg. von Gunnar Luderer, Frederike Bartels und Tom Brown. 2025.
- [6] Dominik Hering u. a. *Wärmegipfel Baden-Württemberg - Auswertung der kommunalen Wärmepläne in Baden-Württemberg 2021 -2023. Schlussbericht*. 2025.
- [7] Manuel Wetzel u. a. „REMix: A GAMS-based framework for optimizing energy system models“. In: *Journal of Open Source Software* 9.99 (2024), S. 6330.
- [8] Connor Fitzgerald. „Model-Based Scenario Analysis of a Climate Neutral Energy Supply in Wesermarsch“. Bachelorarbeit. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2024.
- [9] Jonathan Amme, Clara Büttner, Ilka Cußmann, Julian Endres, Carlos Epia, Kilian Helfenbein, Stephan Günther, Ulf Müller, Amélia Nadal, Guido Pleßmann, Francesco Witte. *ego^N Data*. URL: <https://github.com/openego/eGon-data>.
- [10] Yvonne Scholz. „Renewable energy based electricity supply at low costs - Development of the REMix model and application for Europe“. Diss. Universität Stuttgart, Sep. 2012. URL: <https://elib.dlr.de/77976/>.
- [11] Carsten Fichter, Laurence Wagner, Christin Fichter. *Strategiekonzept zur Neuausrichtung der zukünftigen grünen Energiewirtschaft im Landkreis Wesermarsch*. Techn. Ber. Ovelgönne: EnergieSynergie, Mai 2020.
- [12] Fabia Miorelli u. a. „venco.py: A Python model to represent the charging flexibility and vehicle-to-grid potential of electric vehicles in energy system models“. In: *Journal of Open Source Software* 10.108 (Apr. 2025), S. 6896. ISSN: 2475-9066. DOI: 10.21105/joss.06896.
- [13] Karl-Kiên Cao und Jan Buschmann. *Inputs and outputs of the UNSEEN workflow including electricity price time-series*. 2025. DOI: 10.23728/B2SHARE.7DFE93339C3E4E34BF4C47F880186466.
- [14] Daniela Windsheimer, Johannes Meyer und Tim Berger. *Integriertes Klimaschutzkonzept des Landkreises Wesermarsch*. Techn. Ber. Auftraggeber: Landkreis Wesermarsch, Auftragnehmer: energie-lenker projects GmbH, 2025. URL: https://wesermarsch.de/wp-content/uploads/2026/02/Klimaschutzkonzept-LK-Wesermarsch_final-1.pdf.

- [15] Eliseo Curcio. „Techno-economic analysis of hydrogen production: Costs, policies, and scalability in the transition to net-zero“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 128 (2025), S. 473–487. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925016234>.
- [16] Hans Christian Gils, Hedda Gardian und Jens Schmutge. „Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany“. In: *Renewable Energy* 180 (2021), S. 140–156. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121011769>.
- [17] Manuel Wetzel, Hans Christian Gils und Valentin Bertsch. „From ambition to reality: The impact of limited capacity expansion rates on the transformation pathway to a climate-neutral European energy system“. In: *Renewable Energy* 258 (2026), S. 124917. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124917>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125025819>.
- [18] Ulrich Joachim Frey u. a. „The benefits of exploring a large scenario space for future energy systems“. In: *Nature Communications* (2025).
- [19] Rafaella Canessa u. a. „Modelling New Zealand’s Energy Future with Remix-Nz: Optimised Green Hydrogen Pathways for Domestic Use and Export“. In: *Available at SSRN 5318778* ().
- [20] Manuel Wetzel, Hans Christian Gils und Valentin Bertsch. „From ambition to reality: The impact of limited capacity expansion rates on the transformation pathway to a climate-neutral European energy system“. In: *Renewable Energy* (2025), S. 124917.
- [21] Moritz Elbeshausen u. a. *Strategische Entscheidungsunterstützung in der Regionalen Wärmeplanung*. 2025. DOI: 10.34712/142.68. URL: <https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/1126.2>.
- [22] Moritz Elbeshausen u. a. „Integration von Energiesystemoptimierung in die geodatenbasierte Energieleitplanung“. In: *gis.Science Ausgabe 4/2025* (2025).