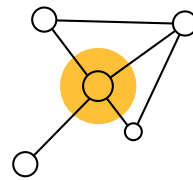
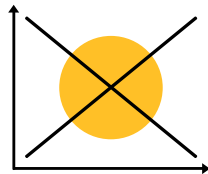
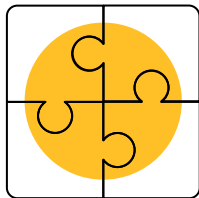
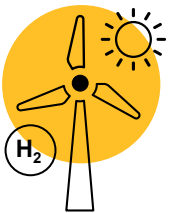


Standortbewertung für systemdienliche Elektrolyseure

Eine regionale Analyse multipler Einflussfaktoren

Im Auftrag von E.ON Hydrogen GmbH und Thüga Aktiengesellschaft



Energiewirtschaftliches Institut an der
Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

 +49 (0)221 650 853-60

 <https://www.ewi.uni-koeln.de>

Verfasst von:

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Klaas (Projektleitung)

Michaele Diehl

Nada Fadl

Michael Moritz

Lisa Restel

Bitte zitieren als:

EWI (2024). Standortbewertung für systemdienliche Elektrolyseure - eine regionale Analyse multipler Einflussfaktoren

Der Begriff der Systemdienlichkeit

Der ausstehende Wasserstoff-Markthochlauf und die damit verbundene flächendeckende Installation von Elektrolyseuren wirft die Frage einer systemdienlichen Verortung auf. Hierbei können Elektrolyseure laut NWS¹ bei intelligenter Verzahnung des Strom- und Wasserstoffsektors eine wichtige Flexibilitätsoption der Energiewende darstellen. Eine systemdienliche Verortung von Elektrolyseuren könnte entsprechend Kosten, Ressourcen und Emissionen senken und ist somit ein wichtiger Schritt im Zuge des Wasserstoff-Markthochlaufs und der Dekarbonisierung des Energiesystems.

Die systemdienliche Verortung von Elektrolyseuren bezieht sich bisher in der öffentlichen Diskussion vor allem auf die Nutzung von erneuerbaren Energien (EE) bzw. die Vermeidung von Stromnetzengpässen. Allerdings spielen die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion, die ausreichende Verfügbarkeit von Abnehmern, die intelligente Verzahnung mit dem Stromsystem sowie die Transport- und Speicherinfrastruktur für Wasserstoff eine ebenso große Rolle bei der Systemdienlichkeit von Elektrolyseuren. Eine abschließende Definition der Systemdienlichkeit, die eine Vielzahl an Faktoren beinhaltet, steht noch aus.

1: Nationale Wasserstoffstrategie (BMWK, 2021)

Analyse der Standorte für systemdienliche Elektrolyseure

Dieses Gutachten bewertet die systemdienliche Verortung auf NUTS-3-Ebene von drei Elektrolyseklassen (<10 MW, 10-50 MW, >50 MW) für zwei Zieljahre (2030 und 2040) und berücksichtigt die folgenden zehn Standortfaktoren:

- Nutzung von lokalen EE-Potentialen bezogen auf die Spannungsebene des Anschlusses der Elektrolyse
- Vermeidung von Redispatch-Maßnahmen auf der Höchstspannungsebene
- Nähe zum Höchstspannungs-Stromnetz
- Nähe zum geplanten Wasserstoff-Kernnetz
- Umstellung des lokalen Wasserstoff-Verteilnetzes
- Zugang zu lokalen Wasserstoffspeichern
- Deckung lokaler Wasserstoff-Nachfrage
- Nutzung der Infrastruktur bestehender oder ehemaliger Kraftwerksstandorte
- Verfügbarkeit von bereits erschlossenen Flächen
- Deckung der lokalen Wärmenachfrage durch die Abwärme der Elektrolyse

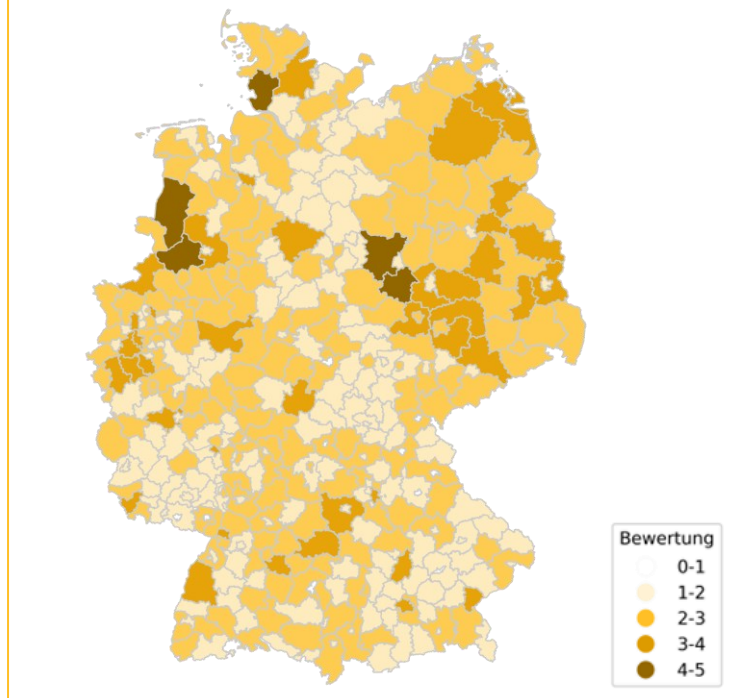
Ergebnisse

Ausschlaggebend für die systemdienliche Verortung von kleinen Elektrolyseuren (<10 MW) ist eine hohe Wasserstoff-Nachfrage verbunden mit einem hohen regionalen EE-Potenzial. Bei mittleren (10-50 MW) und größeren (>50 MW) Elektrolyseuren wird zusätzlich der Redispatch und der Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz als relevant eingeschätzt.

Während im Jahr 2030 nur wenige Regionen eine gute bis sehr gute Bewertung für systemdienliche Elektrolyseprojekte aufweisen, steigt die Höhe der Bewertungen aufgrund der steigenden Wasserstoff-Nachfrage und dem Ausbau der Infrastruktur.

Kleine Elektrolyseure könnten in weiten Teilen Deutschlands systemdienlich verortet werden. Mittlere und größere Elektrolyseure könnten von Standortfaktoren in der Nordhälfte Deutschlands und in der Nähe von Industriezentren profitieren.

Bewertung der NUTS-3-Regionen als Standort für systemdienliche Elektrolyse <10 MW im Jahr 2040



Einige Regionen, zum Beispiel an den Küsten und in Industriezentren, werden für alle Leistungsklassen als systemdienlich eingestuft. Für mittlere und große Elektrolyseure könnte die Verortung wichtiger sein, da sie voraussichtlich einen größeren Einfluss auf das Energiesystem haben. Im Gegensatz dazu könnten insbesondere kleinere, dezentrale Elektrolyseure kurz- bis mittelfristig den Markthochlauf von Wasserstoff unterstützen und langfristig nahezu deutschlandweit systemdienlich verortet werden.

Eine ausschließlich systemdienliche Verortung von geplanten Projekten¹ ist bisher kaum erkennbar. Sie könnte durch eine Förderung nach Kriterien erfolgen, die das Gesamtsystem berücksichtigen. Dabei sollte die Förderung eines systemdienlichen Einsatzes nicht durch vordefinierte Regionen eingegrenzt werden.

1: EWI (2024b)

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation und Überblick über die Methodik
2. Bewertung der einzelnen Standortfaktoren
3. Gesamtbewertung der Regionen
4. Einordnung der Ergebnisse
5. Fazit

1. Motivation und Überblick über die Methodik

Systemdienlichkeit ist ein Schlüsselement der Energiewende

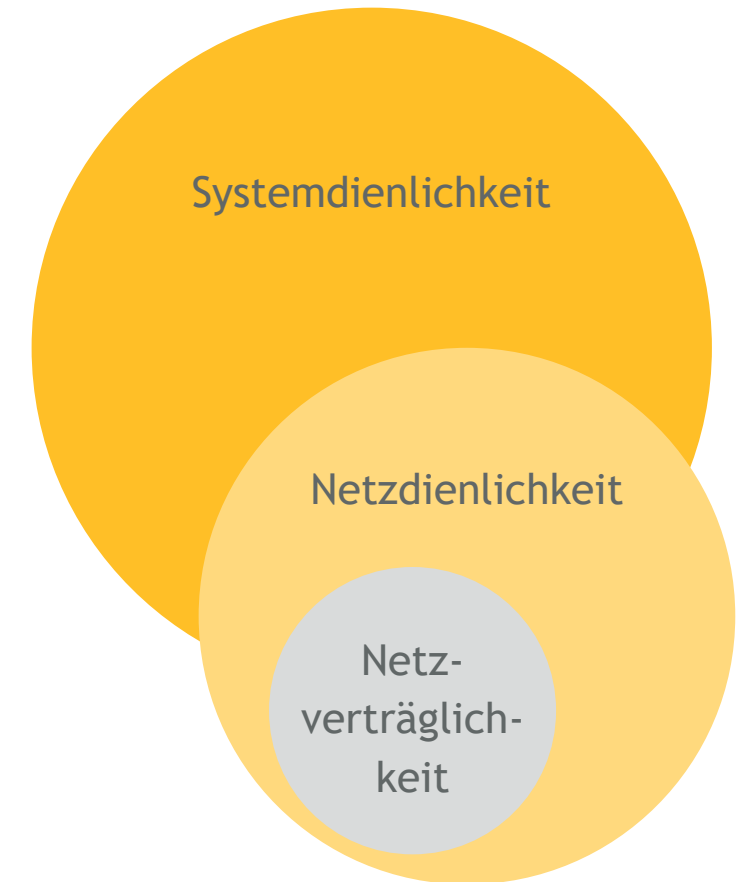
Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, eine Elektrolysekapazität von 10 GW bis 2030 aufzubauen - ein Großteil davon soll systemdienlich verortet und betrieben werden.¹ Auch in der Kraftwerksstrategie ist festgelegt, dass der Zubau von systemdienlichen Elektrolyseuren beschleunigt werden soll.²

Die systemdienliche Verortung von Elektrolyseuren bezieht sich bisher in der öffentlichen Diskussion vor allem auf die Nutzung von erneuerbaren Energien bzw. die Vermeidung von Stromnetzengpässen. So fordern die Norddeutschen Bundesländer in einem Brief an das BMWK die Definition des Begriffs Systemdienlichkeit und beziehen sich dabei auf Aussagen der Übertragungsnetzbetreiber, dass systemdienliche Standorte in Norddeutschland im Zusammenhang mit Offshore-Wind-Anlandungspunkten liegen.³ Die südlichen Bundesländern fürchten dabei allerdings ein Ungleichgewicht beim Wasserstoff-Markthochlauf. Sie fordern eine Erweiterung der Systemdienlichkeit über stromseitige Kriterien hinaus.⁴

Dabei umfasst die Systemdienlichkeit, anders als die (Strom-)Netzdienlichkeit, Anlagen, die sich sektorübergreifend netzdienlich verhalten und Marktakteure berücksichtigen.⁵

Systemdienlichkeit beschreibt somit die optimale Auslegung und den Betrieb des gesamten Energiesystems hinsichtlich Kosten, Ressourcen und Emissionen.

Aus Systemsicht muss vor allem bei der systemdienlichen Verortung von Elektrolyseuren auch der Wasserstoffsektor berücksichtigt werden. Folglich ist eine ganzheitliche Betrachtung verschiedener Faktoren notwendig.



1: BMWK (2023) | 2: BMWK (2024) | 3: energate messenger, 2024a | 4: energate messenger, 2024b | 5: VDE, 2022

Eigene Abbildung basierend auf (VDE, 2022)

Vielfältige Faktoren beeinflussen den systemdienlichen Standort

Eine Definition der Systemdienlichkeit im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie steht noch aus. In der Diskussion zur Systemdienlichkeit werden immer wieder erzeugungsnahe Standorte zur Vermeidung von Netzengpässen genannt. In der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie werden ergänzend dazu folgende Aspekte erwähnt, die bei der Definition zusätzlich berücksichtigt werden sollen:¹

- Betrieb von Elektrolyseuren als flexible und variable Lasten
- Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion
- ausreichende Verfügbarkeit von Abnehmern
- intelligente Verzahnung mit dem Stromsystem und der Transport- und Speicherinfrastruktur für Wasserstoff

Ziel der folgenden Untersuchungen ist die Analyse potenzieller Elektrolysestandorte in Deutschland im Hinblick auf zehn Faktoren, die die Systemdienlichkeit von Elektrolyseuren beeinflussen können. Darauf basierend erfolgt die **Bewertung der Systemdienlichkeit von potenziellen Standorten.**



1: BMWK (2023)

Die Standortbewertung erfolgt anhand systemdienlicher Kriterien

1 Aufbereitung

Für jeden Standortfaktor werden Rohdaten recherchiert und auf NUTS-3-Ebene¹ aufbereitet.

Die Aufbereitung erfolgt für zwei Zieljahre: 2030 und 2040

Beispiel: install. EE-Kapazität je Spannungsebene

| NUTS-3 | Unit | NS | MS | ... |
|--------|------|---------|---------|-----|
| DE111 | MW | 271 | 31 | ... |
| DE112 | MW | 541 | 279 | ... |
| DE113 | MW | 589 | 148 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Σ | MW | 118.300 | 139.000 | ... |

2 Bewertung

Für die Bewertung der Faktoren wird für jeden Standortfaktor ein Bewertungsschema von 0 bis 5 definiert.



3 Gewichtung

Zur Gewichtung der Standortfaktoren wird ein Gewichtungsfaktor von 0 bis 3 definiert.

Die Gewichtung unterscheidet die beiden Zieljahre und drei Elektrolyse-Leistungsklassen: <10 MW, 10-50 MW und >50 MW



4 Gesamtbewertung der Regionen

Die Gesamtbewertung von 0 bis 5 je Region wird durch Verrechnung der Bewertung und der Gewichtung ermittelt.

$$\text{Gesamtbewertung der Region} = \frac{\sum_{\text{Faktoren}} \text{Bewertung des Faktors in der Region} * \text{Gewichtung des Faktors}}{\sum_{\text{Faktoren}} \text{Gewichtung des Faktors}}$$

1: Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (eurostat, 2022), NUTS-3 entspricht in Deutschland den Landkreisen und kreisfreien Städten

2. Bewertung der einzelnen Standortfaktoren

- EE-Potenziale
- Redispatch
- Stromnetznähe
- Wasserstoff-Kernnetz
- Wasserstoff-Verteilnetz
- Wasserstoff-Speicher
- Wasserstoff-Nachfrage
- Kraftwerksstandorte
- Flächenverfügbarkeit
- Wärmenachfrage

Die Bewertung basiert auf Annahmen des NEP 2037/2045

Datengrundlage

Elektrolyseure eignen sich in herausragender Weise dazu, regionale erneuerbare Energien zu nutzen, um grünen Wasserstoff zu produzieren.

Die Datengrundlage der EE-Potenziale für die Zieljahre 2030 und 2040 basiert auf Szenario A des Netzentwicklungsplans 2037/45.¹ Es werden Daten für die Jahre 2022, 2037 und 2045 bereitgestellt, sodass die Rohdaten für die Jahre 2030 und 2040 linear interpoliert werden.

Mit dem Ziel, verfügbare EE-Potenziale für die einzelnen Elektrolyse-Leistungsklassen zu bestimmen, werden installierte Leistung je Technologie auf installierte Leistung je Spannungsebene² überführt. Anschließend werden die Spannungsebenen für die jeweilige Elektrolyse-Leistungsklasse gewichtet (siehe nächste Folie).

Methodik

Bewertung

| | |
|---|----------------------|
| 0 | Keine EE-Kapazitäten |
| 1 | <300 MW |
| 2 | 300 - 600 MW |
| 3 | 600 - 1.000 MW |
| 4 | 1.000 - 1.500 MW |
| 5 | >1.500 MW |

Für die Bewertung werden die für die jeweilige Leistungsklasse relevanten szenario-basierten EE-Potenziale in Intervalle mit einer zugehörigen Bewertung von 0 bis 5 eingeteilt.

Es wird dieselbe Skala für beide Zieljahre verwendet. Aufgrund des EE-Ausbaus folgt daraus eine insgesamt höhere Bewertung im Jahr 2040.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

EE-Potenziale haben eine sehr hohe Relevanz für alle Elektrolyse-Klassen.

Grund hierfür ist insbesondere das Potenzial von Elektrolyseuren, das Stromnetz durch die Nutzung von lokal (regional und auf der gleichen oder angrenzenden Spannungsebene) erzeugtem Strom zu entlasten.

Es werden dadurch sowohl der Stromspeicher- als auch der Stromtransportbedarf reduziert.

1: Fraunhofer (2023) | 2: Aufdach-PV wird der Nieder- und Offshore-Windkraft der Höchstspannungsebene zugeordnet; Freiflächen-PV und Onshore-Windkraft werden entsprechend ihrer aktuellen Verteilung je NUTS-3-Region auf die Spannungsebenen verteilt (MaStR, Stand 31.12.2023)

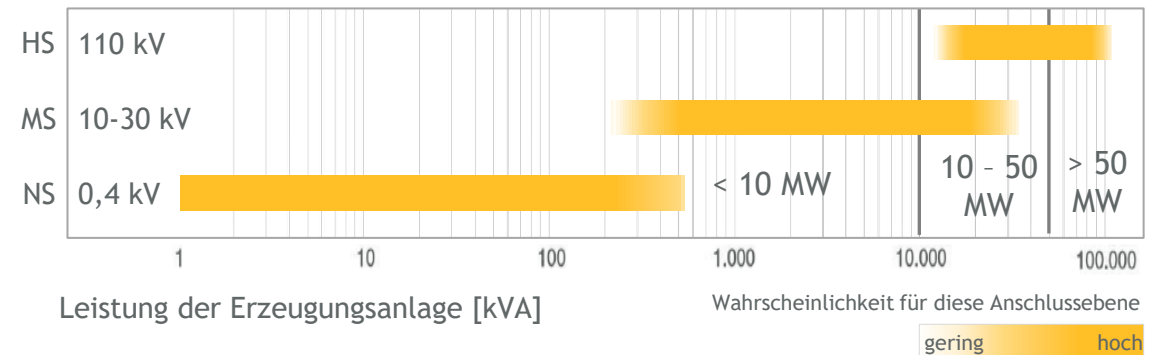
Unterscheidung der Spannungsebenen bei den Leistungsklassen

Die Ermittlung der relevanten EE-Potenziale erfolgt für die einzelnen Leistungsklassen entsprechend ihrer wahrscheinlichen Anchlussebene (siehe Abbildung rechts).

Zusätzlich werden angrenzende Spannungsebenen mit einer geringeren Gewichtung berücksichtigt, da Überkapazitäten ggf. über Trafo-Stationen auf andere Spannungsebenen transformiert werden und ebenfalls lokal genutzt werden könnten.

Anschließend werden die szenariobasierten Potenziale je Spannungsebene entsprechend der unten dargestellten Tabelle verrechnet. Abschließend wird die Gesamtkapazität je Region und je Leistungsklasse bewertet.

Zusammenhang zwischen Leistungsklasse und Anchlussebene¹



| | Nieder- spannung | Mittel- spannung | Hoch- spannung | Höchst- spannung | | | |
|------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----|---|-----|
| < 10 MW | 0,2 | + | 0,5 | + | 0,3 | + | - |
| 10 - 50 MW | - | + | 0,4 | + | 0,4 | + | 0,2 |
| > 50 MW | - | + | - | + | 0,4 | + | 0,6 |



Multiplikation der Gewichtungsfaktoren mit den Potenzialen je Netzebene



Bewertung der resultierenden Gesamtpotenziale für jede NUTS-3-Region:
0, 1, ..., 5

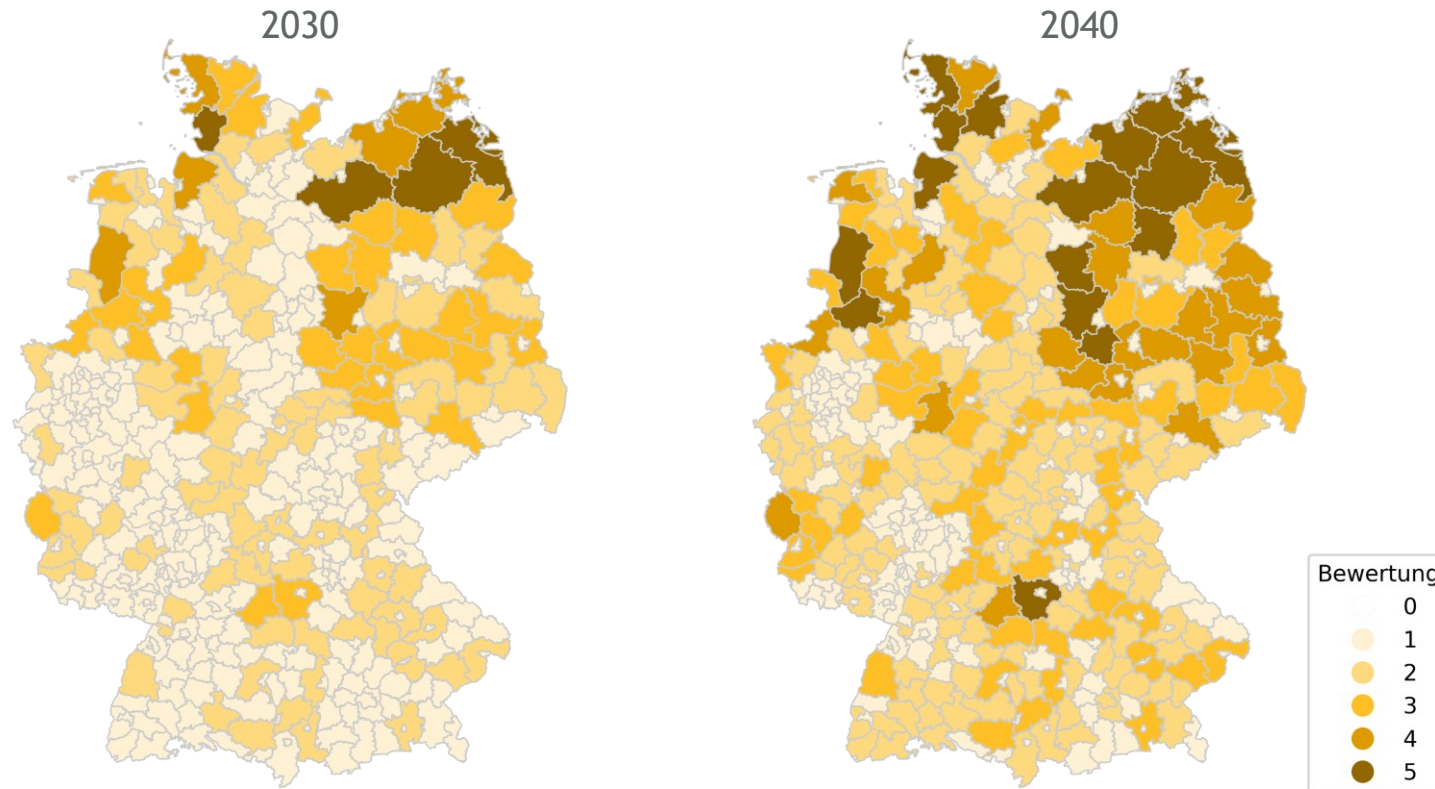
1: Eigene Darstellung in Anlehnung an VDE FNN (2021)

EE-Potenziale für Elektrolyseure <10 MW - Ergebnisse

Potenziale für kleine Elektrolyseure sind großflächig verteilt

EE-Potenziale (Leistungsklasse <10 MW)

Erläuterungen



Kleine Elektrolyseure nutzen das Potenzial erneuerbarer Energien hauptsächlich auf der Mittelspannungsebene und zu einem geringeren Teil auf der Nieder- und Hochspannungsebene.¹

Insgesamt sind die szenariobasierten EE-Potenziale für Elektrolyseure <10 MW großflächig in Deutschland verteilt.

Im Norden und Nord-Osten überwiegen die Mittel- und Hochspannungsebene mit Freiflächen-PV und Onshore-Wind.

Im Süden spielen die Nieder- und Mittelspannungsebene mit Aufdach- und Freiflächen-PV eine übergeordnete Rolle.

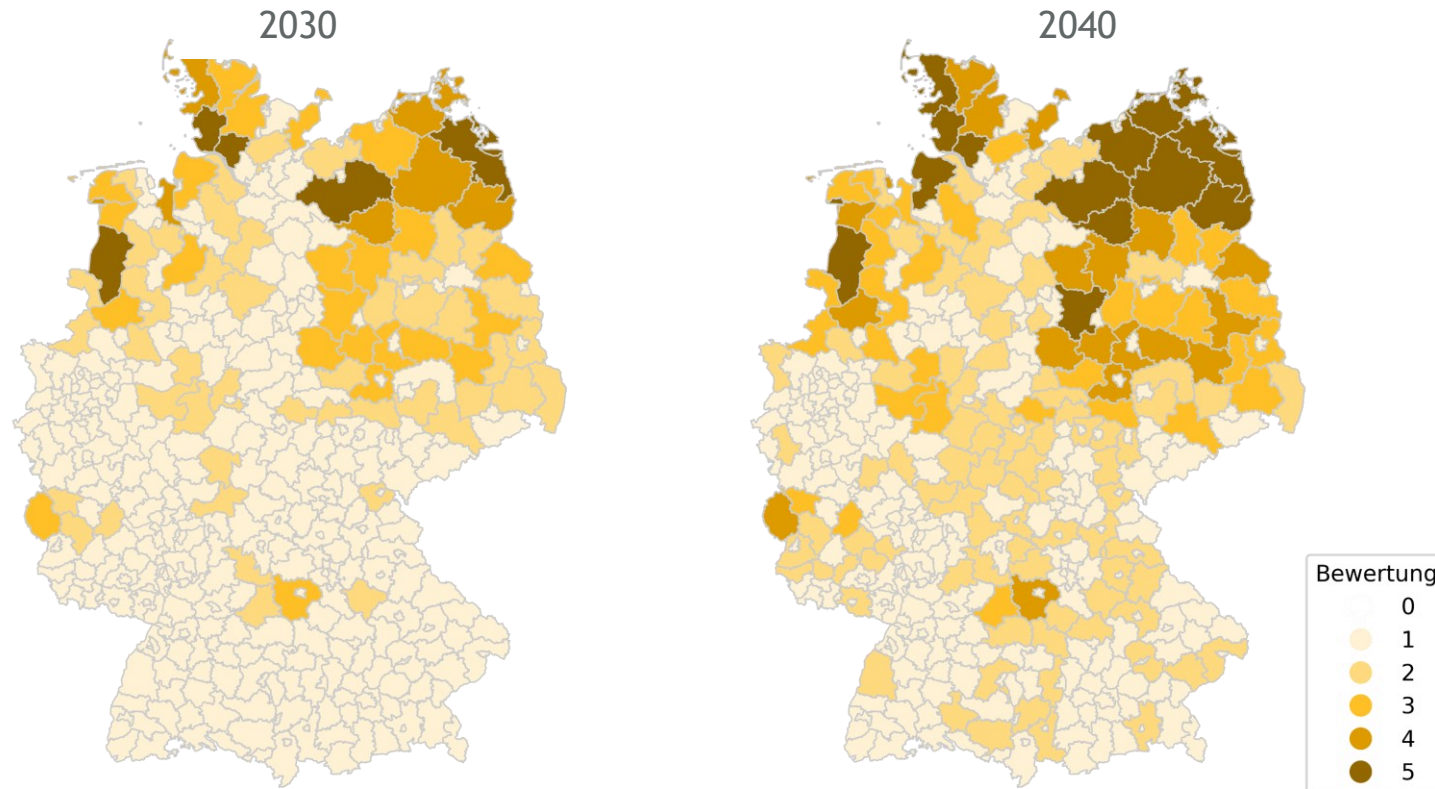
1: Gewichtung der Spannungsebenen: Niederspannung - 0,2; Mittelspannung - 0,5; Hochspannung - 0,3

EE-Potenziale für Elektrolyseure 10-50 MW - Ergebnisse

Potenziale sind in Deutschland verteilt, Konzentration im Norden

EE-Potenziale (Leistungsklasse 10-50 MW)

Erläuterungen



EE-Potenziale für Elektrolyseure mit 10-50 MW sind insbesondere auf der Mittel- und Hochspannungsebene verortet, wobei auch die Höchstspannungsebene in geringerem Umfang berücksichtigt wird.¹

Die szenariobasierten EE-Potenziale, die von Elektrolyseuren der mittleren Leistungsklasse genutzt werden, sind großflächig in Deutschland verteilt. Hierbei ist allerdings eine verstärkte Lokalisierung im Norden gegenüber den EE-Potenzialen von kleinen Elektrolyseuren zu erkennen. Zurückzuführen ist dies auf die gesteigerte Gewichtung höherer Spannungsebenen, die PV-Potenziale der Niederspannungsebene exkludiert und Wind-Potenziale der höheren Spannungsebenen verstärkt inkludiert.

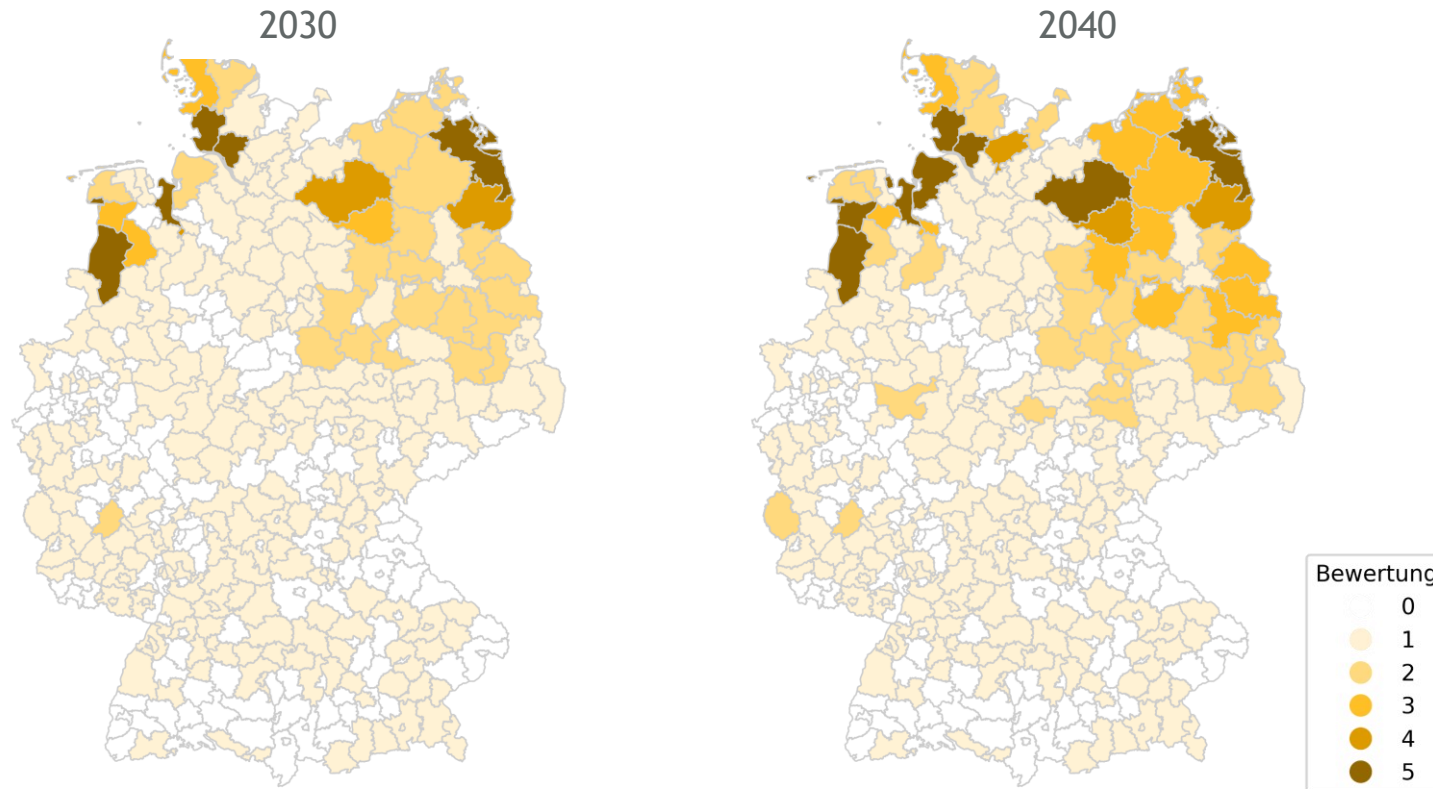
1: Gewichtung der Spannungsebenen: Mittelspannung - 0,4; Hochspannung - 0,4; Höchstspannung - 0,2

EE-Potenziale für Elektrolyseure >50 MW - Ergebnisse

EE-Potenziale sind verstärkt im Norden Deutschlands lokalisiert

EE-Potenziale (Leistungsklasse > 50 MW)

Erläuterungen



EE-Potenziale für Elektrolyseure >50 MW sind auf der Hoch- und Höchstspannungsebene verortet.¹

Für diese Leistungsklasse befinden sich die szenariobasierten EE-Potenziale vorwiegend im Norden Deutschlands, wo sich sowohl Freiflächen-PV und Onshore-Windkraft als auch die Anschlusspunkte der Offshore-Windparks konzentrieren.

1: Gewichtung der Spannungsebenen: Hochspannung - 0,4; Höchstspannung - 0,6

Die Bewertung basiert auf veröffentlichten Redispatch-Maßnahmen

Datengrundlage

Bei entsprechender Verortung können Elektrolyseure regionale EE-Überschüsse nutzen, die andernfalls im Rahmen des Redispatch 2.0 abgeregelt werden müssten, um Netzengpässe zu vermeiden.

Der Redispatch-Bedarf wird anhand der durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) gemeldeten Redispatch-Maßnahmen ausgewertet.¹ Es werden die abgeregelten Energiemengen des Jahres 2023² betrachtet. Da historische Daten ausgewertet werden, erfolgt keine Unterscheidung der Zieljahre. Es werden nur eindeutig regional zuordenbare Maßnahmen berücksichtigt.³

Die Datengrundlage betrifft insbesondere Maßnahmen in der Hoch- und Höchstspannungsebene, da ausschließlich Meldungen der ÜNB betrachtet werden.

1: Netztransparenz (2024) | 2: 2023 war das erste vollständige Jahr, in dem Daten zum Redispatch einheitlich auf dieser Plattform veröffentlicht wurden. | 3: Dadurch werden ca. 86 % der reduzierten Energiemengen in dieser Analyse erfasst. Anlagenbezeichnungen, wie bspw. EE-Hessen oder Börse werden nicht berücksichtigt.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|-----------------|
| 0 | Kein Redispatch |
| 1 | <10 GWh |
| 2 | 10 - 50 GWh |
| 3 | 50 - 100 GWh |
| 4 | 100 - 500 GWh |
| 5 | >500 GWh |

Für die Bewertung der Redispatch-Maßnahmen werden die abgeregelten Energiemengen je Region in Intervalle mit einer zugehörigen Bewertung von 0 bis 5 eingeteilt.

Gewichtung

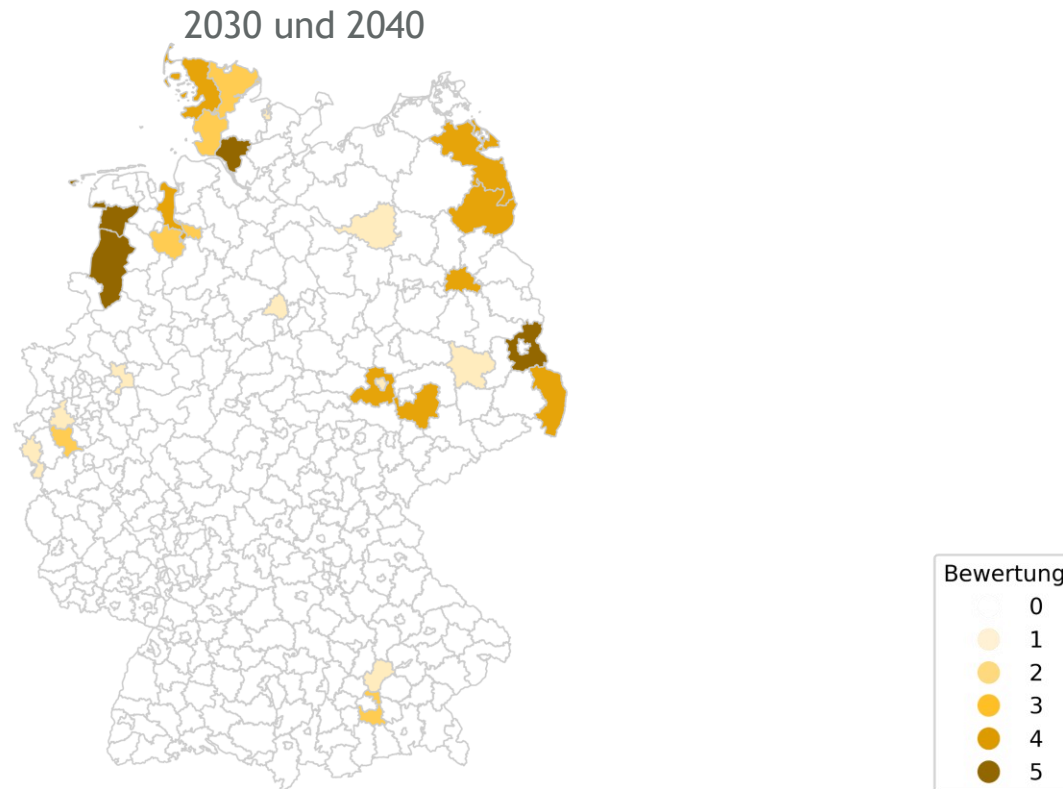
| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 |

Der Redispatch ist ein wichtiges Kriterium zur Entlastung des Stromnetzes. Größere Elektrolyseure erhalten eine hohe Gewichtung, da die Datengrundlage vorwiegend Maßnahmen der oberen Spannungsebenen erfasst. Zusätzlich können größere Elektrolyseure EE-Überschüsse aufgrund der hohen Anschlussleistung besser nutzen.

Es wird außerdem angenommen, dass die Relevanz des Redispatch wegen des angestrebten Netzausbaus mit der Zeit abnimmt.

Redispatch-Maßnahmen sind punktuell in Deutschland verteilt

Redispatch



Erläuterungen

Die im Rahmen von Redispatch-Maßnahmen abgeregelten Energiemengen in der Hoch- und Höchstspannungsebene im Jahr 2023 sind punktuell vor allem im Norden Deutschlands verteilt.

Insbesondere an Anlandungspunkten von Offshore-Windparks sowie in angrenzenden Regionen wurden 2023 höhere Energiemengen abgeregelt. Besonders häufig betroffen waren die Umspannwerke Dörpen-West, Diele, Emden-Ost und Büttel.

Kraftwerke, die 2023 besonders hohe abgeregelte Energiemengen aufwiesen, waren u.a. die Kraftwerke Schwarze Pumpe und Jänschwalde (Brandenburg) oder die Kraftwerke Boxberg und Lippendorf (Sachsen).

Die Bewertung basiert auf dem NEP 2037/2045

Datengrundlage

Elektrolyseure mit hohen Anschlussleistungen können von einem Anschluss an das Höchstspannungsnetz profitieren, um überregionale EE-Potenziale zu nutzen.

Zur Auswertung der Stromnetznähe wird der Netzentwicklungsplan 2037/2045 verwendet.¹ Es werden das bestehende Höchstspannungsnetz sowie die Netzelemente mit geplanter Inbetriebnahme bis 2030 bzw. bis 2040 berücksichtigt.

Dabei erfolgt keine Differenzierung der Übertragungsleistung im Höchstspannungsnetz.² Das Verteilnetz wird ebenfalls nicht berücksichtigt.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|------------------------------------|
| 0 | Keine Leitung |
| 1 | Leitung grenzt an Region |
| 2 | |
| 3 | Zentrale Leitung in der Region |
| 4 | |
| 5 | Mehrere Leitungen oder Knotenpunkt |

Für die Bewertung werden die Daten zur Stromnetzinfrastruktur je Region in eine quantitative Bewertung überführt.

Regionen mit zentralen Stromleitungen oder Knotenpunkten werden hoch bewertet. Regionen, bei denen eine Stromleitung entlang der Grenze verläuft, erhalten hingegen eine niedrige Bewertung.³

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |

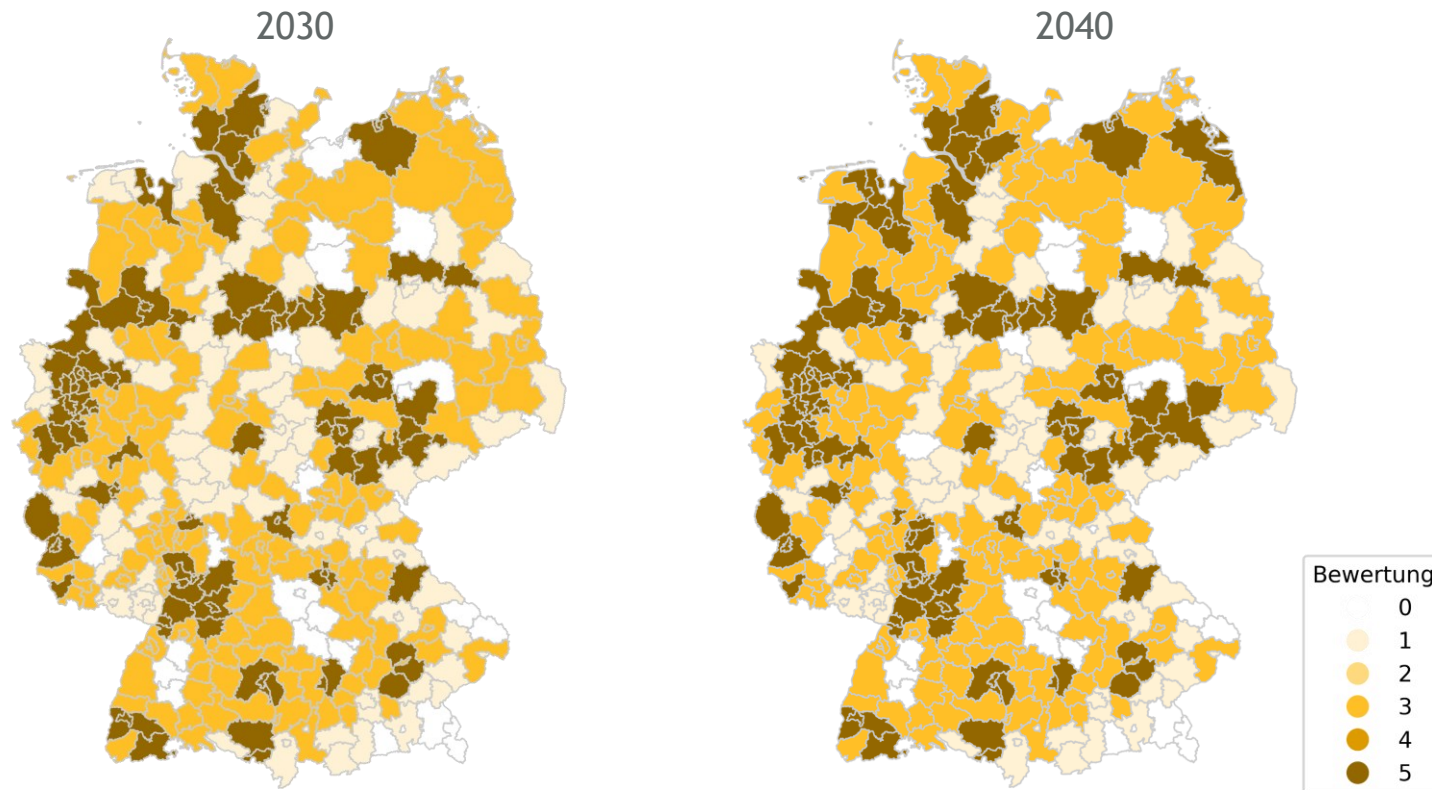
Der Zugang zum Höchstspannungsnetz ist insbesondere für größere Elektrolyseure aufgrund der hohen Anschlussleistung relevant.

Kleinere Elektrolyseure können auch an das Verteilnetz angeschlossen werden und benötigen somit keinen Zugang zum Höchstspannungsnetz.

1: ÜNB (2023) | 2: Da dieser Faktor die Distanz zum Höchstspannungsnetz fokussiert, werden leitungsverstärkende Maßnahmen mit potenziell positiven Auswirkungen auf die Systemdienlichkeit von Elektrolyseuren nicht berücksichtigt | 3: Niedrige Bewertung, da Trassenverläufe nicht im Detail bekannt sind und die Distanz zum Höchstspannungsnetz auch innerhalb einer Region hoch ausfallen kann.

Dichtes Höchstspannungsnetz vor allem in Industriegebieten

Höchstspannungsnetz



Erläuterungen

Im Jahr 2030 könnten laut dem Netzentwicklungsplan über 90% der Regionen einen Zugang zum Höchstspannungsnetz aufweisen (Bewertung ≥ 1).

Knotenpunkte mit einem dichten Netzausbau liegen vor allem in Industrieregionen.

Ein verstärkter Ausbau für die Zieljahre 2030 und 2040 findet vor allem in Regionen an der Küste statt, in denen Leitungen der Offshore-Windparks anlanden (Nord-Niedersachsen sowie Ost-Mecklenburg-Vorpommern).

Die Bewertung basiert auf dem aktuellen Entwurf des Kernnetzes

Datengrundlage

Mit einem Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz können vor allem große Elektrolyseure die überregionale Nachfrage bedienen. Das Kernnetz ermöglicht außerdem die Glättung von fluktuierender Erzeugung aus verschiedenen Quellen und bedarfsgetriebener Nachfrage.

Die Datenquelle basiert auf dem Entwurf des Kernnetzes von November 2023 der FNB Gas¹. In diesem wird die jährliche Entwicklung des Wasserstoff-Kernnetzes bis 2032 dargestellt.

Es werden folgende Annahmen zum verzögerten Ausbau² getroffen: Das Jahr 2030 entspricht dem Ausbauplan für das Jahr 2028 und das Jahr 2040 entspricht dem Wasserstoff-Kernnetz im Jahr 2032.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|------------------------------------|
| 0 | Keine Pipeline |
| 1 | Pipeline grenzt an Region |
| 2 | |
| 3 | Eine Pipeline in der Region |
| 4 | |
| 5 | Mehrere Pipelines oder Knotenpunkt |

Die Daten zur geplanten Infrastruktur des Wasserstoff-Kernnetzes werden in eine quantitative Bewertung überführt.

Analog zur Methodik beim Stromnetz werden Regionen mit mehreren Pipelines oder Knotenpunkten hoch bewertet. Regionen, bei denen eine Pipeline entlang der Grenze verläuft, erhalten eine niedrige Bewertung.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 0 | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 |

Insbesondere für größere Elektrolyseure ist ein Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz notwendig, da große Mengen Wasserstoff abtransportiert werden müssen. Mittlere Elektrolyseure können sowohl den produzierten Wasserstoff in das Verteilnetz als auch in das Transportnetz einspeisen.

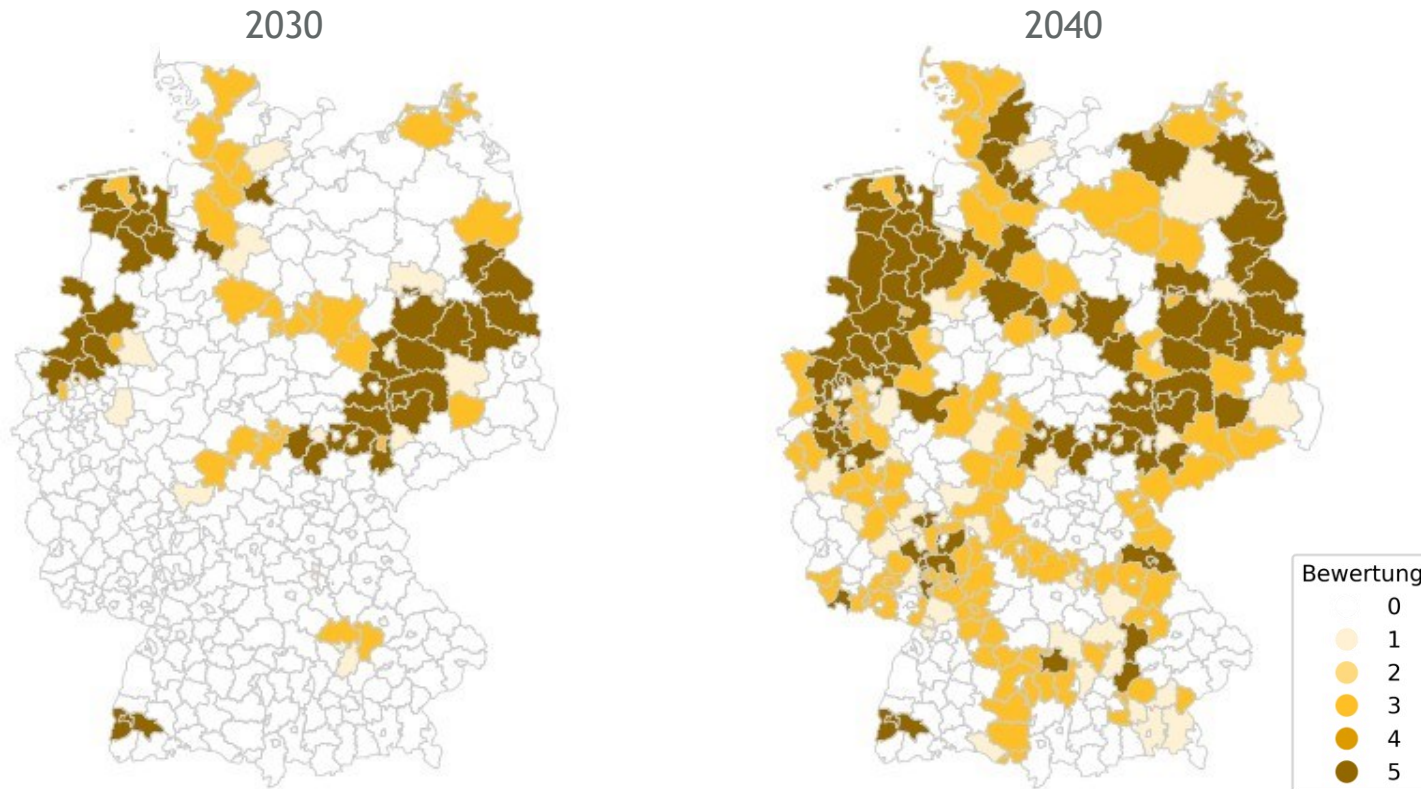
Für kleinere dezentrale Elektrolyseure ist ein Anschluss an das Verteilnetz oder die ggf. kostenintensivere Abfüllung in Trailer ausreichend.

1: FNB Gas (2023) | 2: Derzeit basieren die Pläne noch auf einer Fertigstellung des Netzes bis 2032. Durch die Verschiebung des Endzeitpunktes auf 2037 nehmen wir eine Verzögerung des dargestellten Ausbaus an.

Wasserstoff-Kernnetz - Ergebnisse

Zwischen 2030 und 2040 wird das Kernnetz stark ausgebaut

Wasserstoff-Kernnetz



Erläuterungen

Die Ergebnisse der Bewertung der einzelnen Regionen zeigen, dass bereits im Jahr 2030 wichtige Industrieregionen, wie das Ruhrgebiet und Gebiete in Ostdeutschland an das Kernnetz angeschlossen sein könnten. Dabei ist ein verstärkter Ausbau des Wasserstoff-Kernnetzes im Nordosten Deutschlands sowie an der Grenze zu den Niederlanden zu erkennen. Es würden allerdings 79 % der Regionen im Jahr 2030 noch keinen Zugang zum Kernnetz haben.

Im Jahr 2040 ist eine flächendeckende Ausbreitung des Wasserstoff-Kernnetzes mit Schwerpunkten im Nord-Westen und Nord-Osten geplant. 38 % der Regionen haben im Jahr 2040 voraussichtlich noch keinen (direkten) Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz.

Die Datengrundlage bildet der Gasnetzgebietstransformationsplan

Datengrundlage

Die Anbindung an ein lokales Wasserstoff-Verteilnetz oder -Anschlussnetz ermöglicht die Glättung der volatilen Produktion von Wasserstoff aus mehreren Quellen sowie die kostengünstige Verteilung an mehrere Abnehmer.

Die zukünftige Entwicklung des Wasserstoff-Verteilnetzes wurde auf Basis des Gasnetzgebietstransformationsplan (GTP) 2023 der Gasverteilnetzbetreiber¹ abgeschätzt. In diesem wird der Transformationspfad der Verteilnetze von den Gasverteilnetzbetreibern entwickelt.

Der GTP liefert prognostizierte Daten sowohl für 2030 als auch für 2040. Anhand der Angaben zu den Umstellzonen ergibt sich die geplante Umstellung der Erdgas-Verteilnetze auf Wasserstoff auf NUTS-3-Ebene.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|--------------------------------|
| 0 | Keine Umstellung |
| 1 | Umstellung von Teilen von USZ* |
| 2 | |
| 3 | Umstellung von einigen USZ* |
| 4 | |
| 5 | Umstellung aller USZ* |

* Umstellzonen

Die Daten zum Wasserstoff-Verteilnetz werden in eine quantitative Bewertung überführt. Die Bewertung ist abhängig vom Anteil der vollständig umgestellten Verteilnetze in der Region.

Es werden ausschließlich sogenannte Umstellzonen (Teilnetzgebiete) berücksichtigt, die Umstellungen auf 100 % Wasserstoff planen.²

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Die Gewichtung des Verteilnetzes in der Gesamtbewertung ist identisch für alle Elektrolyseleistungsklassen sowie im Zeitverlauf, da ein Verteilnetz für alle Elektrolyseurgrößen als Puffer dienen kann, um systemdienlich (volatil) produzierten Wasserstoff zu verteilen.

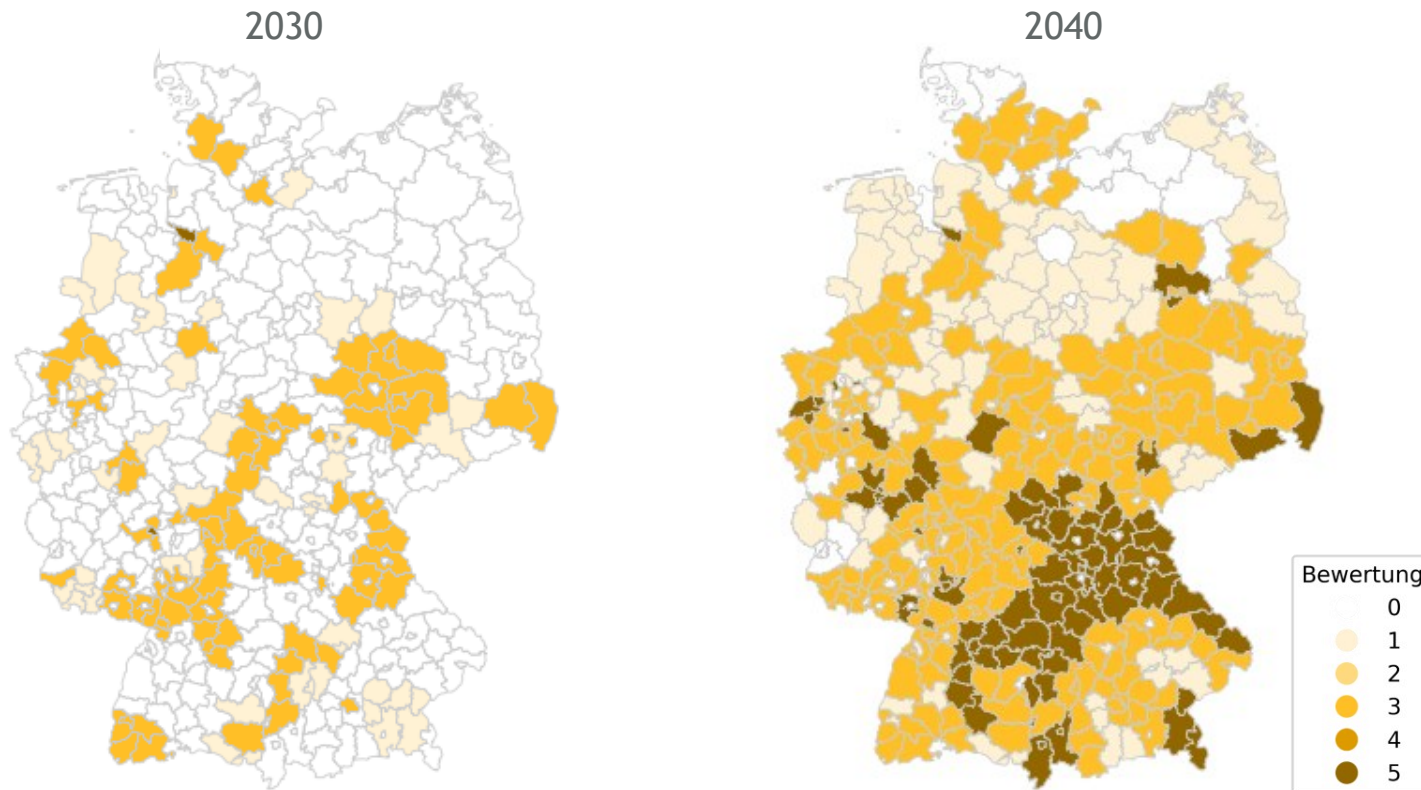
Ein Anschluss an ein Verteilnetz ist zudem aus Systemsicht vermutlich kostengünstiger als Sticleitungen zu Verbrauchenden oder die Trailerabfüllung von Wasserstoff.

1: H2vorOrt (2023) | 2: Vereinzelt Regionen nutzen in Zukunft klimaneutrales Methan oder geben keine Angaben zu den zukünftigen Umstellplänen.

Wasserstoff-Verteilnetz - Ergebnisse

Bis 2040 ist eine Umstellung vieler Regionen im Süden geplant

Wasserstoff-Verteilnetz



Erläuterungen

Im Jahr 2030 planen bereits einige Gasnetzbetreiber eine Teilumstellung auf Wasserstoff. Diese Regionen liegen insbesondere in Mittel- und Süddeutschland. In zwei Regionen ist bereits 2030 eine vollständige Umstellung auf Wasserstoff geplant (Bremen und Mainz) .

Bis 2040 könnten in einer Vielzahl an Regionen, vor allem in Süddeutschland, zu Teilen oder im Ganzen das Verteilnetz auf Wasserstoff umgestellt werden. In Norddeutschland ist bis 2040 keine flächendeckende Umstellung des Erdgasverteilnetzes auf Wasserstoff geplant. Hier befinden sich einige Regionen, die zukünftig (teilweise) klimaneutrales Methan nutzen.

Nicht alle Regionen, in denen das Verteilnetz auf Wasserstoff umgestellt werden könnte, sind nach aktueller Planung an das Kernnetz angeschlossen.

Datengrundlage

Aus Systemsicht können regionale Wasserstoff-Speicher eine systemdienliche (volatile) Produktion von Wasserstoff ermöglichen ohne dass Wasserstoff-Nachfrage oder hohe Wasserstoff-Transportkapazitäten vor Ort vorhanden sein müssen. Grundsätzlich eignen sich Salzkavernen und in eingeschränktem Maße Porenspeicher für die Wasserstoff-Speicherung.¹

Die Daten zu den Standorten bestehender Erdgasspeicher stammen vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.² Die Potenziale der für Wasserstoff-Speicherung geeigneten Salzstrukturen basieren auf dem Forschungsprojekt InSpEE.³ Es liegen keine Daten für Potenziale neuer Porenspeicher vor. Eine explizite Ausweisung von Kapazitäten erfolgt nicht. Die Datengrundlage gibt den aktuellen Stand wieder, sodass nicht zwischen 2030 und 2040 unterschieden wird.

1: EWI (2024c) | 2: LBEG (2023) | 3: Projekt InSpEE (2016)

Methodik

Bewertung

| | |
|---|-----------------------------|
| 0 | Keine Wasserstoff-Speicher |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | Geeignete Salzstrukturen |
| 4 | |
| 5 | Existierende Erdgasspeicher |

Die qualitativen Daten zu potenziellen Wasserstoff-Speichern werden in eine quantitative Bewertung überführt.

Existierende Erdgasspeicher erhalten eine höhere Gewichtung als geeignete Salzstrukturen, da hier eine mögliche Umwidmung angenommen wird, die kostengünstiger ist als der Neubau eines Wasserstoff-Speichers.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

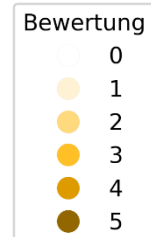
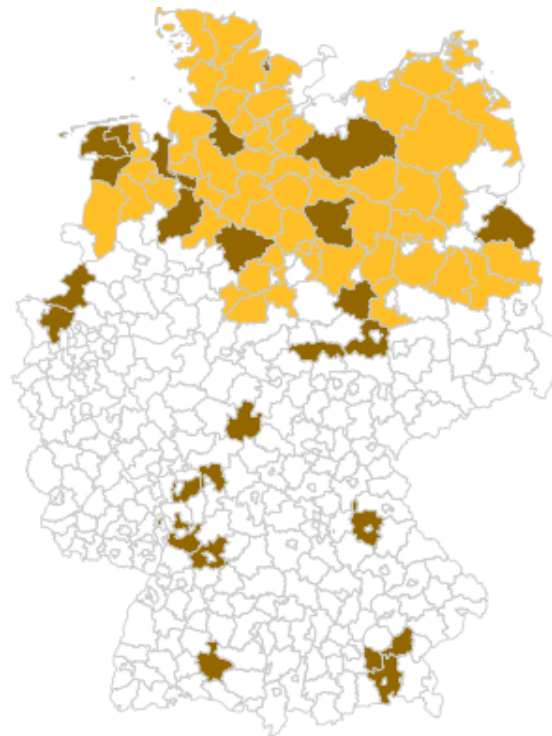
Bei einem systemdienlichen Betrieb von mittleren und größeren Elektrolyseuren kann eine fluktuierende Produktion durch den Zugang zu einem Speicher ausgeglichen werden. Allerdings wird dieser Faktor nicht hoch gewichtet, da das Kernnetz nach aktuellem Stand bis 2040 großzügig dimensioniert ist und keine Netzengpässe zu erwarten sind.

Aufgrund von geringen Produktionsmengen im Vergleich zur Speicherkapazität erhalten kleine Elektrolyseure die Gewichtung Null.

Potenzielle Wasserstoff-Speicher befinden sich in ganz Deutschland

Potenzielle Wasserstoffspeicher

2030 und 2040



Erläuterungen

Existierende Erdgasspeicher sind innerhalb Deutschlands verteilt, da Kavernenspeicher vor allem in Norden und Porenspeicher größtenteils im Süden verortet sind.

Potenzielle für die Errichtung zusätzlicher Salzkavernen zur Wasserstoff-Speicherung befinden sich in fast allen NUTS-3-Regionen im Norden Deutschlands.

Insbesondere im Norden könnten größere und mittlere Elektrolyseure entsprechend in vielen Regionen von einem regionalen Zugang zu einem Wasserstoff-Speicher profitieren. Allerdings ist weder die Höhe des zukünftigen Speicherbedarfs noch die genaue räumliche Verteilung der Wasserstoff-Speicher zum aktuellen Zeitpunkt bekannt.¹

1: EWI (2024c)

Die Datengrundlage bildet das KN100 Szenario der dena-Leitstudie

Datengrundlage

Durch die Nähe zu Verbrauchenden könnten zusätzliche Systemkosten, die durch den vermehrten Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur anfallen, vermieden werden.

Die szenariobasierte Wasserstoff-Nachfrage basiert auf der Nachfrage der Sektoren im KN100-Szenario der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität¹. Die Studie liefert Daten für 2030 und 2045. Die Werte für 2040 werden linear interpoliert.

Auf Basis dieses Szenarios wurde eine weiterführende Regionalisierung der Nachfrage durchgeführt. Die Regionalisierung erfolgte anhand verschiedener Kriterien (z. B. Industriestandorte, Bevölkerungsdichte) und umfasst die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und Elektrizität.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|---------------------|
| 0 | < 20 GWh/a |
| 1 | 20 - 300 GWh/a |
| 2 | 300 - 600 GWh/a |
| 3 | 600 - 1.000 GWh/a |
| 4 | 1.000 - 5.000 GWh/a |
| 5 | > 5.000 GWh/a |

Die Wasserstoff-Nachfragemenge je Region wird in Intervalle mit einer zugehörigen Bewertung von 0 bis 5 eingeteilt.

Regionen mit einer sehr geringen Nachfrage werden mit einer Null bewertet, da dort der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur vermutlich nicht rentabel ist.

Es gilt dieselbe Skala für beide Zieljahre.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |

Die Wasserstoff-Nachfrage ist relevanter für dezentrale Elektrolyseure, da Wasserstoff direkt bei den Verbrauchenden genutzt werden kann oder mit einem regionalen Netz verteilt wird.

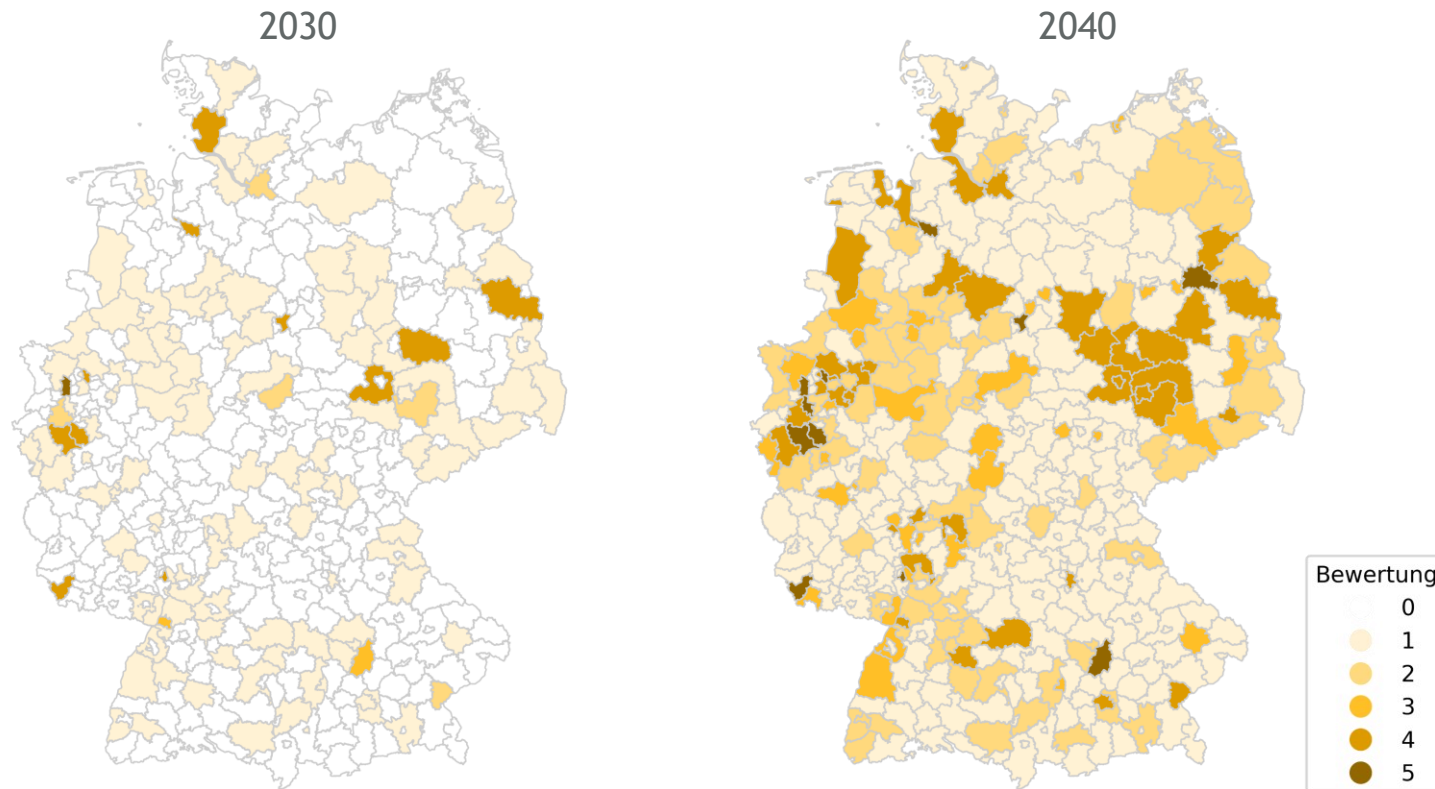
Die Relevanz nimmt mit der Größe der Elektrolyseure ab, da große Elektrolyseure vorwiegend an das Kernnetz angeschlossen werden und überregionale Nachfragen bedienen können.

1: EWI (2021). Dieses Szenario wurde aufgrund der guten internen Datengrundlage gewählt und stellt nur ein mögliches Szenario zum Erreichen der Klimaneutralität in Deutschland dar.

Wasserstoff-Nachfrage - Ergebnisse

2040 wird eine signifikante Wasserstoff-Nachfrage erwartet

Wasserstoff-Nachfrage



Erläuterungen

Der signifikante Anstieg der szenariobasierten Wasserstoff-Nachfrage von 2030 bis 2040 durch den Hochlauf der Wasserstoff-Wirtschaft ist auf ein zusätzliches Nachfragepotenzial aus dem Stromerzeugungssektor, dem Verkehrssektor und dem Gebäudesektor zurückzuführen. Während im Jahr 2030 noch 276 Regionen keine signifikante Wasserstoff-Nachfrage (Bewertung von Null) aufweisen, liegen im Jahr 2040 alle Regionen über dem Schwellenwert von 20 GWh/a.

In Regionen mit hohen Bewertungen befindet sich ein hohes Nachfragepotenzial der Industrie. Im Jahr 2030 weist nur eine Region (Duisburg) eine sehr hohe Nachfrage auf. Das Nachfragepotenzial steigt in 10 weiteren Regionen bis 2040 auf ein Niveau von mehr als 5.000 GWh pro Jahr.

Die Bewertung basiert auf Daten des EWI Merit-Order Tool

Datengrundlage

Bestehende Kraftwerksstandorte bieten Flächen und Infrastruktur für Elektrolyseure und können somit aus Systemsicht Kosten und Ressourcen einsparen.

Die Daten zu bestehenden Kraftwerken basieren auf dem „EWI Merit-Order Tool“. ¹ Das Tool bietet Standortdaten von bestehenden Kraftwerken sowie Daten zum jeweiligen Energieträger.

In der Bewertung werden zukünftig geplante Abschaltjahre für Stein- und Braunkohlekraftwerke berücksichtigt, da hier insbesondere die neu verfügbare Fläche und keine Nutzungskonkurrenz für vorhandene Infrastruktur ausschlaggebend sind. Dies führt trotz identischer Datengrundlage für den gesamten Zeitraum zu einer unterschiedlichen Bewertung für die Zieljahre 2030 und 2040 durch neue Abschaltungen zwischen den Zieljahren.

1: EWI (2024a)

Methodik

Bewertung

| | |
|---|-----------------------------------|
| 0 | Kein Kraftwerksstandort |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | Kraftwerksstandort (in Betrieb) |
| 4 | |
| 5 | Kraftwerksstandort (abgeschaltet) |

Die qualitativen Daten zu bestehenden Kraftwerksstandorten werden in eine quantitative Bewertung überführt.

An bestehenden Standorten könnten Elektrolyseure ergänzt werden.

Abgeschaltete Kraftwerksstandorte bieten sehr gute Infrastrukturvoraussetzungen.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

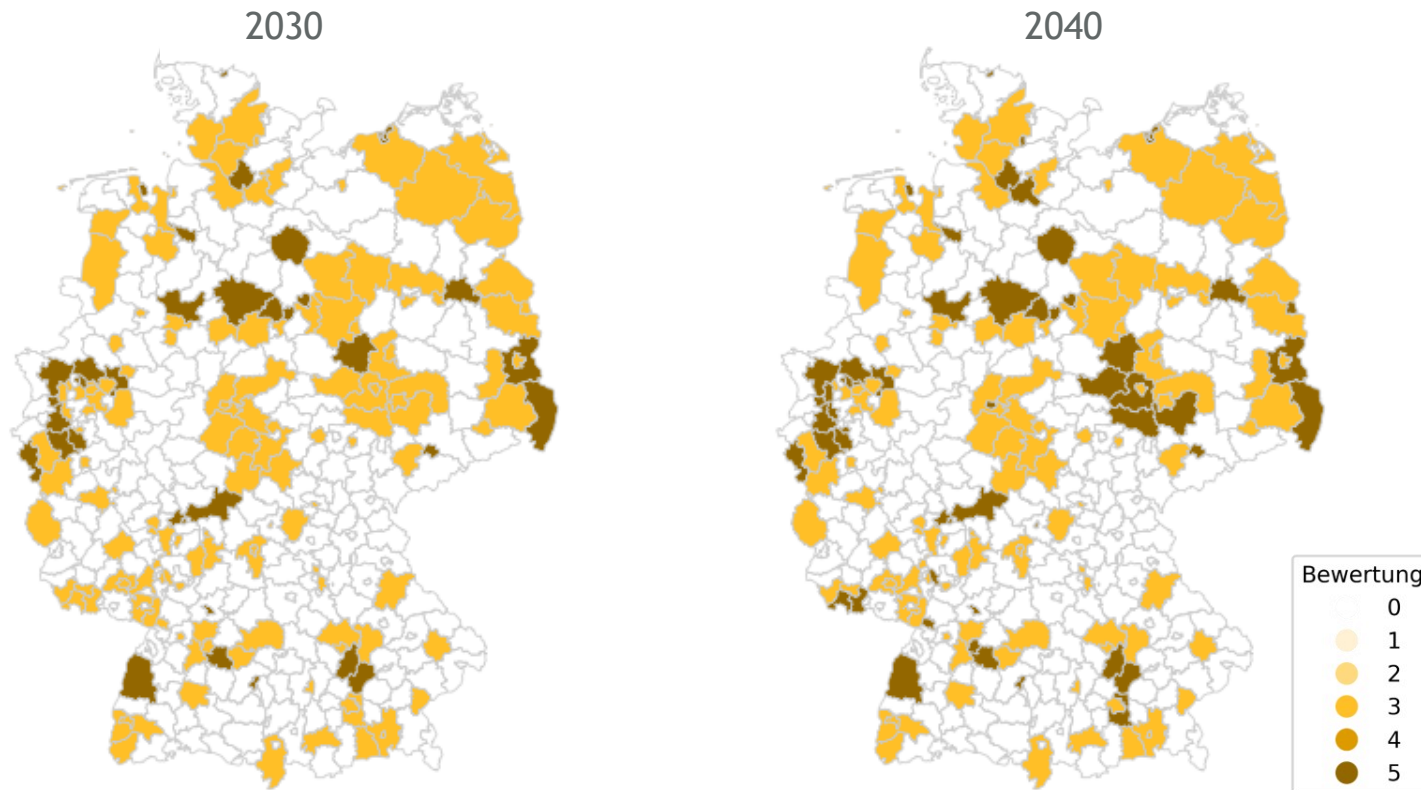
Insgesamt erhält dieser Faktor eine geringe Relevanz, da notwendige Infrastrukturanschlüsse bereits durch andere Kriterien abgedeckt werden.

Insbesondere größere Elektrolyseure könnten allerdings an Kraftwerksstandorten von einer Vielzahl von Standortfaktoren profitieren. Kleine Elektrolyseure haben weniger Anforderungen an die Infrastruktur und sind nicht auf die Standortfaktoren eines Kraftwerks angewiesen.

Kraftwerksstandorte - Ergebnisse

Bestehende Kraftwerke sind innerhalb Deutschlands verteilt

Kraftwerksstandorte



Erläuterungen

Bestehende Kraftwerke sind gleichmäßig über Deutschland verteilt. Somit können in allen Teilen Deutschlands Elektrolyseure von der vorhandenen Infrastruktur eines Kraftwerksstandortes profitieren.

Bereits 2030 sind einige Braun- und Steinkohlekraftwerke planmäßig abgeschaltet. Ein Cluster ist hier im Bereich des Rheinischen Braunkohlereviere zu sehen.

Zwischen 2030 und 2040 steigt durch den geplanten Kohleausstieg die Anzahl der Regionen deutlich, in denen ein Kraftwerk abgeschaltet wird (von 34 auf 53 Regionen).

Datengrundlage

Die Nutzung bereits erschlossener Flächen für zu errichtende Elektrolyseure kann den Kosten- und Ressourcenbedarf verringern.

Die Flächenverfügbarkeit basiert auf dem CORINE Land cover (CLC) Datensatz¹. Der Datensatz gibt die Fläche je Region für 44 Bodenstrukturklassen, die in 5 Kategorien zusammengefasst sind, an. Da aktuelle Daten verwendet werden, wird nicht zwischen den Zieljahren 2030 und 2040 unterschieden.

Zur Bewertung wurde die Summe der Flächen von sieben ausgewählten Bodenstrukturklassen der Kategorie künstliche Oberflächen gebildet.² Wohn- und Freizeitgebiet, landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie Wälder und Moore werden von der Flächenverfügbarkeit exkludiert.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|-----------------------------|
| 0 | Keine Flächenverfügbarkeit |
| 1 | 0 - 5,5 km ² |
| 2 | 5,5 - 10,4 km ² |
| 3 | 10,4 - 15,3 km ² |
| 4 | 15,3 - 25,1 km ² |
| 5 | > 25,1 km ² |

Für die Bewertung der Flächenverfügbarkeit werden die kumulierten verfügbaren Flächen betrachtet. Die Bewertungsintervalle werden durch Perzentile³ bestimmt (20., 40., 60., 80. und über dem 80. Perzentil).

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

Die Flächenverfügbarkeit ist für größere Elektrolyseure aufgrund des höheren Flächenbedarfs wichtiger.

Die Gewichtung der Flächenverfügbarkeit fällt insgesamt gering aus, da der Flächenbedarf von Elektrolyseuren im Vergleich zu anderen Industrieanlagen gering ist. Zudem ist eine grundlegende Flächenverfügbarkeit in jeder Region gegeben.

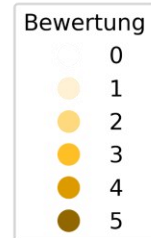
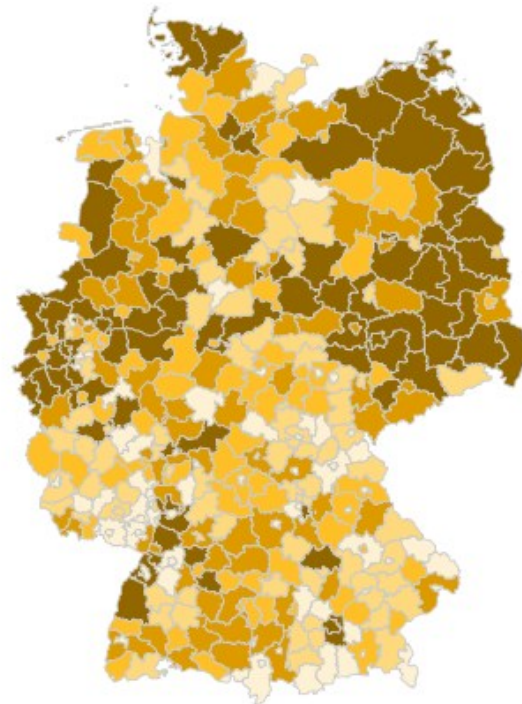
1: Copernicus (2018) | 2: Industrie- oder Gewerbegebiete, Straßen- und Schienennetze, Häfen, Flughäfen, Mineralabbaugebiete, Mülldeponien und Baustellen | 3: Perzentil: x % der Daten liegen unter dem x. Perzentil

Flächenverfügbarkeit - Ergebnisse

Im Norden etwas höhere Flächenverfügbarkeit als im Süden

Flächenverfügbarkeit

2030 und 2040



Erläuterungen

Insbesondere im Nordosten und (Nord)westen sind viele Regionen hoch bewertet. Großflächige Projekte profitieren von einer hohen Flächenverfügbarkeit im Norden und Osten Deutschlands.

Die Bewertung der Regionen basiert auf der absoluten Flächenverfügbarkeit und nicht auf ihrem Anteil im Verhältnis zur gesamten Region. Dies erklärt, warum in den größeren nordöstlichen Regionen deutlich mehr verfügbare Fläche vorhanden ist. Betrachtet man darüber hinaus die Verfügbarkeit von Flächen als Prozentsatz der Gesamtfläche der Region, so ist festzustellen, dass die höchste Flächenverfügbarkeit in den kleinsten Regionen oder in den Regionen mit erheblicher industrieller Aktivität zu finden ist.

Die Bewertung basiert auf der Heat Roadmap Europe 4

Datengrundlage

Die Abwärme von Elektrolyseuren könnte für die Deckung von Gebäudewärme genutzt werden¹. Aus systemischer Perspektive könnte somit eine zusätzliche Wärmeerzeugung und der damit verbundene Kosten- und Ressourcenbedarf reduziert werden.

Der Wärmebedarf aller Bestandsgebäude in Deutschland basiert auf dem „Heat Roadmap Europe 4“ Projekt². Die Daten wurden aufbereitet auf der Plattform „sEnergies Open Data“³ zur Verfügung gestellt. Für 2015 wurden tatsächliche Daten verwendet, für 2050 wurden zwei Szenarien modelliert.

Für 2030 und 2040 werden die Daten durch eine lineare Interpolation auf Basis des „Baseline“ Szenarios berechnet.

Methodik

Bewertung

| | |
|---|------------------|
| 0 | Kein Wärmebedarf |
| 1 | 0 - 1.737 TJ |
| 2 | 1.737 - 2.474 TJ |
| 3 | 2.474 - 3.422 TJ |
| 4 | 3.422 - 5.427 TJ |
| 5 | > 5.427 TJ |

Die Bewertung wird anhand der Gesamtwärmenachfrage je Region auf Basis von Perzentilen⁴ (20., 40., 60., 80. und über dem 80. Perzentil) vorgenommen.

Es wird dieselbe Skala für beide Zieljahre verwendet, sodass die absolute Wärmenachfrage in beiden Jahren verglichen werden kann.

Gewichtung

| 2030 | | | 2040 | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Da Elektrolyseure bei systemdienlichem (volatilem) Betrieb nicht als einzige Wärmequelle z. B. für Fernwärme genutzt werden können und in Konkurrenz zu industrieller Abwärme stehen, wird die Wärmenachfrage gering gewichtet.

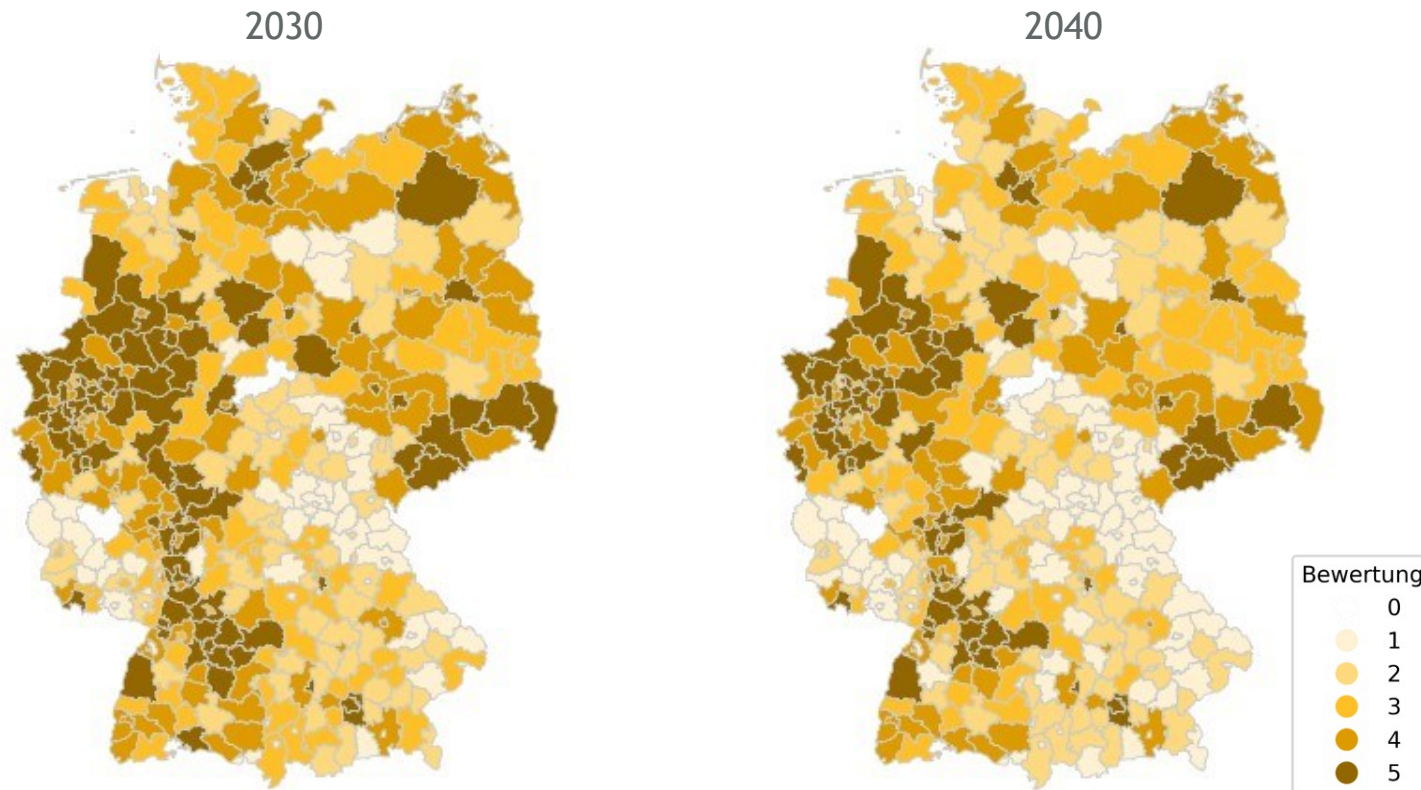
Es wird dieselbe Gewichtung für alle Leistungsklassen angenommen. Während kleine und mittlere Elektrolyseure ggf. dezentraler (näher an den Wärmeabnehmern) lokalisiert sind, fällt bei größeren Elektrolyseuren mehr Abwärme an.

1: In der Datengrundlage wird das Temperaturniveau der Wärmenachfrage nicht ausgewiesen. Die Nutzung eines Elektrolyseurs zur Wärmebereitstellung ist jedoch nicht für alle Temperaturniveaus möglich | 2: Heat Roadmap Europe (2018) | 3: sEnergies Open Data (2020, 2022) | 4: Perzentil: x % der Daten liegen unter dem x. Perzentil

Wärmenachfrage - Ergebnisse

Eine Konzentration ist in städtischen Regionen sichtbar

Wärmenachfrage



Erläuterungen

In beiden Zeiträumen ist eine hohe Wärmenachfrage insbesondere in städtischen Regionen zu sehen. Ein Cluster des Wärmebedarfs ist im Westen und Südwesten sowie im Osten Deutschlands zu sehen. Wenige Regionen weisen eine geringe Wärmenachfrage auf.

Insgesamt sinkt der absolute Wert der Wärmenachfrage zwischen 2030 und 2040 aufgrund von Effizienzgewinnen und besserer Dämmung. Die Bewertung von Regionen mit einer hohen Wärmenachfrage bleibt dabei im Zeitverlauf größtenteils konstant, so dass die Konzentration der Nachfrage und potenziell geeignete Gebiete für Elektrolyseure sich nicht verändern.

Da für drei NUTS-3-Regionen keine Daten für 2015 vorliegen, werden diese mit Null bewertet.

3. Gesamtbewertung der Regionen

Variation der Gewichtung für Leistungsklassen und Jahre

Überblick über die Gewichtung aller Standortfaktoren

| Elektrolyse-Leistungsklasse | 2030 | | | 2040 | | |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} | <10 MW _{el} | 10-50 MW _{el} | >50 MW _{el} |
| EE-Potenzial | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Redispatch Maßnahmen | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 |
| Strom-Höchstspannungsnetz | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| Wasserstoff-Kernnetz | 0 | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 |
| Wasserstoff-Verteilnetz | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Wasserstoff-Speicher | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Wasserstoff-Nachfrage | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| Kraftwerksstandorte | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Flächenverfügbarkeit | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Wärmenachfrage | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Erläuterungen

Die Gesamtbewertung erfolgt auf Basis der Bewertung der Faktoren sowie der Gewichtung der Faktoren für die jeweilige Elektrolyse-Leistungsklasse. Die Gewichtung eines Faktors spiegelt wider, wie groß der Einfluss des Faktors auf die mögliche systemdienliche Verortung und den Betrieb ist. Eine Gewichtung von Null bedeutet, dass der Faktor nicht einschränkend auf die Systemdienlichkeit wirkt.

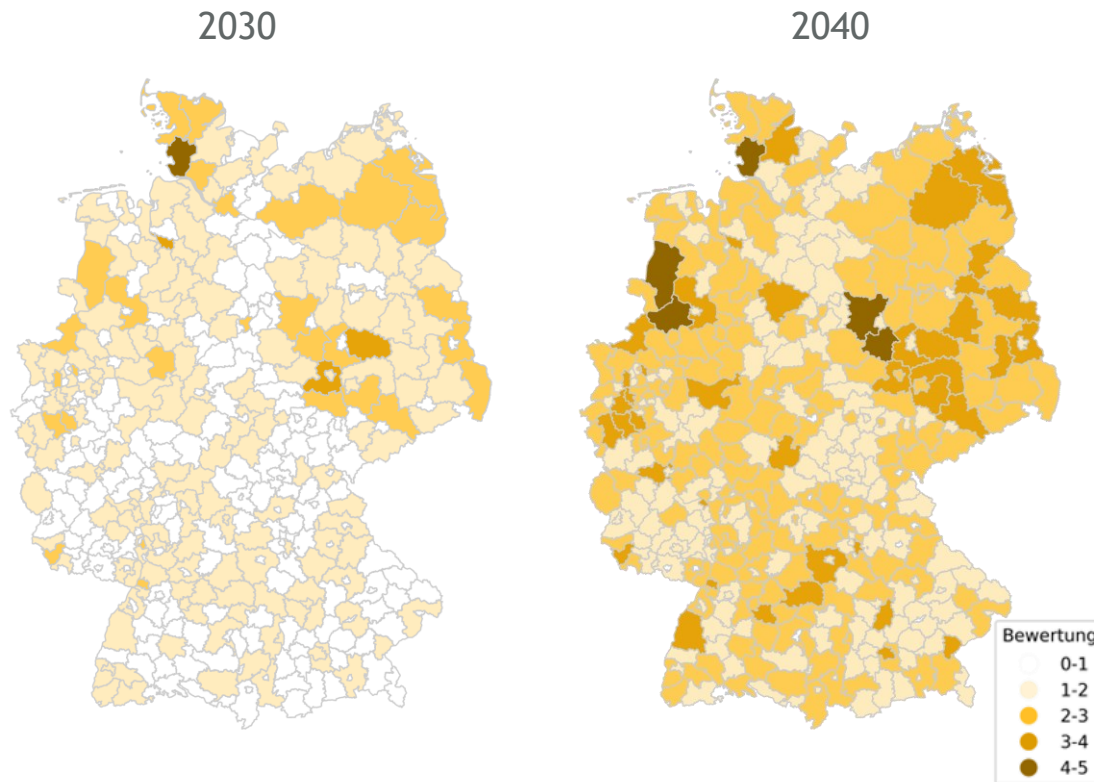
Das regionale EE-Potenzial ist dabei für alle Elektrolyse-Klassen besonders relevant. Bei kleineren Elektrolyseuren hat außerdem die regionale Wasserstoff-Nachfrage eine hohe Relevanz, bei größeren Elektrolyseuren ist das Wasserstoff-Kernnetz hingegen wichtiger. Zusätzlich können größere Elektrolyseure lokale Redispatch-Maßnahmen abwenden und damit systemdienlich eingesetzt werden.

Kleinere Elektrolyseure weisen weniger einflussnehmende Faktoren auf als Elektrolyseure mit größerer Leistung und haben somit mehr Freiheitsgrade bei der Wahl der Standorte.

Gesamtbewertung - Leistungsklasse < 10 MW

Systemdienliche Regionen über Deutschland verteilt

Ergebnisse



Erläuterung

Ausschlaggebend für die systemdienliche Platzierung von kleinen Elektrolyseuren ist eine hohe Nachfrage verbunden mit einem hohen regionalen EE-Potenzial. Im Jahr 2030 weist diese Elektrolyseklasse lediglich vier Regionen mit einer guten oder sehr guten Bewertung (≥ 3) der Systemdienlichkeit auf, z. B. in Dithmarschen und im Mitteldeutschen Chemiedreieck.

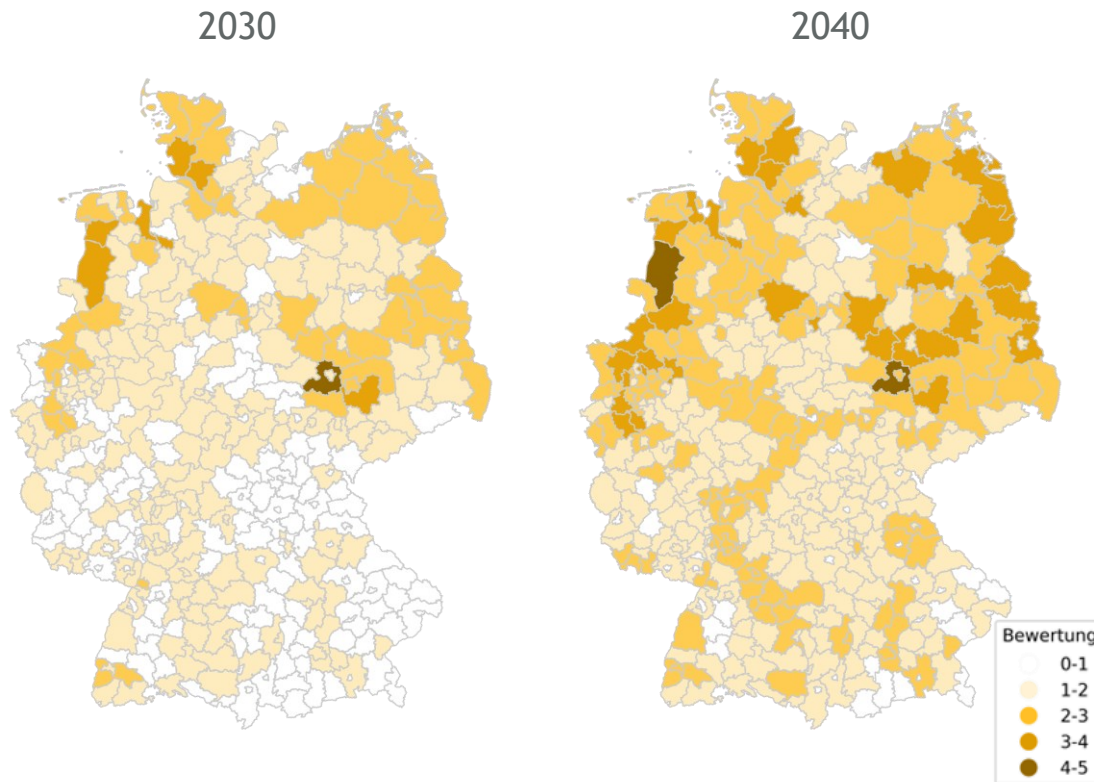
Im Jahr 2040 werden für kleine Elektrolyseure verschiedene Regionen in ganz Deutschland als systemdienlich eingestuft aufgrund von flächendeckenden EE-Potenzialen und regionaler Wasserstoff-Nachfrage aus allen Sektoren. Insgesamt 45 Regionen erhalten eine Bewertung ≥ 3 , z. B. in Norddeutschland, Mitteldeutsches Chemiedreieck, Brandenburg, Rheinland und Süddeutschland.

Zusätzlich können Elektrolyseure dieser Leistungsklasse bei systemdienlichem Betrieb als flexible Last Einspeisespitzen dezentraler EE-Anlagen ausgleichen und den Ausbau der Verteilnetze entlasten. Dieser Aspekt ist zum Teil bereits durch die EE-Potenziale der unteren Spannungsebenen in dieser Analyse berücksichtigt. Zukünftig könnte die Teilnahme von Verteilnetzbetreibern am Redispatch 2.0 und die entsprechenden Veröffentlichungspflichten die Datengrundlage zur systemdienlichen Platzierung für Verteilnetze ergänzen.

Gesamtbewertung - Leistungsklasse 10 - 50 MW

Systemdienlichkeit durch Wasserstoff-Netz und EE-Potenziale

Ergebnisse



Erläuterung

Die Systemdienlichkeit der mittleren Leistungsklasse wird ebenfalls von den verfügbaren EE-Potenzialen und der Wasserstoff-Nachfrage getrieben. Zusätzlich werden sowohl Redispatch-Maßnahmen als auch der Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz relevanter.

Im Jahr 2030 ist auch in dieser Leistungsklasse erkennbar, dass unter den hier getroffenen Annahmen nur wenige Regionen als systemdienlicher Standort eingestuft werden. Acht Regionen weisen eine Bewertung ≥ 3 auf, z. B. im Emsland und in Schleswig-Holstein und in Mitteldeutschland. Grund dafür ist vor allem der ausstehende Wasserstoff-Markthochlauf und das noch nicht vollständig ausgebaute Wasserstoff-Kernnetz.

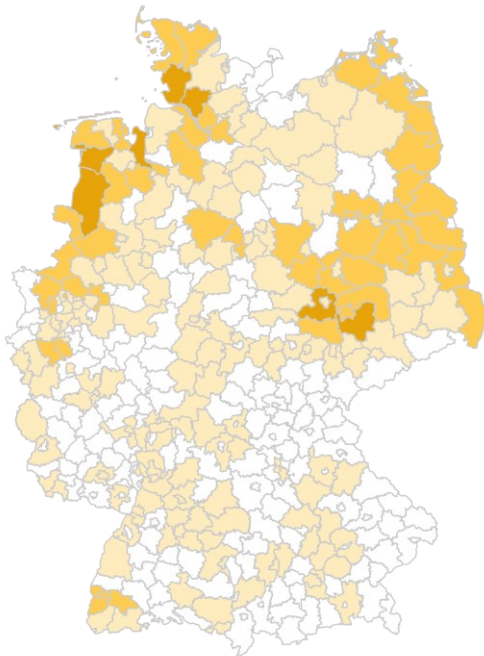
Im Jahr 2040 werden in dieser Analyse insgesamt 36 Regionen mit guten bis sehr guten Bedingungen für die Systemdienlichkeit eingestuft (Bewertung ≥ 3). Es handelt sich dabei vor allem um Regionen mit guten EE-Potenzialen, die einen Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz aufweisen. Vor allem im Süden ergibt sich für diese Leistungsklasse aber auch die Möglichkeit, regionale Abnehmer zu versorgen oder in ein regionales Wasserstoff-Verteilnetz einzuspeisen und damit zur Systemdienlichkeit beizutragen.

Gesamtbewertung - Leistungsklasse > 50 MW

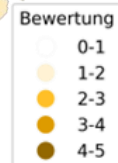
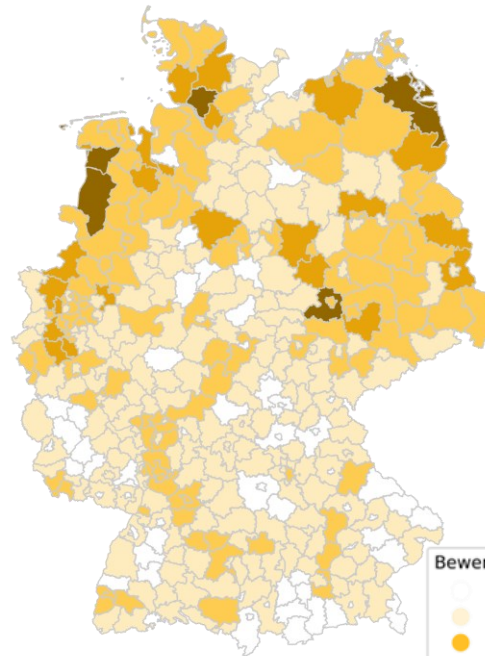
Redispatch und Wasserstoff-Kernnetz sind Treiber

Ergebnisse

2030



2040



Erläuterung

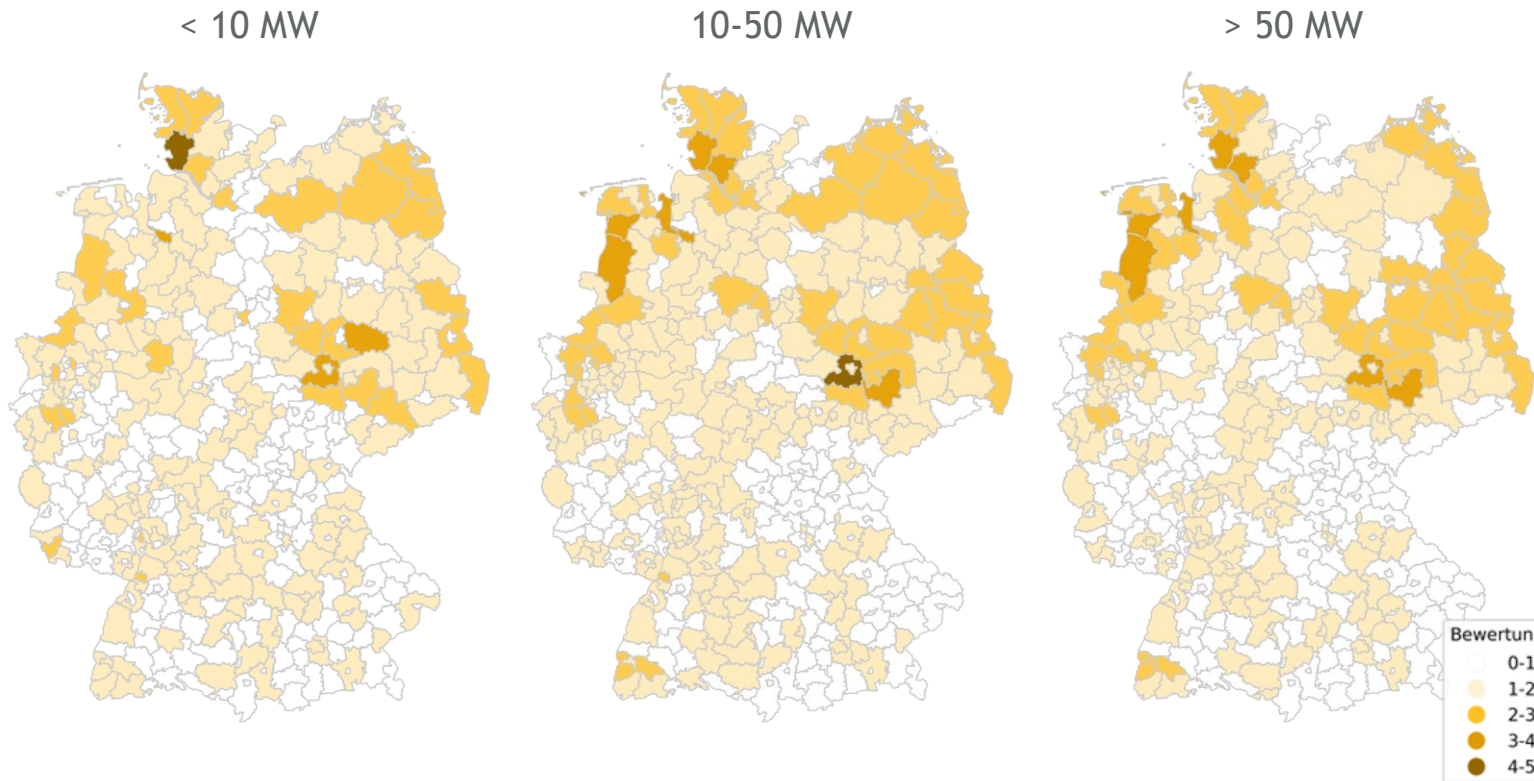
Auch für Elektrolyseure der Leistungsklasse > 50 MW sind systemdienliche Standorte über Deutschland verteilt, wobei sich im Jahr 2030 die acht Regionen mit einer guten bis sehr guten Bewertung (≥ 3) in der Nordhälfte Deutschlands befinden.

Im Jahr 2040 steigt die Anzahl gut oder sehr gut bewerteter Regionen auf 29. Sehr gut bewertete Regionen verbinden einen regionalen EE-Überschuss, der ggf. nicht abtransportiert werden kann und zu Redispatch-Maßnahmen führt, mit einem Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz. Besonders hohe EE-Potenziale werden in dieser Leistungsklasse vor allem durch die Offshore-Wind-Anlandungspunkte getrieben.

Gesamtbewertung - 2030

Im Jahr 2030 werden wenige Regionen sehr gut bewertet

Ergebnisse



Erläuterung

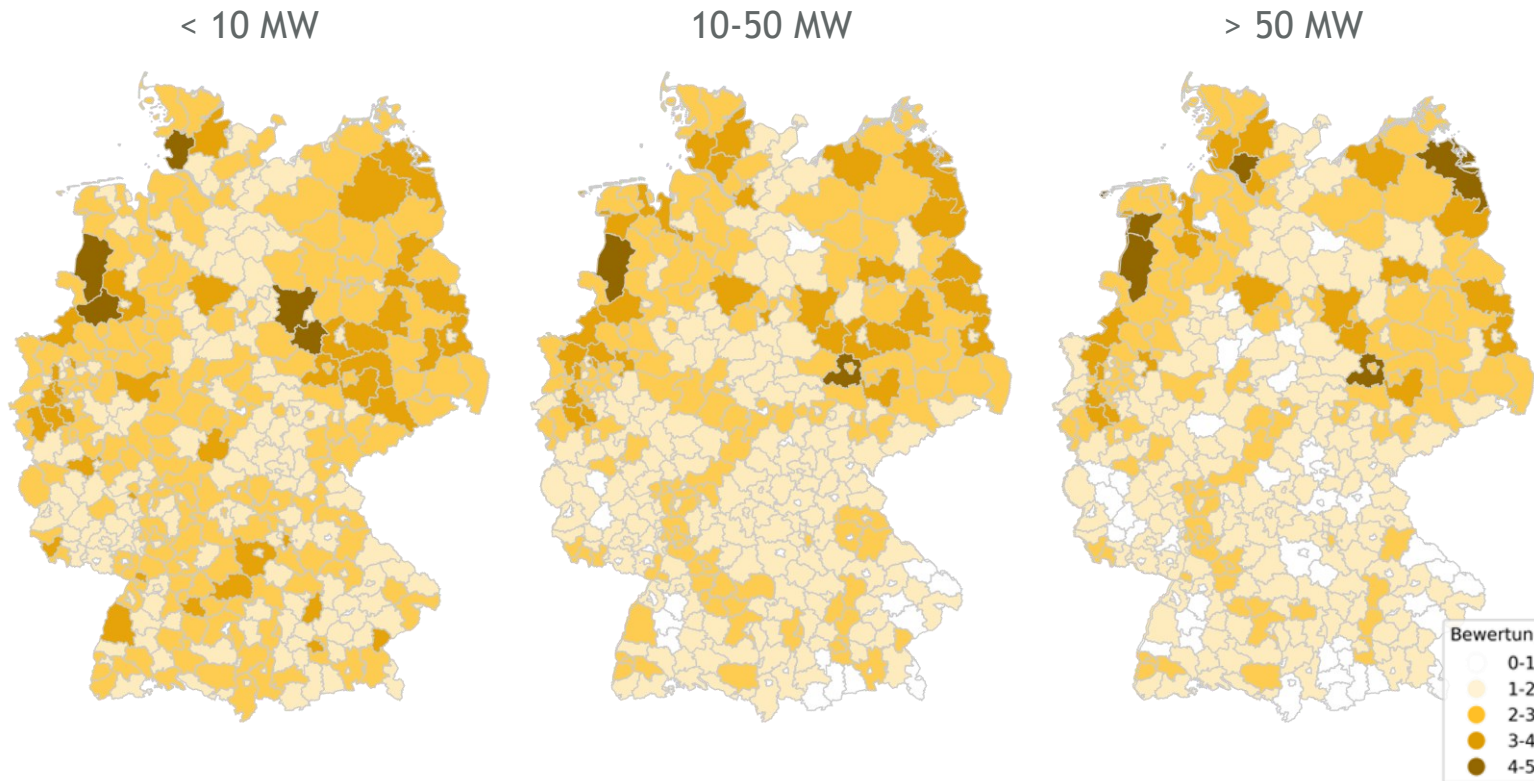
Im Jahr 2030 weisen nur wenige Regionen eine gute bis sehr gute Bewertung (≥ 3) für systemdienliche Elektrolyseprojekte auf, unabhängig von der Leistungsklasse. Grund dafür ist vor allem der ausstehende Wasserstoff-Markthochlauf und der Ausbau der Infrastruktur.

Einige Regionen werden für alle Leistungsklassen als systemdienlich eingestuft. Für mittlere und große Elektrolyseure ist die Verortung wichtiger, da sie einen größeren Einfluss auf das Energiesystem haben. Kleine Elektrolyseure weisen den Vorteil auf, dass sie nahezu überall platziert werden könnten, ohne einen negativen Einfluss auf das System zu haben (z. B. zusätzliche Ressourcen oder Kosten).

Gesamtbewertung - 2040

Deutlich mehr Regionen erhalten eine höhere Bewertung als 2030

Ergebnisse



Erläuterung

Aufgrund der höheren Wasserstoff-Nachfrage und dem Ausbau der Wasserstoff-Netze ergibt sich insgesamt eine höhere Bewertung der Systemdienlichkeit der Regionen als im Jahr 2030. Im Jahr 2030 sind weniger als zehn Regionen je Leistungsklasse als (sehr) gut bewertet, 2040 sind dies für alle Leistungsklassen mindestens 29 Regionen.

Für die Systemdienlichkeit von kleinen Elektrolyseuren weisen die meisten Regionen gute bis sehr gute Bedingungen auf. Für mittlere und große Elektrolyseure verlagern sich die systemdienlichen Standorte in die Nordhälfte Deutschlands und in die Nähe von Industriezentren. Aber auch hier finden sich Regionen mit einer Bewertung ≥ 3 über ganz Deutschland verteilt.

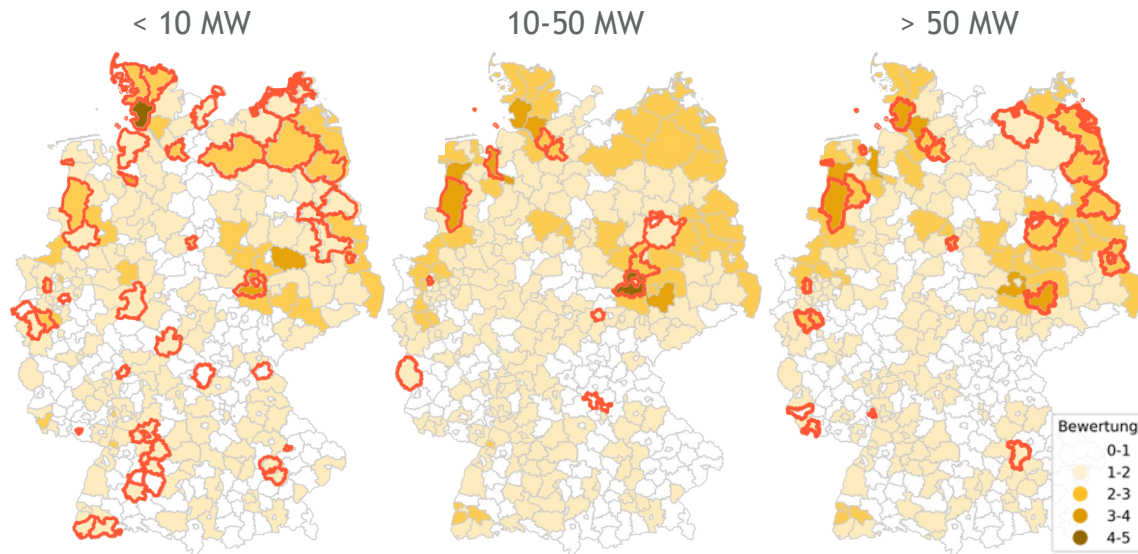
4. Einordnung der Ergebnisse

Vergleich mit aktuellen Elektrolyseprojekten

Elektrolyseure bis 2030 nur teilweise systemdienlich platziert

Regionen mit geplanten Elektrolyseuren¹ bis 2030 in rot

Vergleich mit der Bewertung der Systemdienlichkeit für das Jahr 2030



| Leistungsklasse | < 10 MW | 10 - 50 MW | > 50 MW |
|--|---------|------------|---------|
| Durchschnittliche Bewertung der Regionen mit geplanten Projekten | 1,63 | 2,29 | 2,28 |
| Durchschnittliche Bewertung aller Regionen | 1,10 | 1,26 | 1,22 |

Erläuterung

Derzeit geplante Elektrolyse-Projekte sind laut Datengrundlage der H₂-Bilanz¹ in ganz Deutschland verteilt. Bei der Verortung aktueller Projekte bestehen keine Anreize zur Berücksichtigung der Systemdienlichkeit, die über betriebswirtschaftliche Aspekte hinausgehen. Alle Elektrolyseklassen weisen Projekte in Regionen auf, die in diesen Untersuchungen als nicht systemdienlich eingestuft werden.

Bei allen Leistungsklassen liegen einige Projekte bereits in Regionen, die in dieser Analyse mit (sehr) gut hinsichtlich der systemdienlichen Verortung bewertet werden. Mittlere und große Elektrolyseure sind v. a. in Regionen im Norden geplant, die größtenteils in dieser Analyse als systemdienlich eingestuft werden. Bei diesen Leistungsklassen liegt die durchschnittliche Bewertung der Regionen höher als im gesamtdeutschen Durchschnitt.

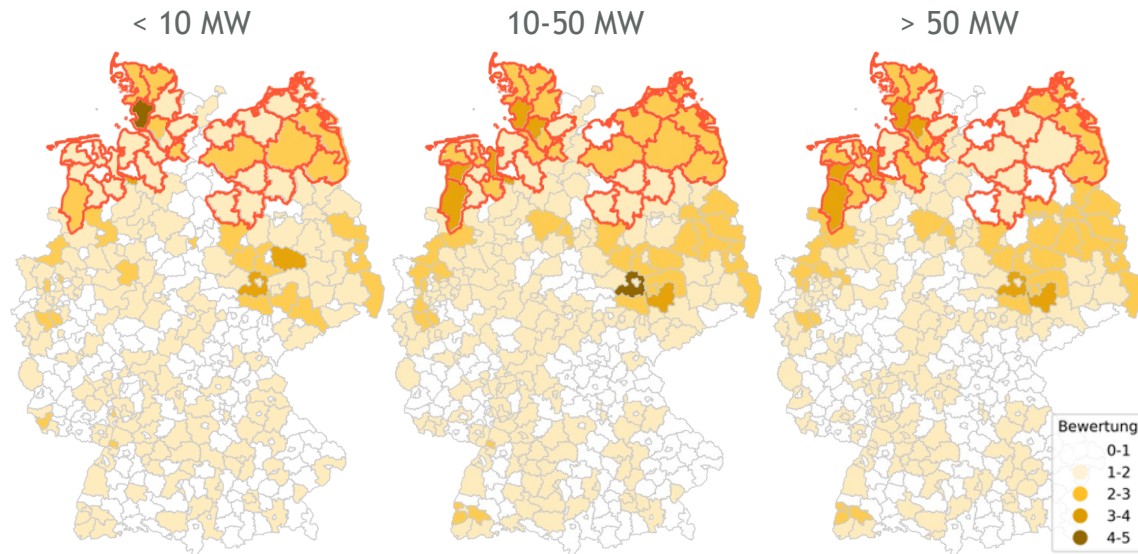
Allerdings sind Elektrolyseure aller Leistungsklassen auch in Regionen geplant, die in dieser Analyse niedrig bewertet werden. Insbesondere Regionen im Süden, aber auch vereinzelte Regionen im Norden erhalten allerdings eine niedrige Bewertung. Eine ausschließlich systemdienliche Verortung von Elektrolyseprojekten scheint ohne externe Anreize unwahrscheinlich

1: EWI (2024b)

Netzdienliche Platzierung zuschaltbarer Lasten

Entlastungsregionen der ÜNB¹ in rot

Vergleich mit der Bewertung der Systemdienlichkeit für das Jahr 2030



| Leistungsklasse | < 10 MW | 10 - 50 MW | > 50 MW |
|---|---------|------------|---------|
| Durchschnittliche Bewertung der Entlastungsregionen | 1,48 | 1,99 | 2,00 |
| Durchschnittliche Bewertung aller Regionen | 1,10 | 1,26 | 1,22 |

Erläuterung

§ 13k EnWG regelt die Nutzung von überschüssigem Strom durch zuschaltbare Lasten. Die Definition von sogenannten Entlastungszonen¹ erfolgte durch die ÜNB und basiert auf historischen Daten der Abregelung sowie Erfahrungswerten.

Verglichen mit den Ergebnissen dieses Gutachtens erhalten die von den ÜNB ausgewiesenen Entlastungsregionen durchschnittlich eine höhere Bewertung zur Verortung von systemdienlichen Elektrolyseuren. Allerdings weisen einige Regionen trotz guter EE-Potenziale eine geringe Bewertung auf, da dort weder eine regionale Wasserstoff-Nachfrage noch ein Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz vorhanden ist. Ein netzdienlicher Betrieb könnte durch die Nutzung von EE-Überschüssen gewährleistet sein. Ein systemdienlicher Betrieb der Elektrolyse ist allerdings in den Entlastungsregionen nur möglich, wenn der Wasserstoff regional genutzt oder abtransportiert werden kann.

Aggregiert über alle Leistungsklassen liegen im Jahr 2030 etwa 50 % der Regionen mit einer Bewertung ≥ 3 in den Entlastungsregionen, im Jahr 2040 nur etwa 25 %. Potenziell systemdienliche Regionen könnten somit durch die ausschließliche Betrachtung stromnetzdienlicher Faktoren im Rahmen der Entlastungsregionen nicht berücksichtigt werden.

1: ÜNB (2024)

Regionen \neq Standort

Das Gutachten bewertet NUTS-3-Regionen in Deutschland hinsichtlich der übergeordneten Eignung als systemdienlicher Standort für Elektrolyseure basierend auf zehn Faktoren. Eine hohe Bewertung bedeutet, dass eine Region viele Standortfaktoren vereint, die zur Systemdienlichkeit eines Elektrolyseurs beitragen könnten. Eine hohe Bewertung bedeutet nicht, dass im Detail ein geeigneter Standort in der Region vorliegt, der alle Standortfaktoren vereint. Das vorliegende Gutachten soll Hinweise für die Standortsuche liefern. Für reale Projekte ist eine standortscharfe Untersuchung notwendig.

Systemdienlichkeit \neq Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Regionen erfolgt hinsichtlich der systemdienlichen Verortung von Elektrolyseuren. Dass der Betrieb eines Elektrolyseurs in einer Region systemdienlich ist, bedeutet nicht, dass der Betrieb in dieser Region auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht vorteilhaft sein muss. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Elektrolyse-Standorten ist nicht Teil dieses Gutachtens.

Geringe Bewertung \neq Untauglichkeit

Eine geringe Bewertung einer Region bedeutet nicht, dass es in dieser Region keine geeigneten Standorte für Elektrolyseure geben kann. Zum einen könnte es wirtschaftlich attraktive Standorte in der Region geben. Zum anderen unterliegt die regionsscharfe Bewertungsmethodik sowie die Datengrundlage, z. B. hinsichtlich der Redispatch-Maßnahmen, Limitationen. Beispielsweise bei kleinen Elektrolyseuren ist die Bewertung vor allem durch die regionalen EE-Potenziale und die Wasserstoff-Nachfrage getrieben. Wenn Regionen klein und Potenziale und Nachfrage in angrenzenden Regionen vorhanden sind, könnte es auch in Regionen mit geringer Bewertung geeignete Standorte für einen systemdienlichen Elektrolyseur geben.

Szenario \neq Prognose

Bei einem Szenario handelt es sich um eine mögliche Entwicklung und nicht um eine Prognose der Zukunft. So unterliegen z. B. der zukünftige EE-Zubau und die Wasserstoff-Nachfrage erheblichen Unsicherheiten. So kann die Verortung von systemdienlichen Standorten in Zukunft durch veränderte Rahmenbedingungen von der vorliegenden szenariobasierten Analyse abweichen.

5. Fazit

Potenziell systemdienliche Standorte über Deutschland verteilt

Zusammenfassung

Systemdienlichkeit ist ein entscheidender Baustein in der Dekarbonisierung des Energiesystems, um Kosten, Ressourcen und Emissionen zu sparen. Vor allem bei Elektrolyseuren wird häufiger über einen systemdienlichen Standort und Betrieb gesprochen, wobei der Begriff bisher nicht eindeutig definiert ist.

Das vorliegende Gutachten bewertet NUTS-3-Regionen in Deutschland hinsichtlich der Eignung als systemdienlicher Standort für Elektrolyseure basierend auf zehn Faktoren. Die Ergebnisse zeigen, dass eine systemdienliche Verortung von Elektrolyseuren je nach Leistungsklasse in allen Teilen Deutschlands erfolgen könnte.



Ausschlaggebende Kriterien

Für eine systemdienliche Verortung nehmen sowohl wasserstoff- als auch stromnetzfoкусиerte Faktoren eine wichtige Rolle ein.

Für eine (sehr) gute Bewertung der Systemdienlichkeit kleinerer Elektrolyseure sind vor allem die EE-Potenziale und die Wasserstoff-Nachfrage relevant. Bei größeren Elektrolyseuren verschiebt sich der Einfluss der Nachfrage auf den Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz.

Im Jahr 2040 könnte eine deutlich höhere Anzahl an Regionen durch den anstehenden Wasserstoff-Markthochlauf (sehr) gut für den systemdienlichen Einsatz von Elektrolyseuren geeignet sein.



Ausblick

Eine ausschließlich systemdienliche Verortung von bisher geplanten Projekten ist kaum erkennbar. Diese könnte durch eine Förderung nach Mindest-Kriterien erfolgen, die das Gesamtsystem berücksichtigen. Dabei sollte die Förderung für Systemdienlichkeit nicht durch vordefinierte Regionen eingegrenzt werden.

Insbesondere kleinere, dezentrale Elektrolyseure können kurz- bis mittelfristig den Markthochlauf unterstützen und langfristig von der Definition diverser Kriterien profitieren, da nahezu deutschlandweit systemdienlich verortet werden könnten.





EWI - Eine Wissensfabrik

Das EWI ist gemeinnützig und versteht sich als Wissensfabrik mit dem Ziel, neues Wissen über zunehmend komplexe Energiemärkte zu schaffen, zu verbreiten und nutzbar zu machen.

Forschungs- und Beratungsprojekte

Das EWI forscht und berät zu zunehmend komplexen Energiemärkten - praxisnah, energieökonomisch fundiert und agenda-neutral.


Neuste volkswirtschaftliche Methoden

Das EWI analysiert den Wandel der Energiewelt mit neusten volkswirtschaftlichen Methoden und detaillierten computergestützten Modellen.

EWI Academy

Das EWI bietet Trainings zu aktuellen energiewirtschaftlichen Themen für Unternehmen, Politik, NGOs, Verbände sowie Ministerien an.

KONTAKT

 Dr.-Ing. Ann-Kathrin Klaas
ann-kathrin.klaas@ewi.uni-koeln.de
+49 (0)221 650 85368

 <https://www.ewi.uni-koeln.de>

 @ewi_koeln

 EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln

BMWK (2023). Nationale Wasserstoffstrategie.

URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=9, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

BMWK (2024). Einigung zur Kraftwerksstrategie.

URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240205-einigung-zur-kraftwerksstrategie.html>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

Copernicus (2018). CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly.

URL: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024

energate messenger (2024a). Norddeutsche Länder fordern Rahmen für Elektrolyseure.

URL: <https://www.energate-messenger.de/news/241607/norddeutsche-laender-fordern-rahmen-fuer-elektrolyseure>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

energate messenger (2024b). Der Süden fürchtet Nachteile beim Wasserstoffhochlauf.

URL: <https://www.energate-messenger.de/news/242765/der-sueden-fuerchtet-nachteile-beim-wasserstoffhochlauf>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

Eurostat (2022). Statistical regions in the European Union and partner countries - NUTS and statistical regions 2021.

URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/15193590/KS-GQ-22-010-EN-N.pdf>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

EWI (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.

URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/dena-ls2/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

EWI (2024a). EWI Merit-Order Tool 2023.

URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/ewi-merit-order-tool-2023/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

EWI (2024b). Datengrundlage der H2-Bilanz.

URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/datengrundlage-fuer-die-h2bilanz-2024-1-halbjahr/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

EWI (2024c). Die Bedeutung von Wasserstoffspeichern - Eine Analyse der Bedarfe, Potenziale und Kosten.

URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/die-bedeutung-von-wasserstoffspeichern/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

Fraunhofer (2023). Regionalisierung des Ausbaus der erneuerbaren Energien.

URL: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-06/Studie_Regionalisierung_EE_IEE.pdf, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

FNB Gas (2023). Wasserstoff-Kernnetz.

URL: <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

H2vorOrt (2023). Der Gasnetzgebietstransformationsplan - Ergebnisbericht.

URL: <https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Publikationen/Ergebnisbericht-2023-des-GTP.pdf>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

Heat Roadmap Europe (2018). About HRE4.

URL: <https://heatroadmap.eu/project/>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

LBEG (2023). GeoBerichte 49 - Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2022.

URL: https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_49_2023, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

MaStR (2023).

URL: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Datendownload>, letztes Aufrufdatum: 15.05.2024.

Netztransparenz (2024). Redispatch.

URL: <https://www.netztransparenz.de/de-de/Systemdienstleistungen/Betriebsf%C3%BChrung/Redispatch>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

Projekt InSpEE (2016). Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft).

URL:

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/InSpEE_Abschlussbericht.pdf;jsessionid=486FD63EBB63A50D3A844087BB0028D8.internet002?__blob=publicationFile&v=4, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

sEEnergies Open Data (2020, 2022).

URL: https://s-eenergies-open-data-euf.hub.arcgis.com/search?categories=%252Fcategories%252Fd5.1%2C%252Fcategories%252Fd5.2%2C%252Fcategories%252Fseenergies_heat, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

ÜNB (2023). Netzentwicklungsplan 2037/2045.

URL: <https://www.netzentwicklungsplan.de/nep-aktuell/netzentwicklungsplan-20372045-2023>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

ÜNB (2024). § 13K ENWG „Nutzen statt Abregeln“ - Umsetzungskonzept der Übertragungsnetzbetreiber gemäß § 13K ABS. 6 S. 2 ENWG.

URL: https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/systemdienstleistungen/betriebsf%C3%BChrung/nutzen-statt-abregeln/%C3%BCnb-umsetzungskonzept-gem%C3%A4%C3%9F-13k-abs-6-enwg/2024-04-01_%C3%BCnb-umsetzungskonzept%20%C2%A713k%20enwg.pdf, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

VDE (2022). Netzdienliche Integration von Elektrolyseuren.

URL: <https://www.vde.com/resource/blob/2226594/279eaea65a48407ecbd2227be6f190e9/netzdienliche-integration-von-elektrolyseuren-data.pdf>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.

VDE FNN (2021). Ermittlung Netzanschlusspunkt für Anlagen nach EEG/KWKG.

URL: <https://www.vde.com/resource/blob/2243824/d6839169827fe6e93527a9a7188bfc14/fnn-hinweis-ermittlung-netzanschlusspunkte-fuer-anlagen-nach-eeg-kwkg-data.pdf>, letztes Aufrufdatum: 12.06.2024.