

Abschlussbericht

EC-regional – Zeitnahe Berechnung regional aufgelöster jährlicher EE-Stromerzeugung auf Basis von Klima-Reanalysedaten

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft, München	Förderkennzeichen: AZ 38462/01-23
Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg	Fördermittelgeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Vorhabenbezeichnung: EC-regional - Zeitnahe Berechnung regional aufgelöster jährlicher EE-Stromerzeugung auf Basis von Klima-Reanalysedaten	
Projektbeginn: 01.10.2022 Laufzeit des Vorhabens: 18 Monate, von 10/22 bis 03/2024	
Berichtszeitraum: 01.10.2024 bis 01.06.2024	
Projektleiter: Prof. Bruno Burger, Connor Thelen	

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
1. Zusammenfassung.....	4
2. Motivation und Zielsetzung des Projektes	4
3. Arbeitspakete	4
AP 0: Projektmanagement	5
AP 1: Briefing und Kickoff für alle Beteiligten	5
AP 2: Berechnung der regionalen Einspeisung von Solar und Wind.....	5
Anlagendaten aus dem Marktstammdatenregister (MaStR).....	5
Wetterdatensatz ERA5	6
Berechnung der Erzeugungsleistung von Windkraftanlagen	7
Simulation der Einspeisung durch PV-Anlagen	8
Ergebnisse und Validierung.....	8
AP 3: Berechnung der regionalen Einspeisung anderer Quellen	10
Blockscharfe Erzeugungszeitreihen.....	10
Differenz aus gesamter Erzeugung und blockscharfer Erzeugung.....	10
Aufteilung der Differenz auf die Bundesländer.....	10
AP 4: Visualisierung der regionalen Daten.....	12
Leistung – Stromerzeugung.....	13
Leistung – Installierte Leistung.....	14
Energie – Säulendiagramme zur Stromerzeugung	15
Energie – Säulendiagramme der Bundesländer	15
Energie – Kreisdiagramme zur Stromerzeugung.....	16
Energie – Anteile Erneuerbarer Energien.....	18
AP 5: Veröffentlichung der regionalen Daten	19
4. Ergebnisse	20
5. Diskussion des Projektverlaufs und der Projektergebnisse	20
6. Fazit	21
Literatur.....	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodik für die Berechnung der regionalen Einspeisung von Wind- und PV	5
Abbildung 2: Installierte Kapazität von Windkraft und PV-Anlagen auf Landkreisebene (Ende 2022) ..	6
Abbildung 3: Mittelung der Wetterdaten auf NUTS-3 Ebene am Beispiel der Windgeschwindigkeit....	6
Abbildung 4: Leistungskurven für Windkraftanlagen.....	7
Abbildung 5: Strahlungsarten auf ein PV-Modul und beispielhafte Wirkungsgradkurve eines PV-Moduls.....	8
Abbildung 6: Vergleich der ÜNB-Daten (Tennet) mit den Modellergebnissen für WKAs (Februar, 2022)	9
Abbildung 7: Vergleich der ÜNB-Daten (TransnetBW) mit den Modellergebnissen für PV (Woche 24, 2022).....	9
Abbildung 8: Übersicht der Menüoptionen	12
Abbildung 9: Gesamte Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein in Woche 20 2024	13
Abbildung 10: Gesamte Nettostromerzeugung aus Solarenergie in allen Bundesländern in Woche 20 2024	13
Abbildung 11: Nettozubau installierter Wind- und Solarleistung pro Fläche in Deutschland im Jahr 2024 bis März 2024.....	14
Abbildung 12: Jahresenergien der gesamten Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein	15
Abbildung 13: Gesamte Nettostromerzeugung aus Wind- und Solarenergie vom 1. Januar 2024 bis zum 16. Mai 2024 bezogen auf die Einwohnerzahl der jeweiligen Bundesländer	16
Abbildung 14: Kreisdiagramme zur gesamten Nettostromerzeugung in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2023	17
Abbildung 15: Jährlicher Anteil Erneuerbarer Energien an der gesamten Nettostromerzeugung in Brandenburg.....	18
Abbildung 16: Navigation zu den Energy-Charts Regional	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete.....	4
---	---

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „EC-regional“ wurde eine innovative Methode zur zeitnahen Berechnung der regional aufgelösten, stündlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EE) entwickelt. Ziel des Projekts war es, detaillierte und aktuelle Daten zur EE-Stromerzeugung auf Bundeslandebene bereitzustellen, um Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit präzise Informationen für die Energiewende bereitzustellen. Durch den Einsatz von Klima-Reanalysedaten und einem speziell entwickelten Modellierungsansatz konnten hochaufgelöste Erzeugungsdaten generiert werden, welche die Stromproduktion von Wind- und Solarenergieanlagen stündlich abbilden. Zusätzlich wurde das Verfahren auch auf andere Erzeugungsarten angewendet, indem blockscharfe Erzeugungszeitreihen und das Marktstammdatenregister (MaStR) genutzt wurden, um die gesamte Energieerzeugung auf regionaler Ebene zu erfassen und darzustellen.

Auch die graphische Aufbereitung und Veröffentlichung der Daten auf den Energy-Charts ist im Rahmen dieses Projektes umgesetzt worden.

Diese umfassenden Daten tragen dazu bei, die Transparenz im Energiebereich auch auf Bundesländer-Ebene zu erhöhen und fundierte Entscheidungen zur Förderung erneuerbarer Energien zu unterstützen.

2. Motivation und Zielsetzung des Projektes

Die Energiewende hin zu einem klimaneutralen Energiesystem ist eine große deutsche Generationenaufgabe. Nur durch eine zügige Dekarbonisierung aller Sektoren sind die Klimaschutzziele Deutschlands zu erreichen. Bevölkerung und Politik sind sich bei der Bedeutung der Klimaschutzziele zwar einig, jedoch gehen die jeweiligen Vorstellungen bei der Umsetzung auseinander und werden teils kontrovers diskutiert.

In diesem Kontext stellen die Energy-Charts als umfassende, transparente Plattform mit Informationen zu Stromerzeugung und zum Strommarkt, Emissionen und Klimadaten eine wichtige Datenquelle für einen sachlichen Diskurs über aktuelle Themen der Energiewende (Kohleausstieg, Emissionen, Import-/Exportsaldo, Ausbau der Windkraft und weitere) dar.

Während es für die oben genannten Parameter verschiedene Datenquellen für die Werte auf nationaler Ebene gibt, bestehen derzeit keine öffentlich verfügbaren Informationsangebote mit aktuellen Daten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf lokaler Ebene. Es fehlen regional aufgelöste Daten zur Erzeugung von Anlagen basierend auf Erneuerbaren Energien (EE). Journalisten und Entscheider benötigen aktuelle Daten, um den lokalen Fortschritt beim Ausbau der erneuerbaren Energien einschätzen zu können.

3. Arbeitspakete

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete mit ihren Arbeitsschritten dargestellt:

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

Arbeitspakete	3. Quartal 22	4. Quartal 22	1. Quartal 23	2. Quartal 23	3. Quartal 23	4. Quartal 23	1. Quartal 24
AP 0 Projektmanagement							
AP 1 Briefing und Kickoff für alle Beteiligten							
AP 2 Berechnung der regionalen Einspeisung von Solar Wind							
AP 3 Berechnung der regionalen Einspeisung anderer Quellen							
AP 4 Visualisierung der regionalen Daten							
AP 5 Veröffentlichung der regionalen Daten							

AP 0: Projektmanagement

Alle Aufgaben im Rahmen dieses Arbeitspakets konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

AP 1: Briefing und Kickoff für alle Beteiligten

Der Kickoff-Termin mit allen im Projekt beteiligten Mitarbeitern hat wie geplant in Q3 2022 stattgefunden. Neben dem Leiter der Gruppe Energiesysteme und Energiewirtschaft, Dr. Christoph Kost und Prof. Dr. Bruno Burger, waren Tobias Reuther (Datenanalyse und Aufbereitung), Connor Thelen (Inhaltliche Projektleitung und Modellentwicklung) und Leonhard Probst (Visualisierung und Veröffentlichung der Daten) Teil des Projektteams.

AP 2: Berechnung der regionalen Einspeisung von Solar und Wind

Da auf Bundesländer-Ebene keine Daten- und Messzeitreihen zur aktuellen Einspeisung von Windkraftanlagen (WKA) und PV-Anlagen zur Verfügung stehen, sind Berechnungen erforderlich, um die Stromerzeugung für ausgewählte Regionen abzuschätzen. Entsprechend wurde ein Modell entwickelt, um die Stromerzeugung aus WKA und PV-Anlagen auf Bundeslandebene in Deutschland auf stündlicher Basis und mit minimalem zeitlichem Verzug zu berechnen.

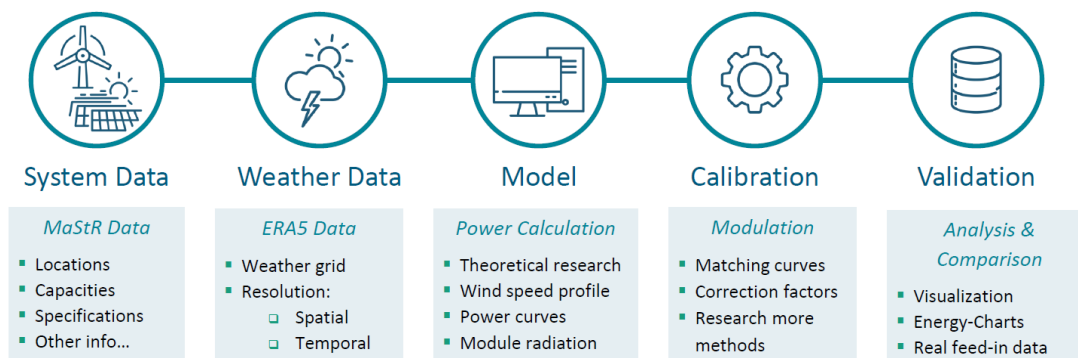


Abbildung 1: Methodik für die Berechnung der regionalen Einspeisung von Wind- und PV

Der verwendete Ansatz zur Berechnung der Wind- und PV-Stromerzeugung in Deutschland kann in fünf Abschnitte unterteilt werden. Die Zusammenstellung und Verarbeitung der wichtigsten Eingabedaten bilden den ersten und zweiten Abschnitt, die Modellierung der Leistungsberechnungen den dritten Abschnitt und die Validierung und Kalibrierung des Modells die Abschnitte vier und fünf.

Anlagendaten aus dem Marktstammdatenregister (MaStR)

Innerhalb des MaStR werden alle Erzeugungsanlagen des deutschen Strom- und Gasmarktes erfasst. Das MaStR erweist sich somit als essenzielles zentrales Register, in welchem Anlagenstammdaten wie Standortinformationen oder technische Anlagendaten zu finden sind. Da das MaStR unter Anderem Daten zu allen Stromerzeugungseinheiten in Deutschland enthält, ist die Anzahl der Dateneinträge beträchtlich. Nach einer Auswertung am 28. Mai 2024 beträgt die Gesamtzahl der MaStR-Einträge für WKA 36.176 Einheiten und für Solaranlagen 4.176.952 Einheiten. [1]

Da das Ziel dieses Projektes darin besteht, die Stromerzeugung auf Bundesländerebene zu berechnen, ist eine Methode zum Clustering der Eingabedaten durch ein regionales Modell aus mehreren Gründen sinnvoll.

Zunächst erhöht dies die Geschwindigkeit des Modells, indem die Anzahl der Datenpunkte und folglich die Anzahl der Rechenoperationen erheblich reduziert wird. Damit passt sich ein regionales Modell an die Größe und den Umfang des Projekts an und bietet einen kohärenteren und

handhabbaren Rahmen. Dadurch lässt sich ebenfalls der zeitliche Verzug zwischen Wetterdaten und simulierten Einspeisedaten minimieren. Schließlich ist es nicht notwendig, die Erzeugung jeder einzelnen Anlage zu berechnen, insbesondere da die Auflösung der Wetterdatensätze dies nicht zulässt. Folglich wurde eine Methodik entwickelt, welche sowohl die Anlagendaten als auch Wetterdaten auf Landkreisebene (NUTS-3) clustert (siehe Abbildung 2).

Das Ergebnis dieses Clusters ist es, dass für jede NUTS-3 Region jeweils eine Referenz-Windkraftanlage sowie 8 Referenzsolaranlagen (jeweils vier für die Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen) abgeleitet werden. Diese entsprechen in ihren technischen Spezifikationen den leistungsgemittelten Daten aller Anlagen einer NUTS-3 Region. Durch das Clustern reduziert sich der Rechenaufwand von knapp 3 Millionen Anlagen auf 401 Windkraftanlagen sowie 3208 Solaranlagen.

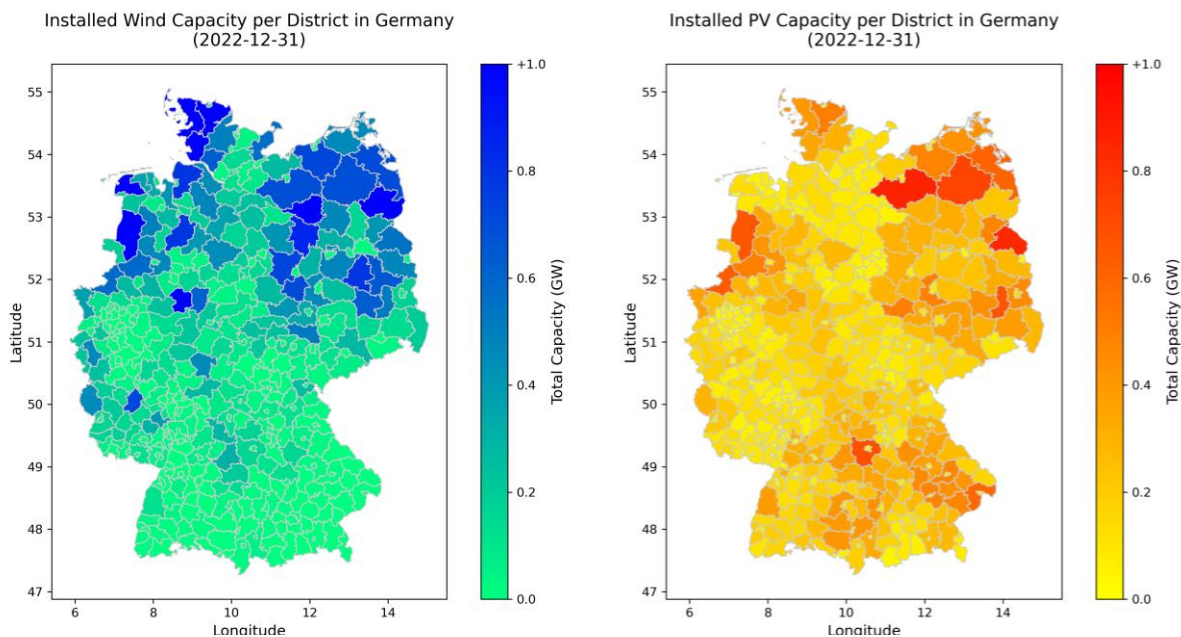


Abbildung 2: Installierte Kapazität von Windkraft und PV-Anlagen auf Landkreisebene (Ende 2022)

Wetterdatensatz ERA5

Wetterdaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sind eine wichtige Voraussetzung für die Erreichung des Simulationszieles einer hohen Genauigkeit, da diese in der Modellsimulation in hohem Maße von der Qualität der Wetterdaten abhängt.

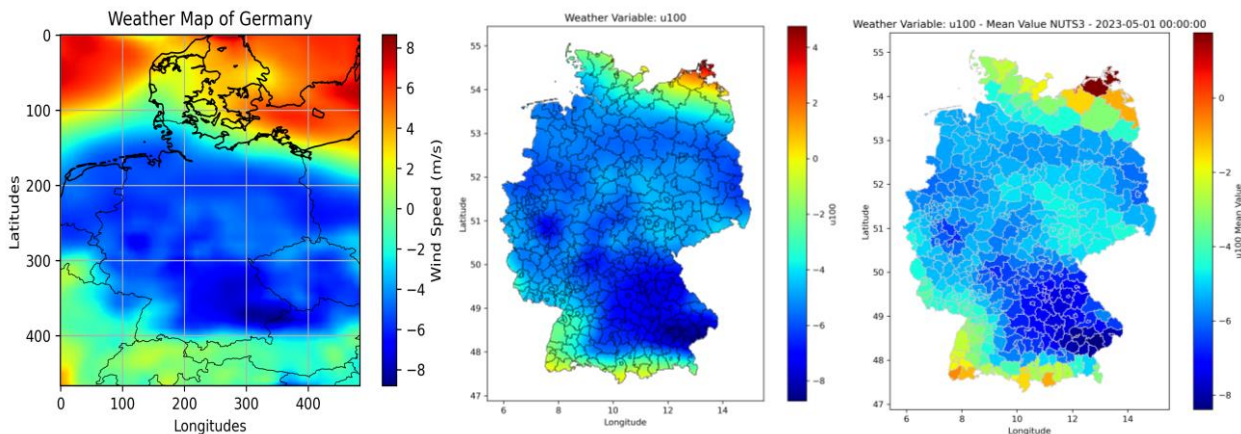


Abbildung 3: Mittelung der Wetterdaten auf NUTS-3 Ebene am Beispiel der Windgeschwindigkeit

Die vom ECMWF entwickelten ERA5-Reanalysedaten sind aufgrund ihrer Eigenschaften die optimale Wahl für die Simulation der Solar- und Windenergieerzeugung. Mit einer hohen räumlichen Auflösung bei einer Rastergröße von etwa 31x31 Kilometern und einer zeitlichen Auflösung von 60 Minuten ermöglicht ERA5 die präzise Erfassung von lokalen Wettermustern. [2]

Die dabei bereitgestellte, umfassende Palette an Wettervariablen, einschließlich der Temperatur, Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen, Solarstrahlungsdaten oder Oberflächenbeschaffenheit, erfüllen die Anforderungen, um den Wind- und PV-Ertrag zu simulieren. Der ERA-5 Datensatz beinhaltet darüber hinaus nicht nur die Daten für einen langen Zeitraum in der Vergangenheit, sondern stellt auch aktuelle Wetterdaten mit etwa 5 Tagen Verzug zur Verfügung. Über eine API-Schnittstelle ist der Zugang zu den Wetterdaten automatisierbar, sodass aktuelle Wetterdaten stets verfügbar sind. Analog zum Vorgehen mit den Anlagendaten im MaStR werden auch die Wetterdaten pro NUTS-3 Region gemittelt. In Abbildung 3 ist das Vorgehen bildlich für eine Komponente der Windrichtung und für eine Stunde im Jahr dargestellt. Diese Mittelung wird für alle relevanten Wetterdaten angewendet.

Berechnung der Erzeugungsleistung von Windkraftanlagen

Die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen wird mit der nachfolgenden Berechnungsmethode abgeschätzt [3]:

- I. Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe wird mit Hilfe des logarithmischen Windgesetzes berechnet aus dem Wetterdatensatz berechnet. Dabei wird ebenfalls die Oberflächenrauigkeit berücksichtigt, da diese einen nennenswerten Einfluss auf die Windgeschwindigkeit hat.
- II. Die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird anschließend mit Hilfe einer Leistungskurve für Windkraftanlagen in die abgegebene Leistung umgerechnet.

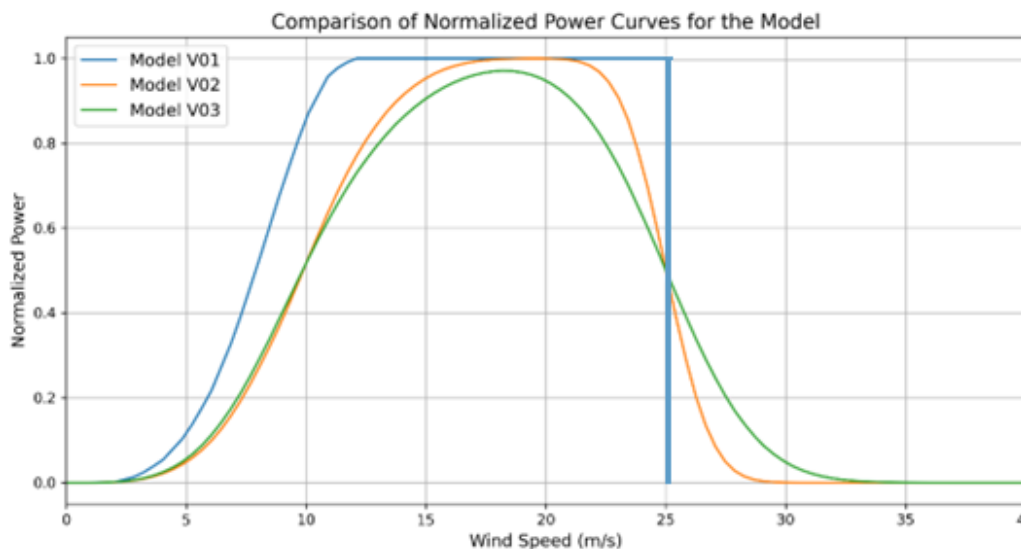


Abbildung 4: Leistungskurven für Windkraftanlagen

Jeder Windturbinentyp hat eine charakteristische Windleistungskurve, die die Leistungsabgabe über die Windgeschwindigkeiten beschreibt. Eine typische Leistungskurve für eine einzelne Windkraftanlage ist in Abbildung 4 unter Model V01 abgebildet.

Da jedoch in jeder NUTS-3 Region mehrere Windkraftanlagen gemittelt betrachtet werden, muss die Leistungskurve entsprechend angepasst werden. Die Normalisierung der Windleistungskurve erwies sich als geeigneter Ansatz für die ausgewählte Modellierungsmethodik. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Leistungskurven getestet und die in Abbildung 4 unter Model V03 dargestellte abschließend ausgewählt. [3]

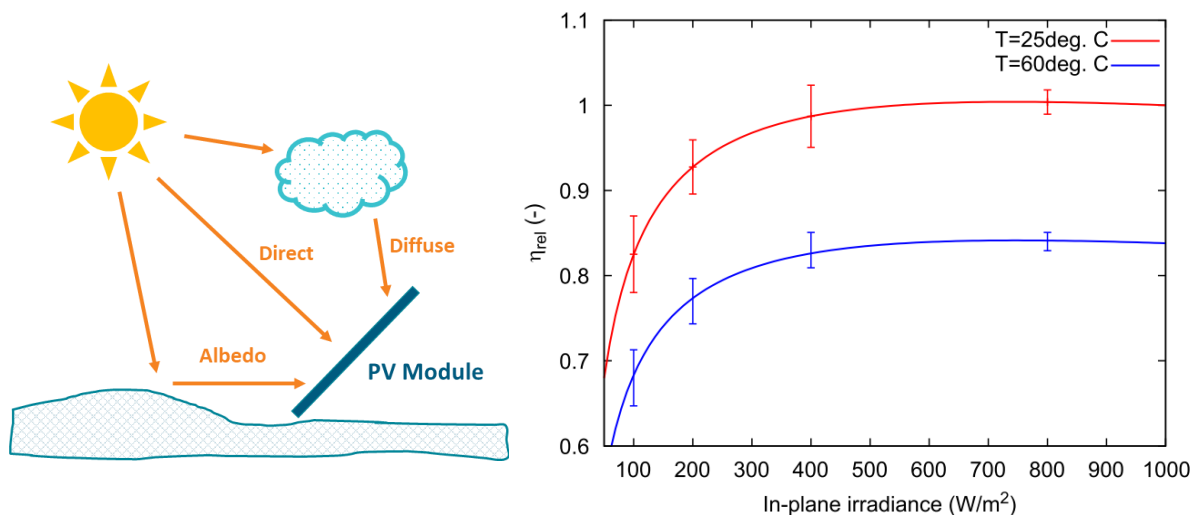


Abbildung 5: Strahlungsarten auf ein PV-Modul und beispielhafte Wirkungsgradkurve eines PV-Moduls

Simulation der Einspeisung durch PV-Anlagen

Die Berechnung der PV-Einspeisung wird wie folgt durchgeführt [3]:

- I. Anwendung eines Modells der solaren Transposition zur Berechnung der Sonneneinstrahlung unter einem bestimmten Neigungswinkel des PV-Moduls.
- II. Anhand der berechneten Sonneneinstrahlung und dem relativen Wirkungsgrad wird dann die Solarleistung eines PV-Moduls ermittelt.

Die auf das PV-Panel projizierte Sonneneinstrahlung besteht aus drei Hauptkomponenten: Direkt, Diffus und Albedo (siehe Abbildung 5). Jedes PV-Modul verfügt über eine relative Wirkungsgradkurve (siehe ebenfalls Abbildung 5), die die Leistung bei unterschiedlichen Einstrahlungs- und Temperaturbedingungen beschreibt. Diese Kurve berücksichtigt Änderungen der Umgebungsbedingungen und liefert einen Wirkungsgrad für die Leistung des Moduls im Verhältnis zu seinen Standard Test Bedingungen.

Das Modell des relativen Wirkungsgrads wird dann auf die stündlichen Daten der Sonneneinstrahlung auf Ebene NUTS-3 angewendet. Daraus ergibt sich die stündliche PV-Solarleistung, welche für jede mögliche Azimutausrichtung und die gemittelte Modulneigung separat berechnet und anschließend für die jeweilige NUTS-3 Region aggregiert wird. [3]

Ergebnisse und Validierung

Die öffentlich zugänglichen Daten der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) spielen eine zentrale Rolle bei der Validierung und Kalibrierung des Modells. Sie stellen tatsächliche Echtzeit-Stromerzeugungs- und -einspeisedaten der jeweiligen Netzbetreiberzonen dar und bieten die Möglichkeit, die Modellergebnisse mit Messdaten zu vergleichen. Zur Validierung der Modellergebnisse wurden die ermittelten Erzeugungszeitreihen der NUTS-3 Regionen auf ÜNB-Ebene aggregiert und mit den Einspeisedaten der ÜNB abgeglichen. [4]

In Abbildung 6 sind beispielhaft für Februar 2022 die Einspeisedaten des Netzbetreibers Tennet zusammen mit den Simulationsergebnissen verschiedener Modellversionen dargestellt.

Dabei wurden neben weiteren Anpassungen insbesondere die Windleistungskurven, wie in Abbildung 4 dargestellt ist, variiert. Hier zeigt sich, dass durch die Auswahl einer geeigneten Windleistungskurve die Modellergebnisse deutlich verbessert werden konnten und die Modellversion V03 den tatsächlichen Verlauf sehr gut abbildet. [3]

In Abbildung 7 sind beispielhaft für Woche 24 des Jahres 2022 die Einspeisedaten des Netzbetreibers TransnetBW zusammen mit den Simulationsergebnissen des PV-Modells dargestellt. Man erkennt, dass das Modell aggregiert die Netzbetreiberdaten in guter Näherung abbilden kann. Unter anderem aufgrund einer ermittelten Unschärfe bei der diffusiven Strahlung in den Wetterdaten, sind jedoch leichte Abweichungen nicht gänzlich korrigierbar. [3]

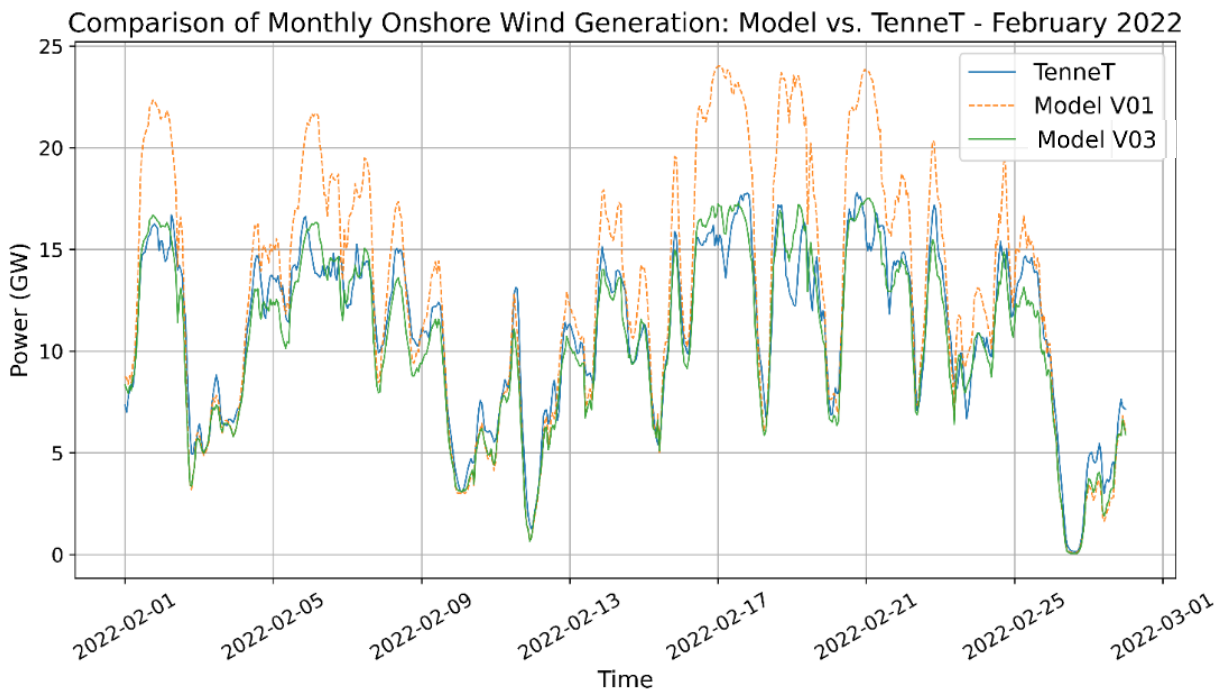


Abbildung 6: Vergleich der ÜNB-Daten (TenneT) mit den Modellergebnissen für WKAs (Februar, 2022)

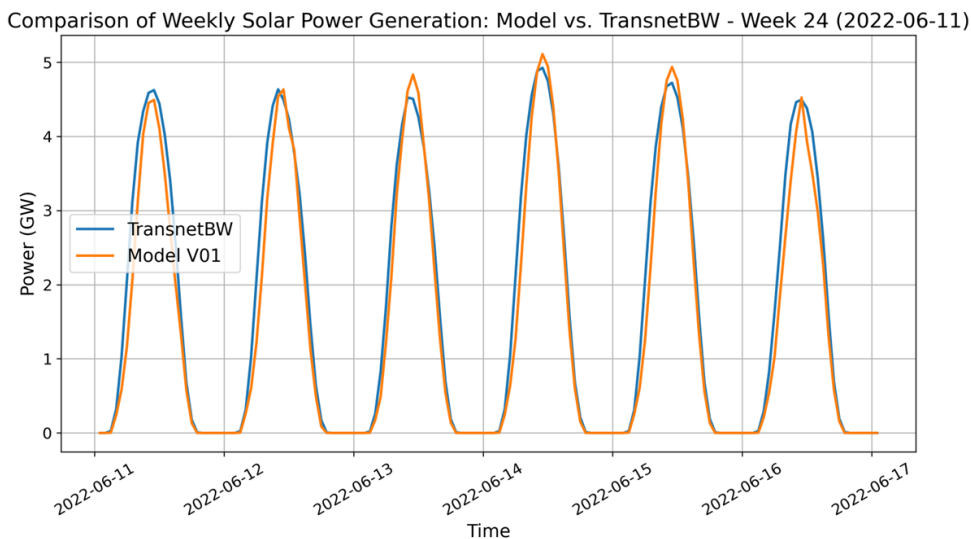


Abbildung 7: Vergleich der ÜNB-Daten (TransnetBW) mit den Modellergebnissen für PV (Woche 24, 2022)

AP 3: Berechnung der regionalen Einspeisung anderer Quellen

Der verwendete Ansatz zur Abschätzung der Stromerzeugung anderer Stromquellen erfolgt auf Ebene der Bundesländer und kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Betrachtete Energieträger sind Erdgas, Erdöl, Kernenergie, Braunkohle, Steinkohle, Abfall, Gas aus Kohle, Biomasse, Geothermie, Sonstige und Wasser. Wasserkraftwerke werden unterschieden in Pumpspeicherkraftwerke, Laufwasserkraftwerke und Speicherwasserkraftwerke.

Blockscharfe Erzeugungszeitreihen

Blockscharfe Stromerzeugungszeitreihen in 15-minütiger Auflösung für die Stromerzeugung stehen üblicherweise mit 6 Tagen Verzug aus Daten der Strombörse EEX oder auf der Transparenzplattform der ENTSO-E zur Verfügung. Allerdings sind nur Einheiten mit einer installierten Leistung über 100 MW meldepflichtig. Kleinere Einheiten werden von den Daten nicht abgebildet. Für alle Energieträger außer „Biomasse“, „Geothermie“ und „Sonstige“ existieren Kraftwerke entsprechender Größe und somit blockscharfe Erzeugungszeitreihen. Für Kernkraftwerke existieren diese bis zum endgültigen Atomausstieg im April 2023. Die blockscharfen Zeitreihen können meist problemlos entsprechend ihrem Standort einem Bundesland zugeordnet werden. Eine Ausnahme hiervon bilden Grenzkraftwerke beispielsweise am Rhein, die zum Teil ins deutsche und zum Teil ins französische Stromnetz einspeisen sowie Speicherwasser- und Pumpspeicherkraftwerke, die im Ausland stehen, aber ins deutsche Stromnetz einspeisen. Diese wurden mit ihrer nach Deutschland eingespeisten Leistung berücksichtigt und manuell einem Bundesland zugeordnet.

Nach der Zuordnung aller Kraftwerke wird je Bundesland und je Kraftwerkstyp die 15-minütlich aufgelöste Summe der Erzeugung aus Kraftwerken > 100 MW berechnet.

Differenz aus gesamter Erzeugung und blockscharfer Erzeugung

Neben blockscharfen Erzeugungen liegen für Deutschland Zeitreihen für die gesamte Erzeugung aus allen betrachteten Energieträgern vor. Von der Gesamterzeugung wird die aus den blockscharfen Daten erhaltene Gesamtsumme der Erzeugungen je Energieträger abgezogen. Pro Energieträger ergibt sich eine Differenz, die von kleineren, nicht meldepflichtigen Kraftwerken gedeckt wird. Eine Ausnahme stellen Kernkraftwerke dar, von denen keine Einheiten < 100 MW existier(t)en und bei denen die berechnete Differenz deshalb stets null wäre.

$$Differenz_{Typ}^{15min} = Gesamterzeugung_{Typ}^{15min} - \sum_{i=1}^{\# \text{Kraftwerke}} EEXErzeugung_{Typ,i}^{15min}$$

Aufteilung der Differenz auf die Bundesländer

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Differenz wird (außer für Kernkraftwerke) im Folgenden anhand der jeweils installierten Kapazitäten auf die Bundesländer aufgeteilt. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Fahrweise der Anlagen sowohl vom Standort als auch von ihrer Größe unabhängig ist. Für Gas-, Braunkohle-, Steinkohle-, Öl-, Abfall-, Kern-, Geothermie-, Biomasse- sowie alle Typen von Wasser-Kraftwerken wurde dazu ein tagesscharfer Ansatz gewählt: Die jeweiligen installierten Kapazitäten von Einheiten < 100 MW werden für jedes Bundesland täglich aus dem Marktstammdatenregister abgefragt. Für sonstige Kraftwerke wird die Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur^a verwendet. Diese wird mindestens jährlich aktualisiert und enthält bereinigte und teils korrigierte Daten aller Kraftwerke. Erhebliche Veränderungen innerhalb eines Jahres sind dabei weder zu erwarten, noch beeinflussen sie die späteren Ergebnisse signifikant.

^a

<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>

Die Kraftwerksliste kommt des Weiteren zur Korrektur von Daten aus dem Marktstammdatenregister zum Einsatz, welches teils eindeutig fehlerhafte Einträge aufweist. Auch die Zuordnung von Kraftwerken im Ausland, die ganz oder teilweise nach Deutschland einspeisen, erfolgt mit Hilfe der eindeutigen SE-Nummer des Kraftwerks aus den Daten für den Anschlussnetzbetreiber und die Nettonennleistung zur Einspeisung nach Deutschland aus der Kraftwerksliste.

$$\text{Anteil}_{BL,Typ}^{Tag} = \frac{\text{installierte Leistung}_{BL,Typ}^{Tag}}{\text{installierte Leistung}_{D,Typ}^{Tag}}$$

Anhand der deutschlandweit installierten Leistung eines Kraftwerkstyps und der installierten Leistung pro Bundesland, wird der jeweilige tagesscharfe Anteil des Bundeslandes am Kraftwerkspark des jeweiligen Typs berechnet und anschließend entsprechend folgender Gleichung mit der berechneten Differenz multipliziert.

$$\text{Kleinkraftwerke}_{BL,Typ}^{15min} = \text{Anteil}_{BL,Typ}^{Tag} * \text{Differenz}_{Typ}^{15min}$$

Im letzten Schritt wird für jedes Bundesland die so geschätzte Erzeugung der jeweiligen Einheiten < 100 MW zu jener der Erzeugungen größerer Kraftwerke addiert, um die 15-minütliche Gesamterzeugung pro Bundesland und Energieträger zu erhalten.

$$P_{BL,Typ}^{15min} = \text{EEXErzeugung}_{BL,Typ}^{15min} + \text{Kleinkraftwerke}_{BL,Typ}^{15min}$$

AP 4: Visualisierung der regionalen Daten

Die Visualisierung der Ergebnisse des Projektes erfolgt in unterschiedlichen Kategorien für „Leistung“ und „Energie“. Eine Übersicht der verschiedenen Kategorien ist in Abbildung 8 dargestellt.

Eine Besonderheit bei der Implementierung ist dabei, dass bei den meisten Kategorien gleichzeitig mehrere Bundesländer ausgewählt werden können und somit die aggregierte Erzeugung mehrerer Bundesländer dargestellt werden kann.

Die Erzeugung aus Windenergieanlagen auf See wird getrennt für Ost- und Nordsee dargestellt und kann je nach Bedarf den einzelnen Bundesländern zugerechnet werden.

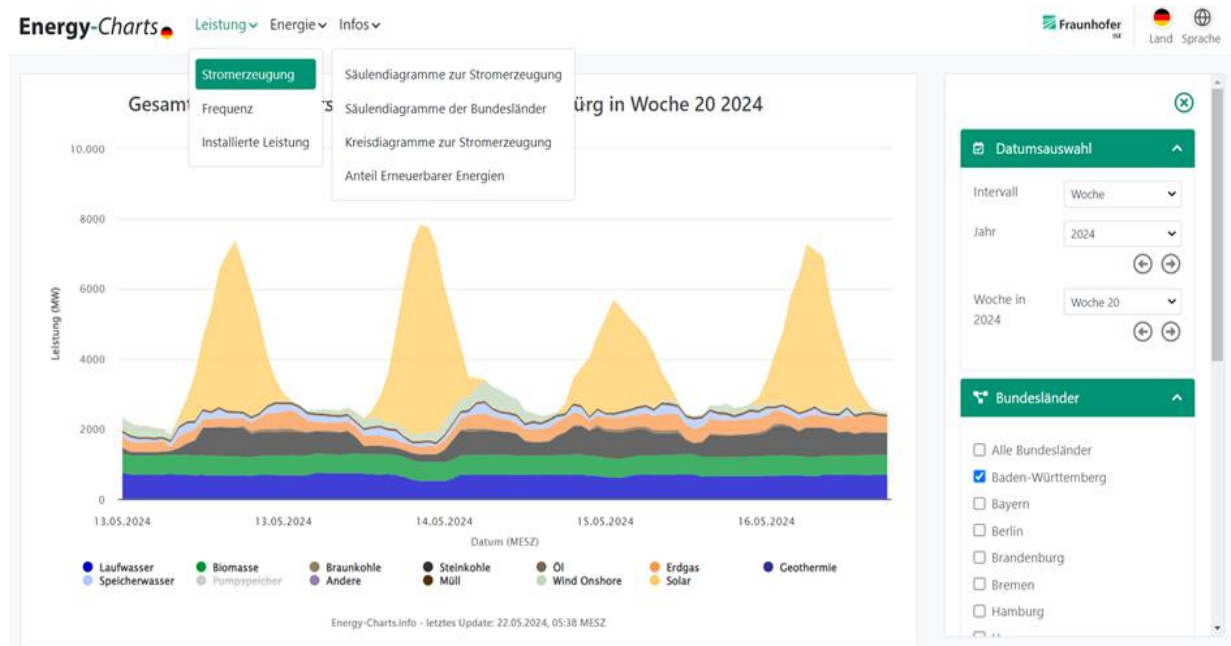


Abbildung 8: Übersicht der Menüoptionen

Im Folgenden sollen die einzelnen Kategorien und ihre Anwendung bzw. Darstellungsmöglichkeiten genauer beschrieben werden. Die Kategorie „Frequenz“ wird nicht genauer erläutert, da die Frequenz im gesamten Verbundnetz identisch ist und die Daten hier nur aufgrund der Vollständigkeit ebenfalls angeboten werden.

Es stehen dabei die folgenden Menüpunkte zur Verfügung:

- Leistung – Stromerzeugung
- Leistung – Frequenz
- Leistung – Installierte Leistung
- Energie – Säulendiagramme zur Stromerzeugung
- Energie – Säulendiagramme der Bundesländer
- Energie – Kreisdiagramme zur Stromerzeugung
- Energie – Anteil Erneuerbarer Energien

Leistung – Stromerzeugung

In dieser Kategorie lässt sich sehr schnell ein Überblick gewinnen, wie die Stromerzeugung in einem einzelnen Bundesland zusammengesetzt ist. Abbildung 9^b zeigt exemplarisch die gesamte Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein in Woche 20 2024. Sehr gut lässt sich der sehr hohe Anteil an Wind- und Solarerzeugung erkennen. Es lässt sich aber beispielsweise auch nur die Solarenergieerzeugung für alle Bundesländer gestapelt darstellen (Abbildung 13^c).

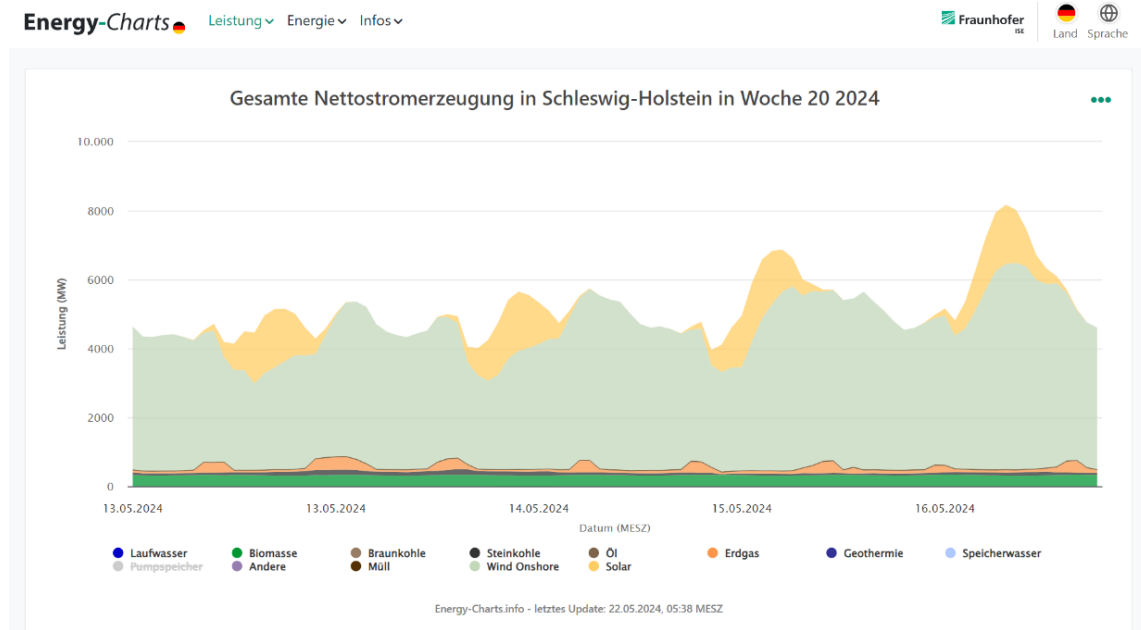


Abbildung 9: Gesamte Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein in Woche 20 2024

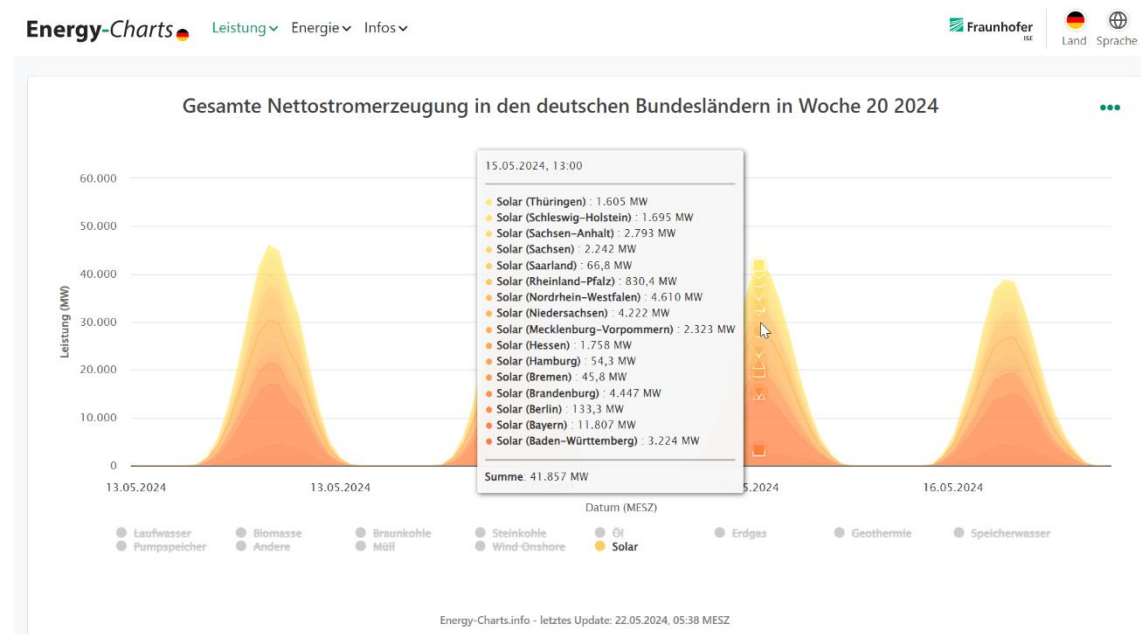


Abbildung 10: Gesamte Nettostromerzeugung aus Solarenergie in allen Bundesländern in Woche 20 2024

^b https://energy-charts.info/charts/power/chart.html?l=de&c=DE_BL&week=20&year=2024&sh=1

^c https://energy-charts.info/charts/power/chart.html?l=de&c=DE_BL&week=20&year=2024&legendItems=cw1&state_all=1

Leistung – Installierte Leistung

In dieser Kategorie wird das Marktstammdatenregister ausgewertet und die Ergebnisse auf die Bundesländer verteilt. Die Ergebnisse für Solar und Wind lassen sich zudem auf die Fläche und Einwohnerzahl bezogen darstellen, womit ein deutlich besserer Vergleich ermöglicht wird. Abbildung 11^d zeigt exemplarisch den Nettozubau der installierten Wind- und Solarleistung pro Fläche zwischen Januar und März 2024.

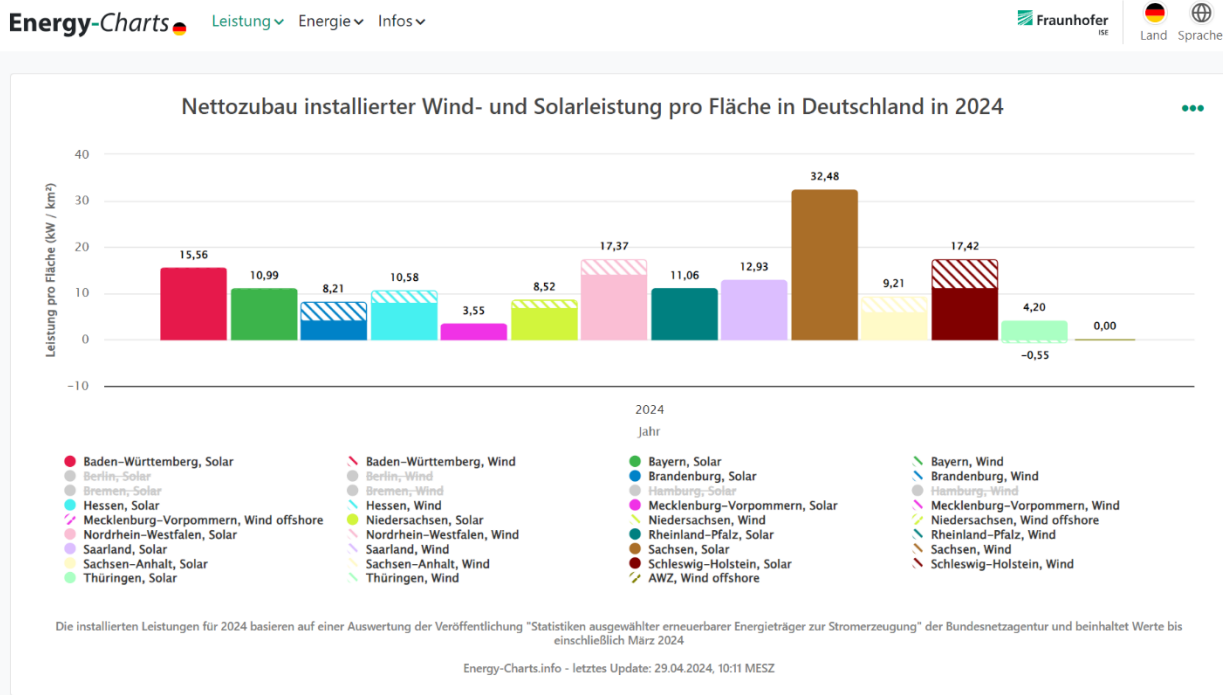


Abbildung 11: Nettozubau installierter Wind- und Solarleistung pro Fläche in Deutschland im Jahr 2024 bis März 2024

^d https://energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=de&c=DE_BL&expansion=dp_inst_states_area&year=2024

Energie – Säulendiagramme zur Stromerzeugung

In dieser Kategorie lässt sich die historische Entwicklung der Stromerzeugung für einzelne Bundesländer darstellen. Abbildung 12^e zeigt exemplarisch die Entwicklung der gesamten Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein seit 1990. Sehr gut lässt sich die Abschaltung der Kernkraftwerke in den einzelnen Jahren und der starke Zubau der Windkraft nachvollziehen. Auch in dieser Kategorie lassen sich die Summen aus unterschiedlichen Bundesländern darstellen.

Zur vereinfachten Bedienung kann eine einzelne Kategorie (z.B. „Solar“) durch einen Doppelklick direkt ausgewählt werden.

Wird während eines einfachen Klicks die „Strg“-Taste gedrückt gehalten, werden alle Kategorien aus demselben Stapel ausgewählt. Erfolgt beispielsweise ein Klick auf „Solar“ bei gedrückter „Strg“-Taste, werden alle erneuerbaren Energieträger direkt ausgewählt.

Bei einem Dreifachklick auf einen Legendeintrag wird die Standardauswahl der Legendeneinträge wiederhergestellt.

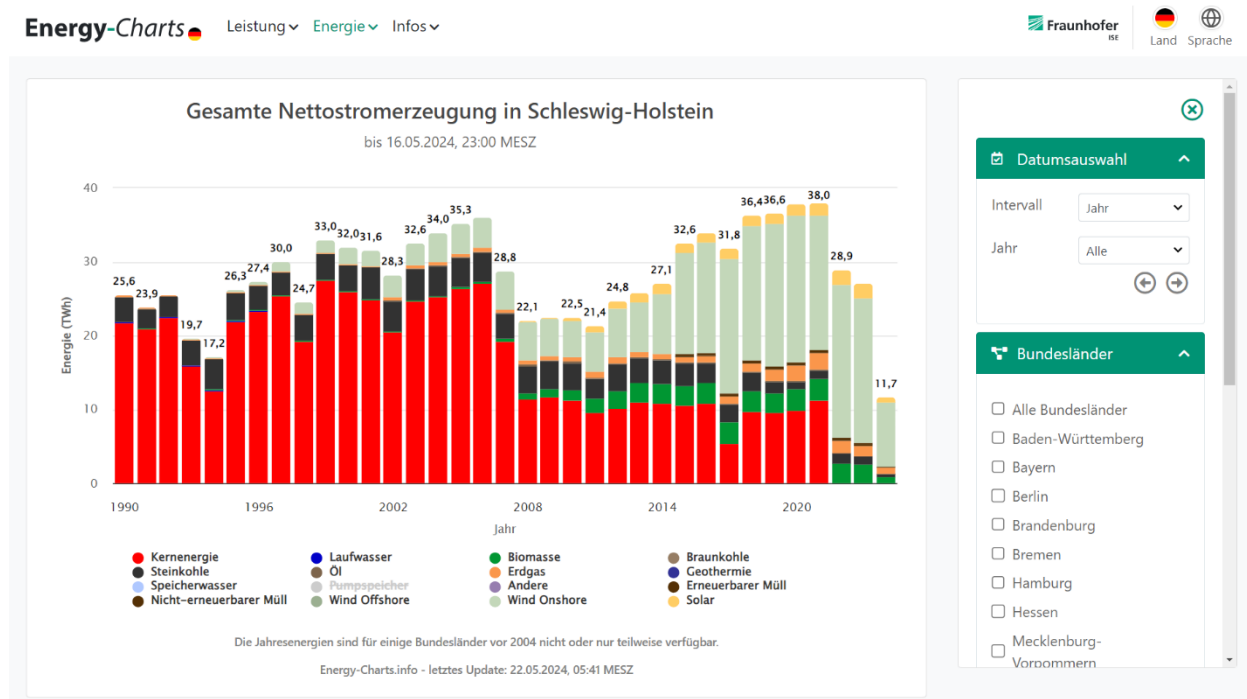


Abbildung 12: Jahresenergien der gesamten Nettostromerzeugung in Schleswig-Holstein

^e https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=de&c=DE_BL&year=-1&sh=1

Energie – Säulendiagramme der Bundesländer

Diese Kategorie ist für den direkten Vergleich der Erzeugungsenergien zwischen den Bundesländern gedacht. Die einzelnen Energien der Bundesländer lassen sich äquivalent zu den installierten Leistungen auf Fläche und Einwohner*innen skalieren. Beispielhaft zeigt Abbildung 13^f die bis zum 16. Mai 2024 produzierten Energiemengen der einzelnen Bundesländer, jeweils bezogen auf die Anzahl der Einwohner*innen.

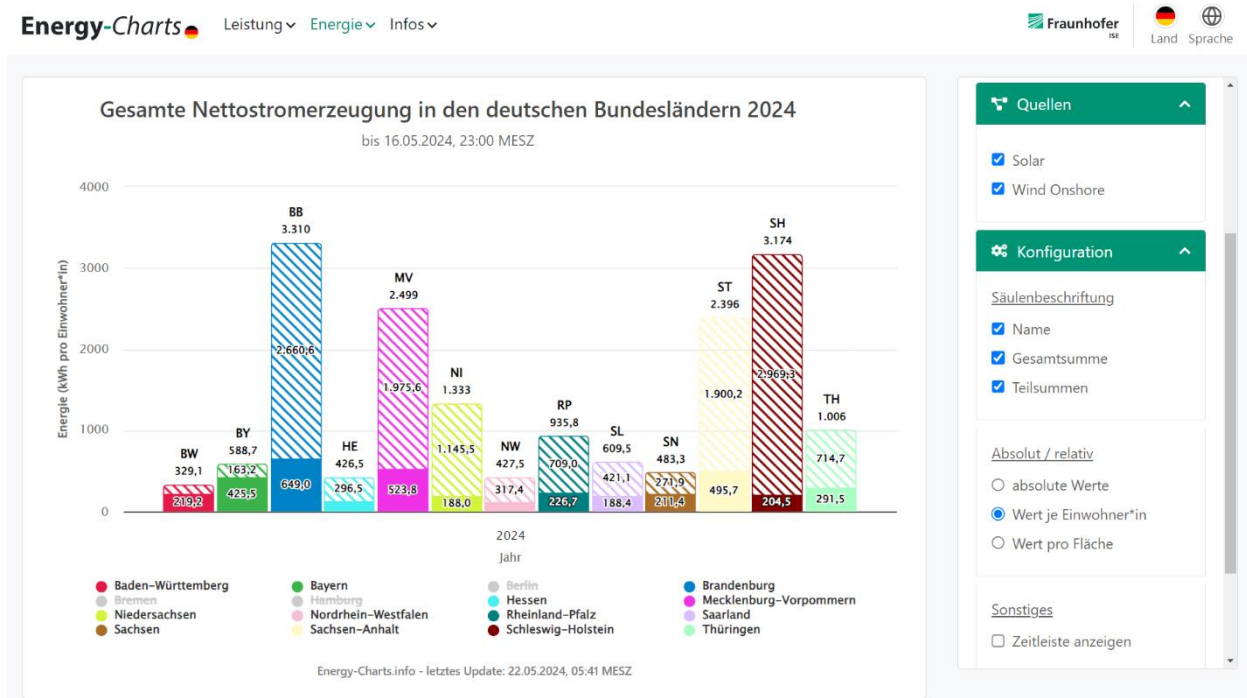


Abbildung 13: Gesamte Nettostromerzeugung aus Wind- und Solarenergie vom 1. Januar 2024 bis zum 16. Mai 2024 bezogen auf die Einwohnerzahl der jeweiligen Bundesländer

^f [https://energy-charts.info/charts/energy_states/chart.html?l=de&c=DE_BI&absolute relative=per capita&year=2024](https://energy-charts.info/charts/energy_states/chart.html?l=de&c=DE_BI&absolute%20relative=per%20capita&year=2024)

Energie – Kreisdiagramme zur Stromerzeugung

Die Kategorie Kreisdiagramme ermöglicht einen einfachen Überblick über die Zusammensetzung der Erzeugung für ein Bundesland über ein Intervall. Es stehen dabei die folgenden Intervalle zur Verfügung:

- Jahr
- Halbjahr
- Jahreszeit
- Quartal
- Monat
- Woche
- Tag

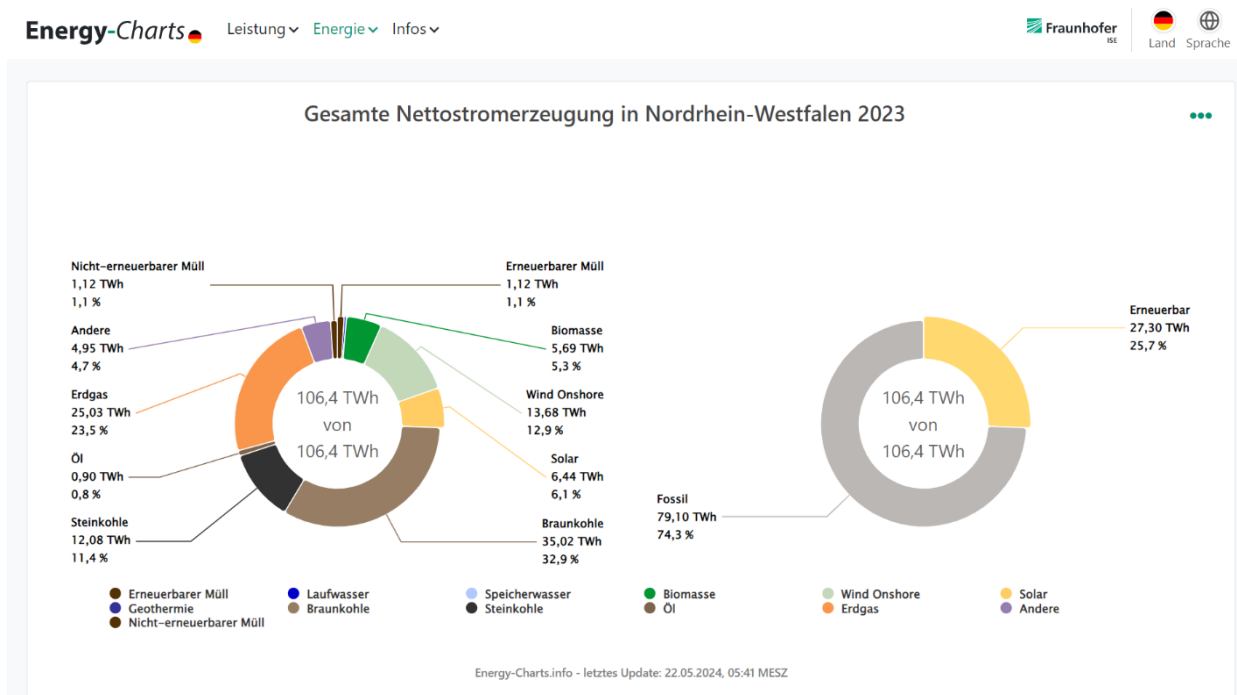


Abbildung 14: Kreisdiagramme zur gesamten Nettostromerzeugung in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2023

Bei den Kreisdiagrammen werden stets zwei Kreise angeboten. Auf der linken Seite die Aufteilung des Kreises in die einzelnen Erzeuger und auf der rechten Seite die aus der Aufteilung auf der linken Seite berechneter Anteil an Erneuerbaren Energien, Anteil fossiler Energieträger und der Anteil der Kernenergie. Abbildung 14⁹ zeigt exemplarisch die gesamte Nettostromerzeugung in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2023.

⁹ https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE_BL&year=2023&source=nw

Energie – Anteile Erneuerbarer Energien

In der Kategorie „Anteile Erneuerbarer Energien“ lässt sich der zeitliche Verlauf/Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Erzeugung für die einzelnen Bundesländer darstellen. Leider sind nicht für alle Bundesländer Werte ab 1990 verfügbar, weshalb einige der Diagramme erst später beginnen.

Abbildung 15^h zeigt beispielhaft die stetige Zunahme des Anteils Erneuerbarer Energien an der gesamten Nettostromerzeugung in Brandenburg von 2003 bis 2024.

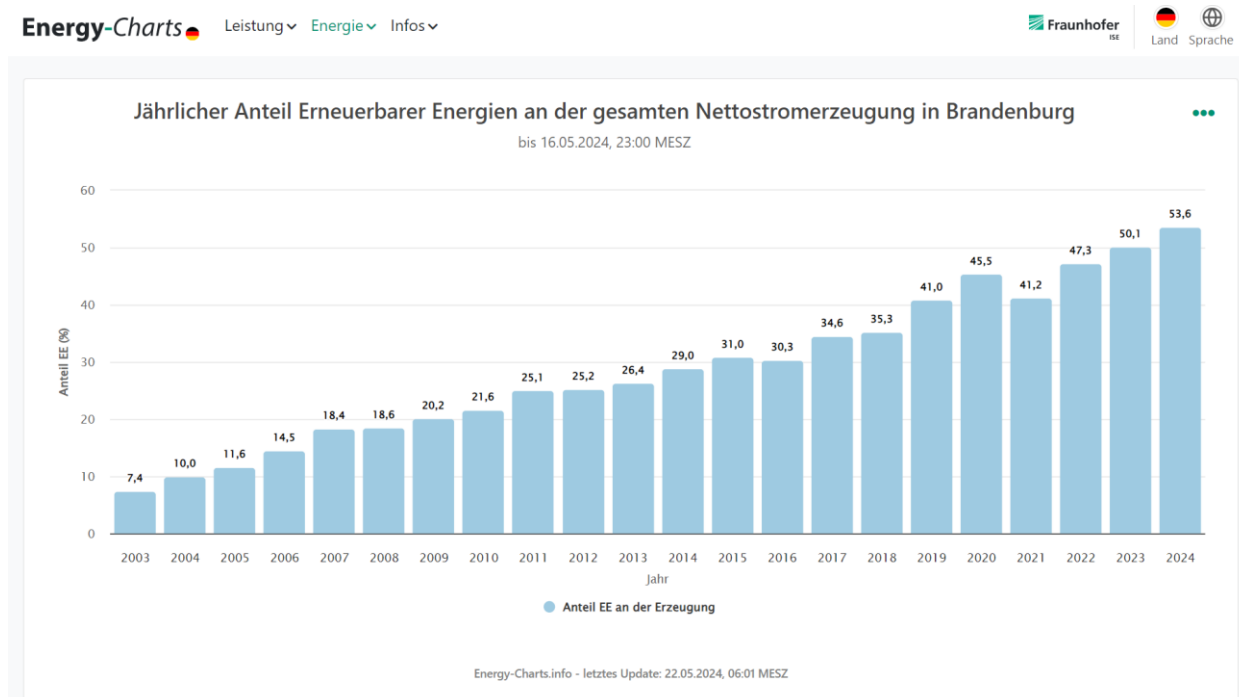


Abbildung 15: Jährlicher Anteil Erneuerbarer Energien an der gesamten Nettostromerzeugung in Brandenburg

^h https://energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.html?l=de&c=DE_BL&state=bb&interval=year

AP 5: Veröffentlichung der regionalen Daten

Die Veröffentlichung der Ergebnisse des Projektes erfolgt auf der Webseite der Energy-Charts unter folgendem Link:

www.energy-charts.info

Die Navigation zu den Daten erfolgt dabei über die Auswahl der Kategorie „DE – Bundesländer“ in der oberen, rechten Ecke, wie auch in Abbildung 16 dargestellt.

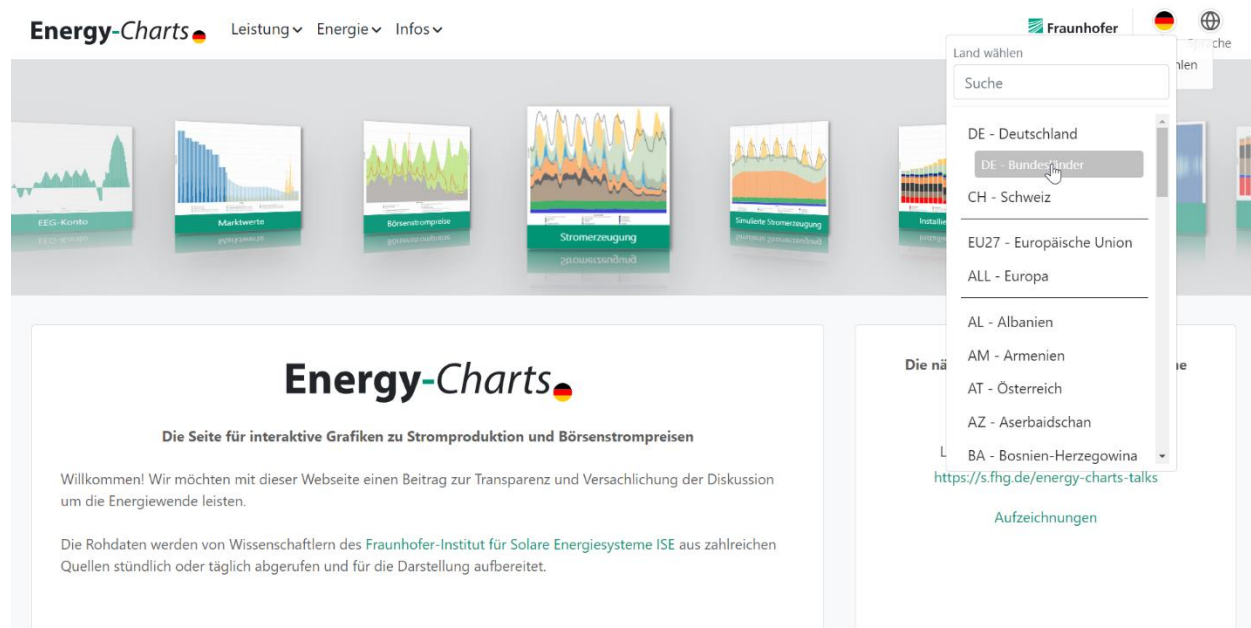


Abbildung 16: Navigation zu den Energy-Charts Regional

Sämtliche Daten können auf der Plattform kostenfrei dargestellt werden. Zudem können alle Abbildungen und die dahinterliegenden Rohdaten in maschinenlesbarer Form heruntergeladen werden. Dafür steht auf der rechten Seite das Menü „Export“ zur Verfügung. Hier lassen sich die Abbildungen oder die dahinterliegenden Daten in folgenden Formaten exportieren:

- PDF
- SVG
- JPEG
- PNG
- XLSX
- CSV

Der Export erfolgt hierbei immer mit den gerade aktivierten Einstellungen, beispielsweise in der Zeitzone, die im Untermenü „Zeitangaben“ definiert wurde.

4. Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Projektes gesetzten Ziele konnten vollständig erreicht werden. So ist sowohl die Stromerzeugung von Windkraftanlagen als auch von PV-Anlagen (AP 2) mit einer Verzögerung von etwa sechs Tagen auf Bundesländerebene und in stündlicher Auflösung modelliert.

Auch für die Stromerzeugung der konventionellen Kraftwerke (AP 3) wurde erfolgreich eine Methodik entwickelt um die Stromeinspeisung auf Bundesländerebene zu disaggregieren. Auch die Ergebnisse dieses Modells sind auf den Energy-Charts abrufbar.

Durch die übersichtliche Visualisierung sind die regionalen Daten (AP 4) auf den Energy-Charts öffentlich und nachvollziehbar dargestellt. Durch eine Vielzahl an Funktionen können die Daten darüber hinaus gefiltert werden.

Auch der kostenfreie Zugriff auf die Daten über einen direkten Download möglich. Somit sind auch journalistische und forschungsbezogenen Bedürfnisse nach Datenqualität, Erweiterung des Angebots und der Usability erfüllt.

Die Ergebnisse des Projektes „EC-regional“ wurden im Rahmen der Energy-Charts Talks am 2. Mai 2024 mit über 100 Teilnehmer*innen der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Aufzeichnung hierzu kann unter folgendem Link abgerufen werden:

www.energy-charts.info/energy-charts-talks.html

5. Diskussion des Projektverlaufs und der Projektergebnisse

Während der Bearbeitung des Projekts ist eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate beantragt und genehmigt worden. Der Bedarf hierfür ist aus mehreren Gründen entstanden.

Zum einen hat sich zu Beginn des Projekts bei der Evaluierung der zur Verfügung stehende Datensätze herausgestellt, dass diese in Teilen unvollständig sind. Dies bezieht sich insbesondere auf die veröffentlichten Daten der statistischen Landesämter bezüglich der für den monatscharfen Stromverbrauch genutzten Energieträger- und mengen. Auch auf Anfrage an die statistischen Landesämter konnten die benötigten Zahlen nicht zur Verfügung gestellt werden. Entsprechend musste die Methodik überarbeitet und die Modelle aktualisiert werden.

Darüber hinaus möchte das Fraunhofer ISE jungen Wissenschaftler/innen die Möglichkeit geben, sich an der Forschung zu beteiligen. Entsprechend wurden Teile von AP2 des Projekts, die zeitlich- und regional-aufgelöste Modellierung der Wind- und PV-Erzeugung, als Abschlussarbeit [3] ausgeschrieben. Auch hier kam es durch den Ausschreibungs- und Einstellungsprozess zu einer Verzögerung, sodass mit der Bearbeitung dieses Arbeitspakets erst im 1. Quartal 2023 begonnen werden konnte. Entsprechend haben sich auch die nachfolgende Arbeitspaket 4 und 5 verzögert.

Die Änderungen im zeitlichen Ablauf des Projekts hat jedoch keinen Einfluss die Projektkosten ausgeübt. Auch konnten alle inhaltlichen Ziele mit den beantragten Projektmitteln in vollem Umfang erreicht werden.

6. Fazit

Das Projekt „EC-regional“ hat erfolgreich demonstriert, wie durch fortschrittliche Datenanalyse und Simulationstechniken eine detaillierte Visualisierung und Verständnis der regionalen Energieerzeugung ermöglicht wird. Die erzielten Ergebnisse tragen signifikant zur Energie-Transparenz bei und ermöglichen eine gezielte Steuerung und Optimierung der Energiewende auf regionaler Ebene. Der Zugang zu diesen präzisen Daten wird nicht nur für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger, sondern auch für die Öffentlichkeit einen Mehrwert darstellen und ist ein entscheidender Schritt zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele. Zukünftige Projekte können auf den Erkenntnissen und Methoden von „EC-regional“ aufbauen, um den Ausbau und die Integration erneuerbarer Energien weiter zu fördern.

Literatur

- [1] H.-J. A. Peter Stratmann, *Marktstammdatenregister (MaStR)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.marktstammdatenregister.de/> (Zugriff am: 22. Mai 2024).
- [2] H. Hersbach *et al.*, "The ERA5 global reanalysis", *Quart J Royal Meteor Soc*, Jg. 146, Nr. 730, S. 1999–2049, 2020, doi: 10.1002/qj.3803.
- [3] Omar Mostafa, "Spatio-Temporal Modelling of Wind and Photovoltaic Power Generation in German Districts Using Climate Reanalysis Data", *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, 2023.
- [4] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, *Netztransparenz.de*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.netztransparenz.de/> (Zugriff am: 22. Mai 2024).