

GYMNASIUM AM RÖMERKASTELL ALZEY

FACHBEREICH ERDKUNDE
FACHARBEIT

Marktauswirkungen der Photovoltaik-Stromerzeugung bis 2032

Eine Analyse basierend auf einer Zeitreihenalgorithmus-Prognose

Von: Wiest, Davide

Schuljahr: 2023/24

Abgabedatum: 23. Februar 2024

Schule: Gymnasium am Römerkastell Alzey

Schuljahr: 2023/24

Kurs: Leistungskurs 2

Fach: Erdkunde

Name des Schülers: Wiest, Davide

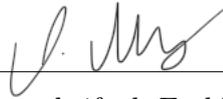
Thema: Marktauswirkungen der Photovoltaik-Stromerzeugung
bis 2032: Eine Analyse basierend auf einer
Zeitreihenalgorithmus-Prognose

Name des Fachlehrers: Jan Merz

Abgabetermin des Themas: 23. Februar 2024

Abgabetermin der Facharbeit: 23. Februar 2024

Unterschrift d. Schülers



Unterschrift d. Fachlehrers

Die vorliegende Facharbeit wurde am 23.02.24 eingereicht.

Note: sehr gut / 15 Punkte



Unterschrift d. Fachlehrers

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Ausbau von Photovoltaikanlagen in Deutschland in mittelfristiger Zukunft zu bewerten. Hierfür wird basierend auf einer abgeleiteten Datenlage eine Prognose erstellt. Mit ihr, und Erkenntnissen zu sonstigen relevanten Faktoren, werden die wichtigsten Auswirkungen dieser Entwicklung analysiert.

Die Arbeit kam zu folgenden Ergebnissen: Die Bruttostromerzeugung aus Photovoltaikanlagen steigt innerhalb von 9 Jahren bis 2032 um 10,9% p.a.. Die Ausbauziele der Bundesregierung können in diesem Sektor nur schwer erfüllt werden. Das Ziel, bis 2030 80% des Stroms aus Erneuerbaren zu beziehen, ist realistisch. Während die Faktoren Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit für PV sprechen, die Netzstabilität nicht beeinträchtigt wird, und die Stromerzeugungsdisparität innerhalb von Deutschland durch PV gemäßigt werden kann, ist die Abhängigkeit zur Volksrepublik China der Hauptnachteil. Insgesamt überwiegen eindeutig die Positiv Aspekte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Jetziger Wissensstand	6
1.2	Vorgehen	6
2	Konzeption	7
2.1	Dynamiken des Solarenergieausbaus	7
2.1.1	Rohstoff- und Herstellungskosten	7
2.1.2	Anschaffungskosten	7
2.1.3	Stromgestehungskosten und Einspeisevergütung	7
2.1.4	Wirtschaftliche Dynamik	8
2.1.5	Staatliche Förderung	8
2.1.6	Energieverbrauch	8
2.2	Festlegen der Parameterauswahl	8
2.3	Festlegen der Daten	9
3	Entwicklung und Prognose	10
3.1	Informationen zur Entwicklung	10
3.2	Modellauswahl	10
3.2.1	N-Beats	10
3.3	Auswertung der Prognose	11
3.4	Prognose	11
4	Weitere Entwicklungsfaktoren	12
4.1	Harte Entwicklungsfaktoren	12
4.1.1	Rohstoff- und Produktionspreise	12
4.1.2	Effizienzsteigerungen durch technologische Innovation	12
4.1.3	Momentaner Strombedarf, Mangel an Speichereinheiten	12
4.1.4	Trend des Datensatzes	13
4.2	Weiche Entwicklungsfaktoren	14
4.2.1	Lieferkettenengpässe und Preisvolatilität	14
4.2.2	Fördermaßnahmen	16
4.3	Einschätzung der Prognose unter Beachtung der Limitationen	16
5	Auswirkungen	16
5.1	Einhaltung der Stromerzeugungsziele aus erneuerbaren Energien	16
5.2	Reduktion der Emissionswerte	17
5.2.1	Kompensation konventioneller Energie	17
5.2.2	Schadstoffausstoß bei Produktion und Transport	18
5.2.3	Quantifizierung	18

5.3	Energieunabhängigkeit	18
5.3.1	Wegfallende Abhängigkeiten konventioneller Energieproduzenten . .	19
5.3.2	Abhängigkeit von China als Lieferant	20
5.3.3	Interpretation	20
5.4	Stromnetzstabilität	21
5.5	Disparität zwischen Nord- und Süddeutschland	22
5.6	Beantwortung der Forschungsfrage	22
6	Schluss	23
6.1	Ergebnisse	23
6.1.1	Prognose	23
6.1.2	Weitere Entwicklungsfaktoren	23
6.1.3	Auswirkungen und Bewertung	24
6.2	Implikationen	24

1 Einleitung

In Folge des anthropogenen Klimawandels muss auch in Deutschland der Gesamtschadstoffausstoß sinken. Dies kann zum Großteil durch die Energiewende vollzogen werden, die den Strommarkt nachhaltig verändert, und den Ausbau von Windkraftwerken, Solarenergie und anderen umfasst. Diese Arbeit beschränkt sich auf stromproduzierende Solaranlagen, analysiert und quantifiziert wesentliche Aspekte des Wandels, und setzt dabei den Fokus auf die Strommarktstruktur. Mit Erkenntnissen aus diesem Prozess wird schließlich die Forschungsfrage beantwortet: **„Ist der Photovoltaik-Ausbau in Deutschland insgesamt positiv zu bewerten? Inwiefern? Inwiefern nicht?“**.

1.1 Jetziger Wissensstand

Zuerst zur Datenlage, die hier eine besonders wichtige Rolle spielt: Die Spanne der prognostizierten Entwicklung ist enorm: Wood Mackenzie, eine internationale Beratungs- und Forschungsfirma, sagt ein lineares globales Wachstum der installierten Kapazität als neue Stufe in dem Photovoltaik-Ausbau vorher. Die Dr. Dahlmeier Financial Risk Management AG hingegen nutzt eine empirische Modellierung und prognostiziert grob eine Verachtfachung der global installierten Leistung [Dah23]. Die einzige aktuelle, frei verfügbare Prognose für Deutschland ist die des Fraunhofer-Instituts. Sie geht im mittleren Fall von einem Anstieg der Leistung von 2020 707,5GWh auf 2032 3.606GWp aus. Allerdings ist sie über 2 Jahre alt und lernratenbasiert. [ISE21, S.42 Tab. 11] Es gibt schon einige Untersuchungen des PV-Ausbaus, vor allem das sehr umfassende Dokument „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“ [Wir23], in der beispielsweise Fragen zur Versorgungssicherheit, den Eigenschaften der PV-Stromerzeugung, dem Flächenbedarf und der Akzeptanz in der Bevölkerung knapp beantwortet werden, oder die wissenschaftliche Arbeit „Vorteile und Nachteile von Windenergie und Solarenergie auf technischer und wirtschaftlicher Ebene“ [Kö22].

Die verfügbaren Prognosen sind insgesamt unzureichend, aber nötig zur Analyse der wichtigsten Aspekte. Auch deshalb sind Arbeiten wie diese in der aktuellen Literatur unterrepräsentiert.

Nach diesen Gegebenheiten wäre eine Arbeit zu diesen Punkten, mit eigener Prognose, sinnvoll und aufschlussreich.

1.2 Vorgehen

Es werden die Auswirkungen des Zubaus analysiert und ggf. quantifiziert. Ferner wird untersucht, inwiefern die PV-Ausbauziele der Bundesregierung eingehalten werden, und inwiefern sich Schadstoffausstoßwerte, die Energieunabhängigkeit, die Stromnetzstabilität

und die Nord-Süd-Stromnetzdisparität ändern.

Es ist von Vorteil, ein kompetentes Zeitreihenmodell zu nutzen, das bereits in ähnlichen Situationen erfolgreich zum Einsatz kam. Aufgrund der nach Jahren gruppierten Daten, und weil Photovoltaik ein eher neuer Energieträger ist, müssen Modelle ausgewählt werden, die besonders gut mit einer geringen Datenlage zurechtkommen können.

Anhand dieser Kriterien wird das Modell „N-Beats“ benutzt. N-Beats ist als Deep-Learning-Ansatz eine interessante Option, weil es in Modellwettbewerben am besten abschneidet. (Siehe Ergebnisse von Oreshkin [Ore+22, S. 6f.]

Um möglichst alle Dynamiken einzuschließen, wird zuerst abgewägt, welche Metriken relevant sind, und diese als Kovariate eingesetzt. Dabei werden ausschließlich Datenreihen aus vertrauenswürdigen Institutionen, die einen möglichst langen Zeitraum abdecken, genutzt. Es werden auch weitere Entwicklungsfaktoren, die nicht in das Modell aufgenommen wurden, analysiert. Hierbei wird nach der Quantifizierbarkeit dieser getrennt.

2 Konzeption

Im Folgenden wird eine Datenlage aufgestellt, nach dem die Fragestellung algorithmisch beantwortet werden kann.

2.1 Dynamiken des Solarenergieausbaus

Für Investoren ist die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Strommarkt und der Rendite der jeweiligen Anlage maßgebend. Es müssen deshalb die Herstellungskosten, welche sich aus Rohstoff- und Verarbeitungskosten ableiten, die Stromgestehungskosten (Erzeugungskosten), sowie das Wirtschaftsklima betrachtet werden.

2.1.1 Rohstoff- und Herstellungskosten

Polysilikon, Stahl und Aluminium sind Grundmaterialien für die Herstellung von Solaranlagen und somit die preisbestimmenden Rohstoffe [IEA21, S. 135]. Mehr als 80% der globalen Produktion und Verarbeitung liegt in China [IEA22b, S. 7]. Deshalb sollten Ressourcendaten möglichst den chinesischen Markt widerspiegeln.

2.1.2 Anschaffungskosten

Da die Anschaffungskosten 80-90% der Stromgestehungskosten für Solaranlagen ausmachen, hängt die Profitabilität für Betreiber stark von ihnen ab [IEA21, Abb. 4.2].

2.1.3 Stromgestehungskosten und Einspeisevergütung

Die Rentabilität wird durch die Einspeisevergütung bestimmt. Da die meisten Solaranlagen eine Bruttoleistung ca. 25kW haben, sollte die entsprechende Einspeisevergütungsspalte

genutzt werden. (5000 der im Marktstammdatenregister eingetragenen Solaren Strahlungsenergieeinheiten, haben einen Mittelwert von 26,28kW. [Bun23c])

2.1.4 Wirtschaftliche Dynamik

Empirisch wurde die neutrale Hypothese, also dass der Ausbau Erneuerbarer Energien keinen Zusammenhang mit Wirtschaftswachstum hat, in den 2000ern in europäischen Ländern mehrfach bestätigt [JFX23, Literature Review, Absatz 5]. Konkret kann man das anhand der SE-Investitionen während der Finanzkrise 2007, der Covid19-Pandemie 2020, dem wirtschaftlichen Abschwung durch den Ukrainekrieg sowie die Solarkrise 2010 sehen [WFBWZ23, S. 6]. Der Ausbau der Solarenergie unterliegt also v.a. den Entwicklungen in der eigenen Branche.

2.1.5 Staatliche Förderung

Der Mittelabfluss zur Projektförderung im Bereich PV betrug 2022 70M€ und ist seit 2019 tatsächlich rückläufig [BMW23, S. 103, Tabelle 4]. Er ist zu gering, um einen nennenswerten Effekt zu haben. Damit ist nicht die gesamte staatliche Förderung gemeint. Subventionen wie für die Einspeisevergütung werden damit nicht berücksichtigt.

2.1.6 Energieverbrauch

Steigt der Energieverbrauch, sollten mögliche Investoren angeregt sein, in Energieerzeugungsanlagen zu investieren, darunter v.a. PV. Auf der anderen Seite können erneuerbare Energien nur bis zu dem Punkt, an dem sie die konventionellen Methoden verdrängt haben, expandieren. Das sollte in das Modell miteinfließen.

Allerdings hat der Strombedarf Deutschlands keine nennenswerte Entwicklung [BAE24, Tabelle „Bruttostromverbrauch“].

Zudem eignet sich diese Datenreihe nicht: Das Modell kann jenen Abschwung der Expansion aus vorangegangenen Daten nicht erlernen, weil sie vergleichbare Ereignisse nicht beinhalten. Das Problem wird später genauer untersucht.

2.2 Festlegen der Parameterauswahl

Die Auswahl der Parameter sollte möglichst klein und relevant sein. Ist sie zu groß oder nicht relevant, droht Overfitting. (Das Lernen von nicht- oder nur in dem Lernzeitraum existierender Zusammenhänge.)

Anhand dieser Dynamiken ergeben sich folgende historische Metriken:

- Polysilikon
- Stahlpreis
- Aluminiumpreis
- Investitionen in neue PV-Anlagen in Deutschland

- Anschaffungskosten
- Stromgestehungskosten
- Einspeisevergütung

Für die Stromgestehungskosten werden prognostizierte Werte ebenfalls berücksichtigt. Sie bieten einen hohen Informationsgehalt.

Es wurden Stahl- und Aluminiumpreise nicht explizit berücksichtigt, weil keine öffentlichen Daten für einen nutzbaren Zeitraum gefunden wurden.

Der Parameter „Anschaffungskosten“ ist problematisch, weil die gefundenen Daten [IRE23, Abb. 3.3] als einzige den Lernzeitraum erheblich verkürzen würden. (Die historischen Stromgestehungskosten können in mit den zukünftigen Prognosen kombiniert werden, wobei der Informationsgehalt nicht abnimmt.) Aus dem Grund wird er nicht in den Datensatz aufgenommen. Er fließt passiv in die Stromgestehungskosten ein, die sich wie vorher angegeben zur Mehrheit aus den Anschaffungskosten ergeben.

Der Zielparameter, der vom Modell prognostiziert werden soll, ist die Gesamtstromerzeugung aus Solaranlagen für das jeweilige Jahr.

2.3 Festlegen der Daten

- Polysilikonpreis [IRE23, Abb 3B.1b] (2003-2023)
- Investitionen in neue PV-Anlagen in Deutschland: Tabelle „Investitionen in die Errichtung von Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland“ [WFBWZ23, S. 6] (2000-2023)
- Stromgestehungskosten [IRE23, Abb. 3.11, Daten bei „Download the chart data“] (2010-2022)
- Prognose der Stromgestehungskosten: [ISE21, S. 31, Abb. 19] (bis 2040)
- Einspeisevergütung: [Fö, 2. Spalte: Bis 40kW] (2000-2023) [Sol22, Tabelle „Feste Einspeisevergütungen in Cent/kWh gemäß bisherigem EEG 2021 und EEG 2017“]
- Gesamtstromerzeugung: Tabelle „Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien“ [BMW24, S. 20] (2005-2021) und [BMU11, Tabelle 3] (2000-2004)

Die prognostizierten Stromgestehungskosten sind als Spanne angegeben. Um sie mit den historischen vereinen zu können, werden die Entwicklungen der oberen und unteren Grenze (gewichtet nach dem numerischen Abstand zu dem aktuellsten historischen Wert) zusammengeführt. Die relativen Veränderungen werden dann auf diesen historischen Wert übertragen.

Alle Datensätze werden in 1-Jahres-Abschnitte gestaffelt und ggf. in EUR umgerechnet (Wechselkurs vom 27.11.2023). Eine nicht berücksichtigte Inflationsrate wurde bei der Einspeisevergütung angenommen [DeS23b].

Alle verwendeten Daten und wie sie aufbereitet wurden, können im Repository eingesehen werden.

3 Entwicklung und Prognose

3.1 Informationen zur Entwicklung

Das gesamte Programm wird in der Programmiersprache Python geschrieben und ist als Repository öffentlich zugänglich. Die Zeitreihenalgorithmen stammen von dem Modul Darts.

Für die Berechnung der Fehlerquote wird der Datensatz in einem 4-zu-1 Verhältnis aufgeteilt. Demnach werden von den historischen Daten ca. 80% (2000-2017) zum Trainieren der Modelle genutzt und 20% für ihre Bewertung (2018-2022).

Die Vorhersage wird für 10 Jahre, von inklusive 2023 bis 2032, getroffen.

Als Maßstab für die Performance wird der RMSE („Root Mean squared error“) verwendet. Das Quadrieren setzt besondere Wichtigkeit auf die größten Abweichungen, sodass in erster Linie ein grundlegend übereinstimmendes Modell erlernt wird. Es muss beachtet werden, dass die Testspanne mit nur 4 Jahren kurz ist. Deshalb muss die nachfolgende Prognose eine Rolle in der Bewertung spielen.

3.2 Modellauswahl

Weil die Daten in Jahre gruppiert sind, hat das Modul wenige Zeitabschnitte, in denen es die Zusammenhänge des Datensatzes erlernen kann. Deshalb sollten mögliche Algorithmen mit wenigen Zeitpunkten lernen können, und auch nach einer kurzen Lernphase wertmäßig nahe am Datensatz orientieren. Dabei wird auf die minimalen von dem Modul Darts vorgeschriebenen Zeitpunkte geachtet, denn sie stellen einen realistischen Minimalwert mit Berücksichtigung der Lernfähigkeit des jeweiligen Modells dar.

Anhand dieser Kriterien wurde das Modell N-Beats ausgewählt.

3.2.1 N-Beats

Dieses Deep-Learning-Modell besteht aus einer Reihe an Stacks. Ziel eines Stacks ist es, einen Teilverlauf der Entwicklung zu bestimmen und die Differenz an den nächsten weiterzugeben. Es kann dabei den Trend und saisonale Verläufe betrachten. [Ore+22]

Das Modell ist eine besonders interessante Option, weil es akkurater als bisherige Alternativen und sogar als auf spezifische Probleme angepasste Algorithmen ist [Ore+22]).

Für diese Prognose besteht das Modell aus 2 Stacks, bestehend aus jeweils 1 Block mit 2 Schichten.

Um gleichbleibende Ergebnisse zu erhalten (N-Beats ist aufgrund der komplexen Archi-

tektur nicht deterministisch) und die Genauigkeit zu steigern, wird ein Ensemble-Modell bestehend aus 20 N-Beats Modellen erstellt. D.h., dass 20 N-Beats Modelle trainiert werden, und das Ensemble-Modell den Durchschnitt der einzelnen Prognosewerte ausgibt. (20 ist ein vergleichbar kleiner Wert, allerdings liefert das Verbinden mehrerer Ausgaben ab einer Anzahl von 18 gute Leistungssteigerungen, wie Oreshkin [Ore+22, S. 14, Sektion „Ensemble Size“] festgehalten hat.)

3.3 Auswertung der Prognose

N-Beats Ensemble konnte den Datensatz erfolgreich erlernen und prognostiziert realistische Werte. Im Testzeitraum liegt die Prognose sehr nahe an der tatsächlichen Entwicklung: Der RMSE liegt bei 3,22 und ist im Vergleich zu anderen Modellen bei der gleichen Datenreihe sehr niedrig. (Andere untersuchte Modelle wiesen deutlich höhere RMSE-Werte auf: XGBoost 8 und lineare Regression 11.)

3.4 Prognose

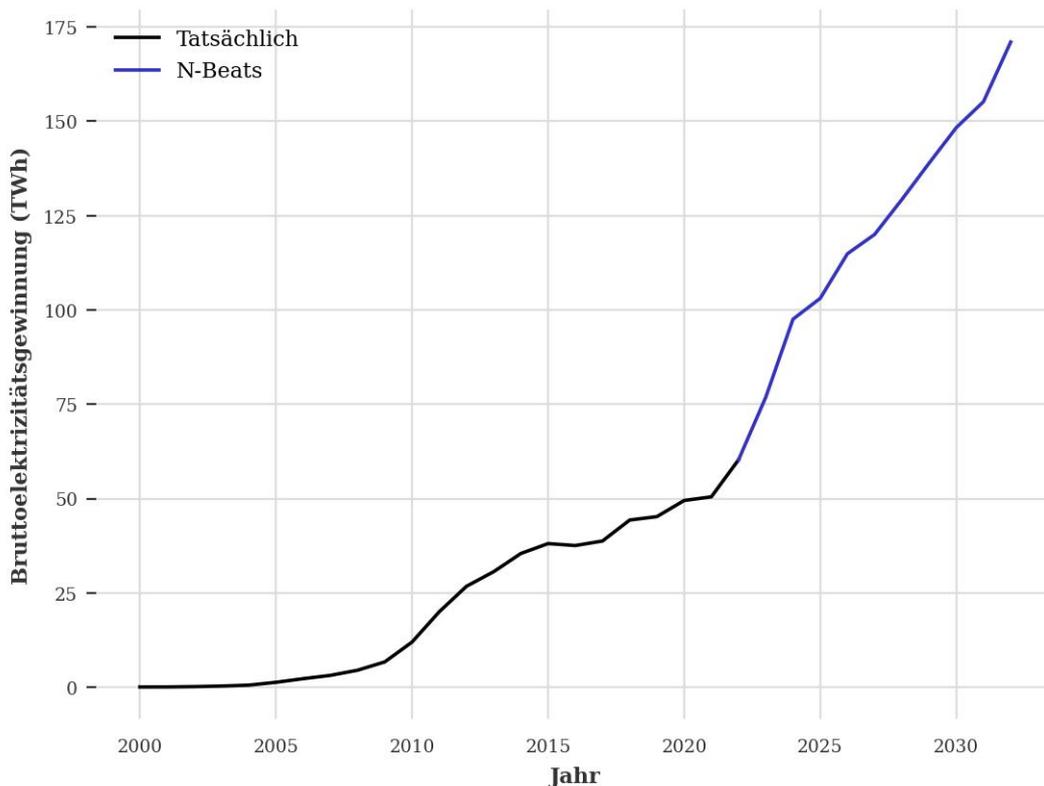


Abbildung 1: Historischer Zielparameter und die Prognosewerte von N-Beats

N-Beats prognostiziert ein starkes, stetiges, sich leicht verlangsames Wachstum der

Bruttostromerzeugung aus Solaranlagen. So soll diese 2030 bei 148TWh, 2032 bei 171TWh liegen. Das ist ein Wachstum von 10,9% p.a. und insgesamt um den Faktor 2,81. Bei gleichbleibender Gesamtbruttostromerzeugung würde der Anteil am Strommix also von 10,5% auf 30% steigen. [DeS23c]

4 Weitere Entwicklungsfaktoren

Das Modell kann die Dynamiken des Ausbaus nicht vollständig abdecken: Faktoren, die nicht beachtet wurden, müssen genannt werden, um ein vollständiges Bild des Ausbaus zu schaffen. Sie werden in harte und weiche (quantifizierbare und nicht quantifizierbare) getrennt.

Bei jeden Faktor wird abgewägt, ob er tatsächlich signifikant ist.

4.1 Harte Entwicklungsfaktoren

4.1.1 Rohstoff- und Produktionspreise

Im Modell wurden Anschaffungskosten lediglich passiv über die Stromgestehungskosten berücksichtigt. Da weder eine öffentliche Datenreihe noch zukünftige Entwicklungen zum Stahl- und Aluminiumpreis zu Parametern wurden und der Verarbeitungspreis nur schwer quantifiziert werden kann, existiert hier eine Datenlücke.

4.1.2 Effizienzsteigerungen durch technologische Innovation

Das Vorhersagemodell konnte anhand der Daten einen kontinuierlichen Anstieg der Effizienz erlernen. Es ist nicht zu erwarten, dass der Trend der Daten im untersuchten Zeitraum durch das Erreichen des physikalischen maximalen Wirkungsgrads gebrochen wird. Andererseits erreichen diese Innovationen nicht sprunghaft den Markt, sondern müssen erst durch wirtschaftliche Optimierung rentabel produzierbar gemacht werden, und sind deswegen eher inkrementell.

Während experimentell schon Wirkungsgrade von über 40% erreicht wurden, arbeiten Firmen noch an der Produktion von neuartigen Modulen mit einem Wirkungsgrad von 25%, wie beispielsweise Oxford PV [PV24].

Weil diese beiden Dynamiken in der Vergangenheit existierten und nicht verschwinden, herrscht keine Gefahr, dass die Integrität der Vorhersage dadurch verletzt wird.

4.1.3 Momentaner Strombedarf, Mangel an Speichereinheiten

Die Solaranlagen-Erzeugung steigt laut dieser Prognose bis 2033 rund 30% der Gesamtstromerzeugung [DeS23c]. Weil dieser Anteil beträchtlich ist, und PV volatil Strom liefert, kann es zu Stromverlusten kommen.

Glücklicherweise passt PV gut in das Lastenprofil des Stromnetzes. Hierzu ein Ausschnitt der Daten des SMARD aus dem Sommer.

Mit den Daten des SMARD von 2017 bis 2024 kann außerdem ausgewertet werden, wie

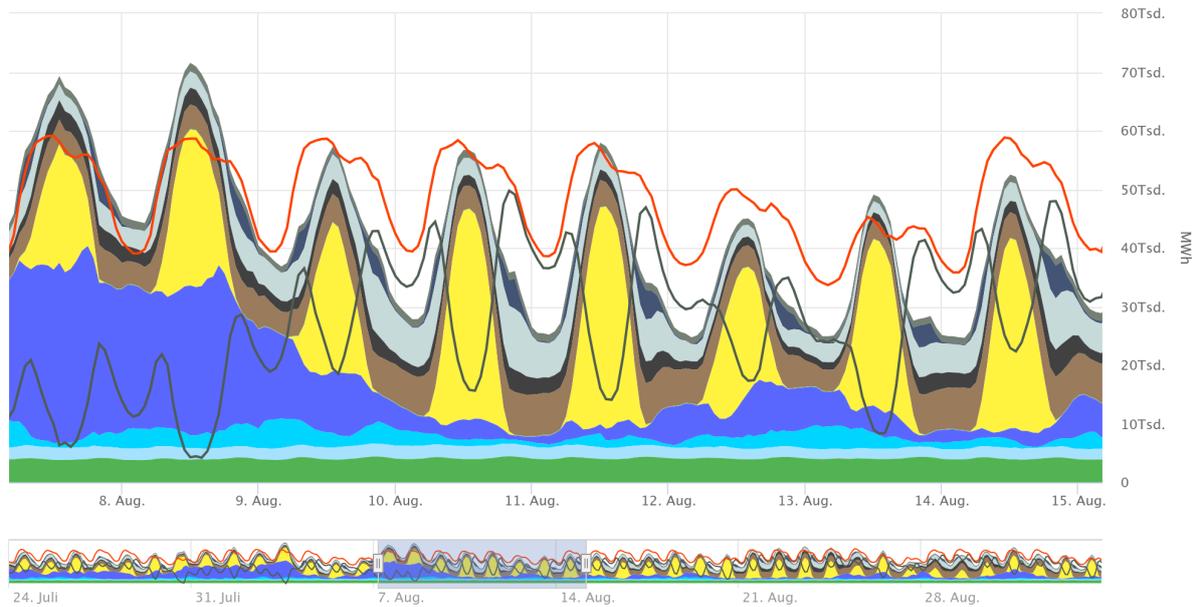


Abbildung 2: Stündliche Stromerzeugung nach Methode und Netzlast vom 7.8.23 bis zum 15.8.23 (PV in Gelb, Netzlast als rote Linie, Residuallast als graue Linie, Einheit: MWh) [Bun24]

viel Strom pro Jahr verloren gehen würde, wenn PV um einen beliebigen Prozentsatz mehr Strom produziert [SMA24a, Kategorie Stromerzeugung bzw. Stromverbrauch, realisierte Erzeugung bzw. realisierter Stromverbrauch, 1.1.17–31.12.23, Deutschland, Auflösung Stunde].

Sollte der Stromverlust derart signifikant werden, dass die Erzeugung aus PV nicht mehr rentabel ist, müssen Alternativen zu PV gefunden werden.

Diese Datenauswertung trifft die Annahme, dass konventionelle Kraftwerke vollständig abgeschaltet werden können, was zum Großteil zutrifft, und dass Speicherkapazitäten keine Rolle spielen.

Bei gleichbleibendem Verhältnis von Brutto- und Nettostrom wird es nach der N-Beats-Prognose 2032 zu einem Nettostromverlust von 20,7TWh kommen, womit 13,1% des Stroms aus Solaranlagen ungenutzt bleibt. Dieser Wert ist nicht besorgniserregend, v.a. wenn man bedenkt, dass PV ein kosteneffizienter Stromproduzent ist [ISE21, S. 19] und der Stromüberfluss tagsüber durch Lastmanagement bspw. zum Laden von E-Autos oder zur Elektrolyse genutzt werden kann.

4.1.4 Trend des Datensatzes

Fakt ist, dass die Zeitreihenanalyse aus den Daten keinen Abschwung erlernen kann. Bei einem kontinuierlich fortlaufenden Wachstumstrend ist die Prognose an einem Punkt zwangsweise unrealistisch. Obwohl das im untersuchten Zeitraum (bis 2032) wahrscheinlich

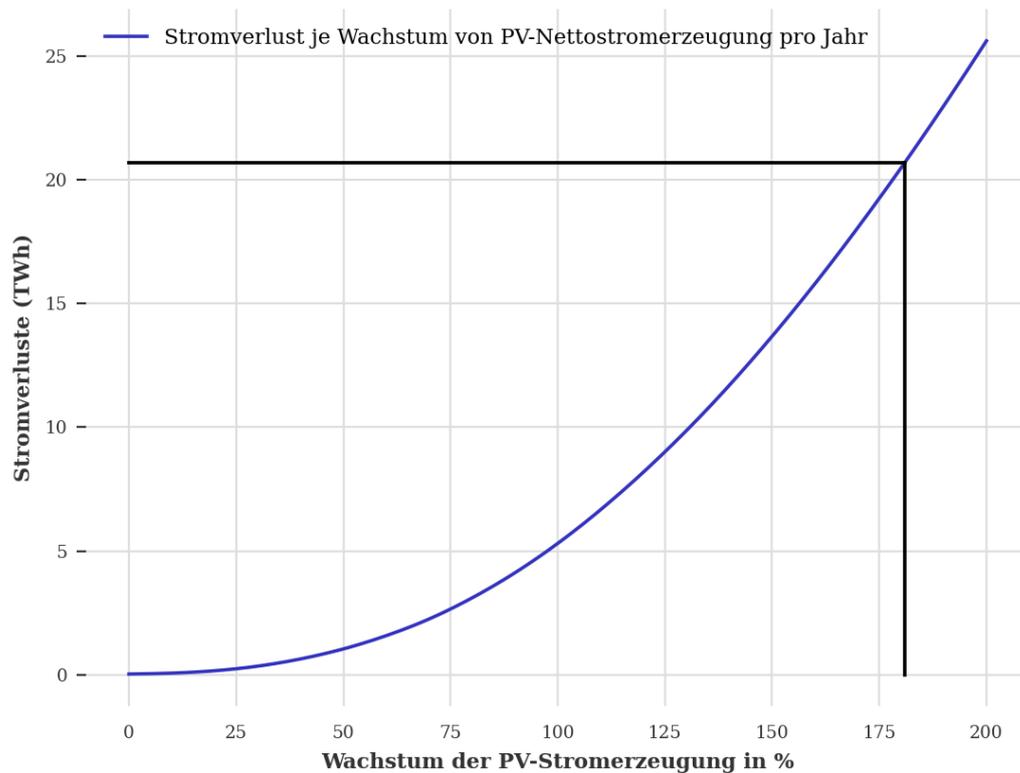


Abbildung 3: Stromerzeugungsverlust bei Wachstum der PV-Bruttostromerzeugung

nicht der Fall ist, kann diese Aussage nicht ohne eine andere Prognoseform belegt werden. Deshalb kann man es durchaus als Limitation ansehen.

4.2 Weiche Entwicklungsfaktoren

Folgende Entwicklungsfaktoren sind nur schwer zu quantifizieren, weil sie entweder komplex oder kaum vorhersehbar sind.

4.2.1 Lieferkettenengpässe und Preisvolatilität

Besonders Polysilikon hat das Potenzial, nachgelagerte Industrien unter Druck zu setzen. Bisher kam es zu folgenden Engpässen:

- 2008 - Preisverzehnfachung innerhalb von 3 Jahren
- 2022 - Preisverdreifachung innerhalb von 2 Jahren

Einerseits reift die Herstellerindustrie mit der Zeit heran, andererseits wächst die Nachfrage global erheblich, was Angebotslücken, v.a. bei seltenen Metallen (Silber, möglicherweise Tellur und Indium [Wir23, S. 78]) begünstigt. Zukünftige Engpässe sind durchaus noch möglich.

Die Volksrepublik China hält eine Monopolstellung, die sich über die gesamte Produktionskette von PV-Anlagen erstreckt:

Es gibt zwar bei Zellen und Modulen mehr als 20% nicht-chinesische Hersteller, al-

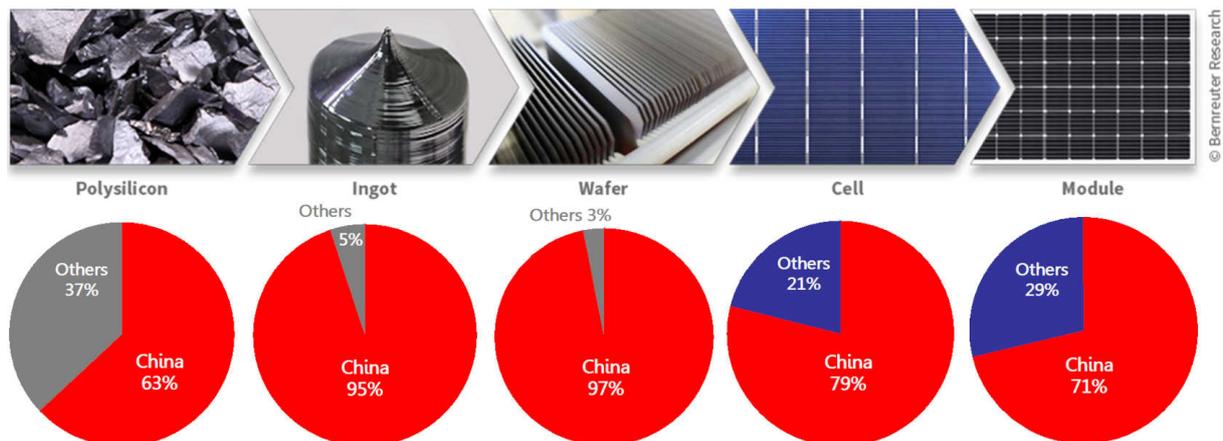


Abbildung 4: „China's share in production volumes along the solar value chain in 2019“ („Chinas Anteil an den Produktionsvolumen der Wertschöpfungskette der Solarindustrie in 2019“ [Res19])

lerdings haben diese selbst Abhängigkeiten weiter hinten in der Wertschöpfungskette (Ingots und Wafer). Hersteller sind nur dann nicht von China abhängig, wenn dessen Wertschöpfungskette keine unentbehrlichen Produktionsteile aus diesem Land beinhaltet. Solche Hersteller sind noch seltener als man von den Daten vermuten könnte.

Erstens kann es auf vielfältige Weise zu einer Zwangsisolation von der Volksrepublik China kommen. Beispielsweise durch die Entflammung des Taiwan-Konfliktes oder durch militärische Interventionen im südchinesischen Meer oder Pazifik. Die Weltmacht kann wirtschaftliche Druckmittel zum Erreichen nationaler Ziele nutzen. Das ist durchaus realistisch, weil die Abhängigkeiten Deutschlands zu China erheblicher sind als dessen Gegenstück, und sich die Disparität mit der Zeit ausweitet. [Mat22, S.25 1. Absatz]

Zweitens ist es klar, dass China bei einem Engpass den nationalen Ausbau über den Export stellt. Das Problem wird auch dadurch verschärft, dass China einen Großteil der globalen Nachfrage darstellt (ca. 40% [IEA22b, S. 18]).

Auch Perioden der Übersaturation des Marktes, die für Preisverfall sorgen, sind realistisch und haben negative Konsequenzen, v.a. Pleitewellen durch Absatzschwierigkeiten. Das würde die Produktionskapazität in den Folgejahren verringern. Dies erkennt man daran, dass beide zuvor genannten Polysilikonpreisexplosionen nach einem Preistiefpunkt entstanden.

4.2.2 Fördermaßnahmen

Wie in der Konzeption erklärt ist der Mittelabfluss nicht signifikant. Allerdings wird die Solarindustrie seit 2021 subventioniert, indem die Einspeisevergütung auch mit staatlichen Mitteln finanziert wird [Wir23, S. 14].

Gesetzlicher Kapitalfluss ist erheblich für die zukünftige Entwicklung. Er kann sich abrupt ändern, je nach wirtschaftlicher und Haushaltslage. Auch deshalb stellen sie einen schwer prognostizierbaren Aspekt auf.

4.3 Einschätzung der Prognose unter Beachtung der Limitationen

Durch die weiteren Entwicklungsfaktoren wurde aufgezeigt, dass vielfältige Probleme beim Ausbau auftreten können. Dies muss bei einer Bewertung der Prognose berücksichtigt werden. Allerdings gilt es auch zu beachten, dass der Datensatz bereits 2 Negativszenarien (nämlich die Preisexplosionen des Polysilikonpreises) beinhaltet. Bisher wurden sie von der Wertschöpfungskette aufgefangen, denn die Preiserhöhungen spiegeln sich nicht in den Anschaffungskosten wider (diese fielen jedes Jahr seit 2010) [IRE23, Abb. 3.3].

Es ist aus diesem Grund nicht klar, inwieweit diese Faktoren die Prognosewerte insgesamt verändern sollten. Diese Abweichungen könnte man sowieso schlecht quantifizieren, weshalb im Folgenden mit der unveränderten Prognose weitergearbeitet wird.

5 Auswirkungen

5.1 Einhaltung der Stromerzeugungsziele aus erneuerbaren Energien

Die Bundesregierung strebt bis 2030 eine Leistung von 215GW_p an [Bun23d]. Das wären ca. 215 TWh Bruttostromerzeugung. (Konvertierungsfaktor von 1000 von Leistung (kW_p) zu Stromproduktion (kWh) [EONa]).

Dieser Wert ist mit der Prognose von 148TWh zu vergleichen. Ohne zusätzlichen, sehr effektiven regulatorischen Rückenwind ist das Ziel im Bereich PV definitiv nicht zu erreichen.

Insgesamt strebt die Bundesregierung bis 2030 einen EE-Anteil der Stromerzeugung von 80% an [Bun]. Bei gleichbleibendem Energieverbrauch steigt der Anteil von PV bis 2032 allerdings nur auf ca. 30%. Die restlichen erneuerbaren Erzeugungsmethoden, die bis 2030 mehr als 50% der Stromerzeugung decken müssen, sind: Windkraft, Wasserkraft, Biomasse und Gewerbemüll. 2022 deckten sie 33,5% [DeS23c]. Dabei muss hinzugefügt werden, dass die Windkraftherzeugung unter diesen alleinig wächst. Die Anderen blieben gemessen an der Bruttostromerzeugung stabil (Biomasse) oder waren zuletzt zurückläufig

(Wasserkraft, Geothermie) [BMW24, S. 20]. Die Stromerzeugung aus Windkraft lag 2022 bei 21,7% [DeS23c], müsste also innerhalb von 10 Jahren um mindestens weitere 16,5% der Gesamtstromverbrauchs steigen, was einem Wachstum von 76% entspricht. Dies kann mit dem Wachstum im Zeitraum von 2014 bis 2022 verglichen werden, in dem die Bruttostromerzeugung von Windkraft um 141% stieg [BMW24, S. 20].

Insgesamt ist realistisch, dass die Erzeugungsziele für 2030 eingehalten werden.

Eine Untersuchung der Residuallast bei Dunkelflauten in diesem Kontext böte Potenzial, diese Schlussfolgerung zu verfeinern, würde den Umfang dieser Arbeit aber übersteigen.

5.2 Reduktion der Emissionswerte

Es ist aufgrund des anthropogenen Klimawandels notwendig, Energieträger zu nutzen, die möglichst wenig Emissionen verursachen. In diesem Kontext ist die quantifizierte Menge der zukünftig nicht ausgestoßenen Schadstoffe in Folge des Ausbaus eine interessante Metrik. Diese ergibt sich aus einem repräsentativen Mix der Emissionen der konventionellen Methoden, die durch Solaranlagen ersetzt werden, subtrahiert mit dem Ausstoß durch Stromerzeugung dieser Solaranlagen. Zu Letzterem gehört die Produktion und Verschiffung. Die Installation und Wartung ist weitaus weniger energieintensiv, wird mehrheitlich manuell durchgeführt und kann daher vernachlässigt werden.

5.2.1 Kompensation konventioneller Energie

Logischerweise werden zuerst besonders klimaschädliche Kraftwerke, nämlich Braunkohle-KWs, abgeschaltet. Ein vollständiger Kohleausstieg bis 2032 scheint unrealistisch, weil die Ziele bei PV und Windkraft höchstwahrscheinlich nicht erreicht werden. Auch neu geplante Gaskraftwerke, wie die in der Kraftwerksstrategie [Kli24] vom Februar 2024 haben eine zu geringe Leistung (4 x 2,5GW), um den Ausstieg nennenswert zu beschleunigen. Deshalb wird nur mit einem Braunkohle-Ausstieg gerechnet, welcher im Durchschnitt linear vollzogen wird. Der Schadstoffausstoß beim Bau der Kraftwerke ist vernachlässigbar. [TL23, A1], Ausstoßeffizienz selbst berechnet (mit Bruttostromerzeugung von [DeS23c])

Energieträger	CO2-Ausstoß	Bruttostromerzeugung	Effizienz
Konventionell Gesamt	189	316,6	0,6
Braunkohle	93	91,7	1,01
Konventionell Rest	96	224,9	0,43

Tabelle 1: Daten zum Schadstoffausstoß ausgewählter Energieträger, Werte aus dem Jahr 2020, CO2-Ausstoß in MT, Bruttostromerzeugung in TWh, Ausstoßeffizienz in MT/TWh

Bei einem linear vollzogenen Ausstieg beträgt der Anteil von Braunkohle an der Gesamtausstoßeffizienz über den Zeitraum die Hälfte der heutigen ($A = 0,5 b h$). Das ergibt einen Wert von 0,52 MT/TWh. $(0,43 + (0,6 - 0,43)/2)$

5.2.2 Schadstoffausstoß bei Produktion und Transport

Um diesen zu berechnen, werden Ergebnisse von Reichel et al. [Rei+22, S. 2 Abb. 2] benutzt. Die Werte für eine Produktion in China werden genommen, weil die meisten Module aus China geliefert werden.

Bauweise	kg Co2-Äquivalent/kWp
Glas-Glas	810
Glas-Backsheet	752

Es wurden keine Daten zum Marktanteil der beiden Varianten gefunden, weshalb mit dem Mittelwert aus beiden weitergerechnet wird. Die Lebensdauer einer PV-Anlage ist im Mittel 30 Jahre [EONb]. Pro Jahr produziert sie typisch 1000 kWh/kWp [EONa]. Folglich beziffert sich der Ausstoß je Bruttostromerzeugung auf ca. 26g/kWh $((810 + 752)/2/1000/30)$. Umgerechnet: 0.026 MT/TWh.

5.2.3 Quantifizierung

Von 2023 bis 2032 werden nach der Prognose 1255TWh Strom durch PV erzeugt. Insgesamt werden also 610MT CO₂ eingespart $((0.52 - 0.026) * 1255 = 619,97)$. Zum Vergleich: Deutschland stieß 2022 insgesamt 666MT CO₂ aus [Umw23]. Die Schadstoffeinsparungen stellen bereits während des Ausbaus einen beträchtlichen Bruchteil der nationalen Emissionsmenge dar.

Hier wurde für konventionelle Energieträger mit CO₂ und nicht Co₂-Äquivalenten gearbeitet (dafür wurde keine qualitative Quelle gefunden). Letztere sind höher, weil andere Schadstoffe hinzukommen.

Inwiefern dieser Vorteil relevant ist, kann außerdem mithilfe aktueller Preise für Emissionsrechte veranschaulicht werden. Dieser liegt Stand 20.2.24 bei 54,225€ für 1T Co₂-Äquivalente [Fra24].

So würde für jede durch Solaranlagen erzeugte Terawattstunde, dessen Erzeugung 52,4M€ bis 197,4M€ kostet [ISE21, S.5 1. Absatz] der Ausstoß von 0,494MT CO₂ mit einem Preis von 54,225M€ verhindert werden.

5.3 Energieunabhängigkeit

Für den Industriestandort Deutschland spielen Stromkosten eine zentrale Rolle. Die Wichtigkeit von einer verlässlichen, möglichst autarken Energieerzeugung wurde aktuell durch die Abkehr von russischem Gas aufgrund des Ukraine-Kriegs demonstriert, die den Strompreis in die Höhe trieb, Sparmaßnahmen erforderte und den Standort deutlich unattraktiver machte.

Photovoltaikanlagen erzeugen Strom durch die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische

Energie, und brauchen daher keine erschöpflichen Ressourcen. Nach der Installation existiert lediglich die Notwendigkeit der Wartungen/Kontrollen und des Ersetzens im Falle des Ausfalls. Wartungen/Kontrollen können von regionalen Fachkräften vollzogen werden und stellen somit keine Abhängigkeit nach außen dar.

5.3.1 Wegfallende Abhängigkeiten konventioneller Energieproduzenten

Deutschland ist für Steinkohle vollständig und für Erdgas nahezu vollständig auf Importe angewiesen. Braunkohle wird nicht importiert; Es ist genügend vorhanden. [Umw24a]

Durch das EU-Embargo auf Kohle und Gas aus Russland fielen die Hauptabhängigkeiten konventioneller Energie zum problematischen Staat weg:

Steinkohle wurde 2023 (bis November) v.a. aus den USA (33,6%), Australien (33,2%) und Kolumbien (14,5%) importiert [DeS23a]. (Großbritannien, Kanada und Südafrika wurden ohne eigene Werte, aber ebenfalls explizit genannt, weshalb sie wahrscheinlich die Mehrheit des Rests darstellen.)

Deutschland bezieht Erdgas fast ausschließlich aus EU-Staaten wie Norwegen, Belgien und der Niederlande. Derzeit finden nur rund 7% der Importe finden als LNG statt. [Bun23a] Weil diese Staaten selbst Gas importieren, muss die Herkunft dessen genauer untersucht werden:

- Norwegen (2021): Fast nur Eigenproduktion [OEC21, Sektion „Historical Data“]
- Niederlande (2023): LNG, Eigenproduktion, Norwegen, Belgien [Net24]
- Belgien (bis 2020): Norwegen, Niederlande, Qatar [IEA22a, Graph „Natural gas net imports in Belgium“]

Auch wenn es große Abhängigkeiten gibt, sind diese (zumindest für Deutschland) geopolitisch unbedenklich:

- Die meiste Steinkohle kommt aus vollwertigen Demokratien.
- Das meiste Erdgas kommt aus EU-Staaten und den USA.
- Diese beiden Energieträger haben 2022 zusammen 25% der Bruttostromerzeugung ausgemacht.

Deshalb wäre das Wegfallen dieser bis auf die finanziellen Folgen kein nennenswerter Vorteil mehr. Tatsächlich ist es wahrscheinlicher, dass es im untersuchten Zeitraum nicht zum Ausstieg dieser kommt, sondern primär Braunkohlekraftwerke heruntergefahren werden, weil sie umweltschädlicher sind.

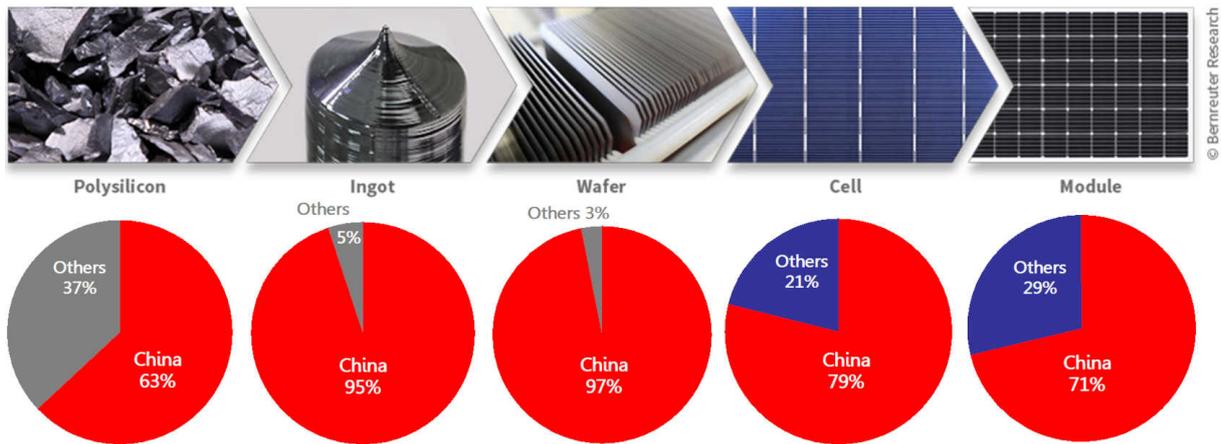


Abbildung 5: „China’s share in production volumes along the solar value chain in 2019“ („Chinas Anteil an den Produktionsvolumen der Wertschöpfungskette der Solarindustrie in 2019“ [Res19])

5.3.2 Abhängigkeit von China als Lieferant

Wie in den weiteren Entwicklungsfaktoren festgestellt, herrscht eine direkte, enorme Abhängigkeit von China bei dem Ausbau der PV-Anlagen. Außerdem ist diese aufgrund der dargelegten Spannungsverhältnissen zwischen der Weltmacht und westlichen Industrienationen, zu denen auch Deutschland gehört, relevant.

5.3.3 Interpretation

Insgesamt erhöhen sich die Abhängigkeiten. Die Qualität der Abhängigkeit von der Volksrepublik China ist besonders problematisch, weil es zu ihr bereits gesamtwirtschaftlich viele bedeutsame Abhängigkeiten gibt.

Dabei muss aber beachtet werden, dass diese Abhängigkeit keine Gefahr für die Versorgungssicherheit darstellt. Kommt es zum Bruch zwischen Deutschland und China, würde sich der Ausbau verzögern. Obwohl Deutschland beim *Ausbau* auf China angewiesen ist, existiert keine versorgungstechnische Gefahr, weil konventionelle Kraftwerke erst abgeschaltet werden, wenn neue Solaranlagen bereits Strom liefern.

Zudem könnten langfristig erneuerungsbedürftige Solaranlagen langsam wieder durch konventionelle Kraftwerke ersetzt werden. Das würde zwar den Zweck der Energiewende verfehlen. Punkt ist aber, dass es keine unmittelbaren wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Gefahren mit sich bringt.

Die Abhängigkeit lockert sich erst nach dem Zeitraum dieser Analyse, wenn der Ausbau weitgehend abgeschlossen ist, und Anlagen v.a. zum Ersetzen defekter angeschafft werden.

5.4 Stromnetzstabilität

Das Stromnetz ist stabil, wenn die Stromeinspeisung zu jedem Zeitpunkt mindestens so groß ist wie der Stromverbrauch. Die PV-Erzeugung ist an die Sonneneinstrahlung gekoppelt, weshalb es zu einem wetter- oder zeitbedingten Ungleichgewicht kommen kann. Kapazitäten von konventionellen, flexiblen Kraftwerken (Gas und Kohle), solch ein Ungleichgewicht auszugleichen, existieren und werden auch in Zukunft existieren, weil diese erst abgeschaltet werden, wenn es stabilitätsbedingt möglich ist. Die Datenlage für diese Entscheidung ist in Deutschland gut: U.A. existiert das SMARD und das Marktstammdatenregister. Des Weiteren stieg die gesamte installierte Erzeugungsleistung von 2017 (213GW) bis 2023 auf 232GW, worauf sich schließen lässt, dass konventionelle Kraftwerke nicht schnellstmöglich abgeschaltet werden [SMA24b]. Auch dies erhöht die Sicherheitsspanne. Kurzfristigen Dunkelflauten werden außerdem durch Stromimporte aus dem Ausland entgegengewirkt.

Der SAIDI-Index, der Versorgungsunterbrechungen beziffert, fiel sogar in den letzten Jahren während des Ausbaus der EE. (Siehe Abbildung 6) Selbst wenn sich der SAIDI-Index

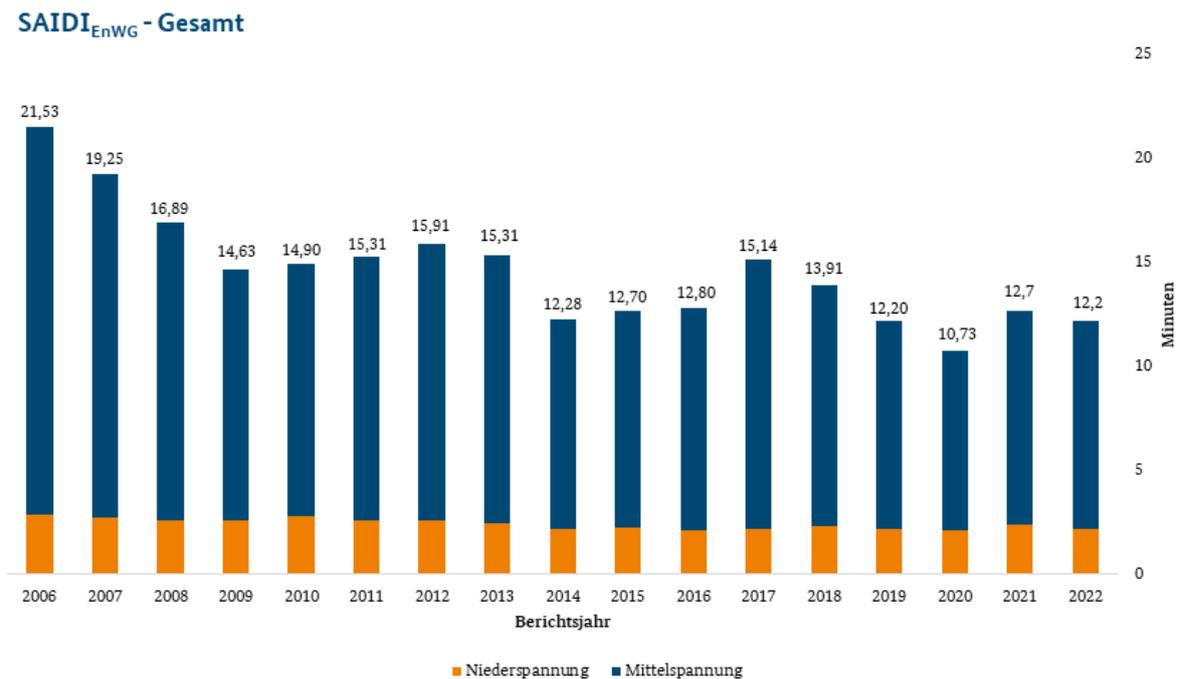


Abbildung 6: SAIDI-Index bundesweit [Bun23b]

aufgrund von einer zu starken Abhängigkeit zu PV kombiniert mit unvorhersehbaren Wetterereignissen erhöhen sollte, bleibt das Deutsche Stromnetz relativ zu anderen noch stabil. (Siehe Abbildung 7)



Abbildung 7: Stromausfälle in Minuten pro Jahr europäischer Staaten [Cub23]

5.5 Disparität zwischen Nord- und Süddeutschland

Die Stromerzeugung weist ein Nord-Süd-Gefälle auf: Durch Windenergie wird viel Strom in das nördliche Stromnetz eingespeist, während er gleichzeitig vergleichsweise wenig Strom verbraucht.

Das sorgt für eine Kontroverse: Norddeutschland verliert durch den einheitlichen Strompreis Standortvorteile (einen geringeren Strompreis).

Solaranlagen werden zur großen Mehrheit in Süd- und Mitteldeutschland errichtet. Siehe dazu: [PLK, S. 9 Abb. 3]. Aus diesem Grund lockert der Solaranlagen-Ausbau die Energiedisparität. Wird eher die Windkraft ausgebaut, verschärft sich die Disparität.

Es ist zu erwarten, dass sie sich mittelfristig lockert, weil PV schneller ausgebaut wird als Windkraft [BMW24, S. 20].

5.6 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage lautet: „Ist der Photovoltaik-Ausbau in Deutschland insgesamt positiv zu bewerten? Inwiefern/inwiefern nicht?“

Nachdem die Auswirkungen analysiert wurden, kann man diese in positive und negative Aspekte einordnen, und dann vergleichen:

Auch wenn die Ausbauziele von Photovoltaik nur schwer eingehalten werden können, ist

die Reduktion der Emissionswerte dennoch immens. Zusätzlich lockert der Ausbau die Stromnetzdisparität zwischen Nord- und Süddeutschland.

Man muss auch bedenken, dass PV eine der kostengünstigsten Stromquellen ist [ISE21, S. 19], und es deshalb, abgesehen von dem Abschalten noch funktionierender Kraftwerke, keinen Aufpreis für Klimafreundlichkeit gibt. Tatsächlich spielen eingesparte Emissionen finanziell betrachtet eine erhebliche Rolle (25% bis 100% der Stromgestehungskosten).

Gleichzeitig ist nicht zu erwarten, dass die Stromnetzstabilität wegen des sich erhöhenden Strommix-Anteil von PV, einem volatilen Produzenten, sinkt. In der Praxis würden zur Sicherheit konventionelle Kraftwerke langsamer als möglich ersetzt. Der größte Negativfaktor ist die sich ausweitende Abhängigkeit zu China. Wie aber festgestellt wurde, stellt sie in diesem Fall für bis auf die Energiewende kein Risiko dar.

Insgesamt überwiegen die Vorteile *deutlich*. Der PV-Ausbau lohnt sich nicht nur ökologisch, sondern gegenwärtig auch konkret wirtschaftlich.

6 Schluss

In dieser Facharbeit wurde die Entwicklung der PV-Bruttostromerzeugung mit einem kompetenten Zeitreihenmodell bis 2032 prognostiziert. Es wurden weitere Entwicklungsfaktoren untersucht, um ein Verständnis dafür zu schaffen, inwiefern reale Entwicklung abweichen kann. Basierend auf der Prognose wurden die bedeutsamsten Auswirkungen des Photovoltaikausbaus analysiert, um ihn zu bewerten.

6.1 Ergebnisse

Die zentrale Feststellung ist, dass die Vorteile den Nachteilen klar überwiegen. Beim PV-Ausbau gibt es wesentliche wirtschaftliche Vorteile.

Es folgen die wichtigsten Ergebnisse aus den jeweiligen Themenbereichen:

6.1.1 Prognose

N-Beats prognostiziert ein stetiges Wachstum der PV-Bruttostromerzeugung. Diese soll 2032 bei 176 TWh liegen und ausgehend von 2023 im Mittel 10,9% p.a. wachsen.

Bei gleichbleibender Gesamtbruttostromerzeugung soll der Anteil von Solarstrom von 10,4% auf 30,1% steigen.

6.1.2 Weitere Entwicklungsfaktoren

Relevante Faktoren, die das Modell nicht berücksichtigt, sind Ressourcen- und Verarbeitungskosten, die Menge der zukünftigen staatlichen Förderung sowie mögliche Negativszenarien wie Lieferkettenengpässe oder Marktmissverhältnisse. Weil der aus den Daten erkennbare Trend keine Verlangsamung beinhaltet, muss die Prognose ab einer ungewissen Länge unrealistisch sein.

Faktoren, die keine große Rolle für den untersuchten Zeitraum spielen, sind: Technische Innovationen, die obere Grenze des momentanen Strombedarfs, der Austauschbedarf von Solarmodulen und ein Mangel an Speichereinheiten.

6.1.3 Auswirkungen und Bewertung

Nach der Prognose wird Deutschland die von der Bundesregierung für 2030 angestrebte installierte PV-Leistung von 215GWp nicht erreichen. Dem Ziel, 80% des Stroms 2030 aus erneuerbaren zu beziehen, ist, auch unter Berücksichtigung dessen, realistisch.

Um die Ziele im Sektor PV zu erreichen, muss die Ausbaugeschwindigkeit erhöht werden. Dies kann beispielsweise durch stärkere staatliche Förderung herbeigeführt werden.

Während des Ausbaus entstehen große Abhängigkeiten von China. Sie bedrohen die Energiewende, aber nicht die Versorgungssicherheit des Strommarkts.

Die Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern sind aus geopolitischer Sicht ungefährlich. Deshalb steigen die Abhängigkeiten nach außen durch den PV-Ausbau insgesamt. Dies ist der primäre Negativfaktor.

Die Stromnetzstabilität ist durch den Ausbau erneuerbarer Energien nicht gefährdet. Die Geschwindigkeit der Energiewende ist durch die Volatilität der erneuerbaren Stromerzeugung eingeschränkt.

Ein stärkerer Ausbau von PV kann die Energiedisparität zwischen Nord- und Süddeutschland lockern. Dass dies eintritt, ist zu erwarten.

6.2 Implikationen

Eine genauere Analyse möglicher Negativszenarien, die sich mit der Wertschöpfungskette und den Solarindustriedynamiken auseinandersetzt, würde die Zeitreihenanalyse ergänzen. Inwiefern die Volatilität der erneuerbaren Energien und die Speicherkapazität den Ausbau verlangsamen, sollte genauer untersucht werden. Dies kann mit einer Analyse der Residuallast anhand der Daten des SMARD geschehen.

Das Gegenstück dieser Analyse für Windkraft wäre ebenfalls hochinteressant. Mit ihr kann ein akkurateres Bild für die nächsten Jahre geschaffen werden.

Literatur

- [BAE24] Umweltbundesamt auf Basis Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. *Stromverbrauch*. 2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch> (besucht am 19.01.2024).
- [BMU11] BMU. *Erneuerbare Energien 2011*. 2011. URL: https://web.archive.org/web/20120505200145/http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2011_bf.pdf (besucht am 18.02.2024).
- [BMW23] BMWK. *Bundesbericht Energieforschung 2023*. 2023. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (besucht am 23.02.2024).
- [BMW24] BMWK. *Erneuerbare Energien in Zahlen*. 2024. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2022.html> (besucht am 01.10.2023).
- [Bun] Bundesregierung. *Das Zeitalter der erneuerbaren Energien*. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/erneuerbare-energien-317608> (besucht am 23.02.2024).
- [Bun23a] Bundesnetzagentur. *Gasimporte in GWh/Tag*. 2023. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle_gasversorgung/_svg/Gasimporte/Gasimporte.html (besucht am 22.12.2023).
- [Bun23b] Bundesnetzagentur. *Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom*. 2023. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html (besucht am 07.11.2023).
- [Bun23c] Bundesnetzagentur. *Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur, Datenbank „Stromerzeugungseinheiten“*. 2023. URL: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht> (besucht am 17.12.2023).
- [Bun23d] Bundesregierung. *Fragen und Antworten zur Energiewende*. 2023. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/faq-energiewende-2067498> (besucht am 07.12.2023).
- [Bun24] Bundesnetzagentur. *Marktdaten*. 2024. URL: <https://www.smard.de/page/home/marktdaten/78?marketDataAttributes=%7B%22resolution%22:%22hour%22,%22from%22:1691374253438,%22to%22:1692065453437,%22moduleIds%22:%5B1001225,1004068,1001223,1004071,1004070,1001227,5000410,1001224,1004067,1001226,1001228,1004066,1004069,5004359%5D,%22selectedCategory%22:1,%22activeChart%22:1%7D>

- 22:true,%22style%22:%22color%22,%22categoriesModuleOrder%22:%22%7B%7D,%22region%22:%22DE%22%7D (besucht am 16.02.2024).
- [Cub23] CubeConcepts. *SAIDI: Deutsches Stromnetz weiterhin stabil*. 2023. URL: <https://cubeconcepts.de/saidi-deutsches-stromnetz-weiterhin-stabil/> (besucht am 23.02.2024).
- [Dah23] Uwe Dahlmeier. *Die Photovoltaik entwickelt sich schneller und die Kosten sinken stärker als von Experten geschätzt – die Modellierung auf Grundlage empirischer Daten liefert bessere Prognosen*. 2023. URL: <https://www.pv-magazine.de/2023/11/29/die-photovoltaik-entwickelt-sich-schneller-und-die-kosten-sinken-staerker-als-von-experten-geschaetzt-die-modellierung-auf-grundlage-empirischer-daten-liefert-bessere-prognosen/> (besucht am 10.05.2024).
- [DeS23a] DeStatis. *Einfuhr von Steinkohle für das Jahr 2023*. 2023. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/einfuhr-steinkohle-jaehrlich.html> (besucht am 22.11.2023).
- [DeS23b] DeStatis. *Tabelle "Verbraucherpreisindex: Deutschland, Jahre"*. 2023. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61111-0001&startjahr=1991#abreadcrumb> (besucht am 27.11.2023).
- [DeS23c] basierend auf Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) DeStatis. *Bruttostromerzeugung in Deutschland*. 2023. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html> (besucht am 20.02.2024).
- [EONa] EON. *kWp: Leistung und Ertrag von PV-Anlagen*. URL: <https://www.eon.de/de/pk/solar/kwp-bedeutung-umrechnung.html> (besucht am 23.02.2024).
- [EONb] EON. *Lebensdauer einer Solarzelle*. URL: <https://www.eon.de/de/pk/solar/lebensdauer-solarzelle.html> (besucht am 23.02.2024).
- [Fra24] Börse Frankfurt. *Kohlendioxid (CO₂ Emissionsrechte) Rohstoff — XC000A0C4KJ2 — Kurs*. 2024. URL: <https://www.boerse-frankfurt.de/rohstoff/kohlendioxid-co2-emissionsrechte> (besucht am 20.02.2024).
- [Fö] Solarenergie Förderverein. *Einspeisevergütung*. URL: <https://www.sfv.de/lokal/emails/sj/verguetu>.
- [IEA21] IEA. *Renewables 2021*. 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021> (besucht am 23.02.2024).
- [IEA22a] IEA. *Belgium Natural Gas Security Policy*. 2022. URL: <https://www.iea.org/articles/belgium-natural-gas-security-policy> (besucht am 23.02.2024).

- [IEA22b] IEA. *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*. 2022. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf> (besucht am 23.02.2024).
- [IRE23] IRENA. *Renewable power generation costs in 2022*. 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> (besucht am 23.02.2024).
- [ISE21] Fraunhofer ISE. *Studie: Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien*. 2021. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf (besucht am 23.02.2024).
- [JFX23] Hongwen Jia, Shugang Fan und Miao Xia. *The Impact of Renewable Energy Consumption on Economic Growth: Evidence from Countries along the Belt and Road*. 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/su15118644> (besucht am 23.02.2024).
- [Kli24] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Einigung zum Kraftwerksstrategie*. 2024. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240205-einigung-zur-kraftwerksstrategie.html> (besucht am 05.02.2024).
- [Kö22] Theodor König. *Vorteile und Nachteile von Windenergie und Solarenergie auf technischer und wirtschaftlicher Ebene*. 2022. URL: <https://www.lehmanns.de/shop/wirtschaft/58641981-9783346583154-vorteile-und-nachteile-von-windenergie-und-solarenergie-auf-technischer-und-wirtschaftlicher-ebene> (besucht am 10.05.2024).
- [Mat22] Jürgen Matthes. *Gegenseitige Abhängigkeit im Handel zwischen China, der EU und Deutschland*. 2022. URL: <https://www.iwkoeln.de/studien/juergen-matthes-gegenseitige-abhaengigkeit-im-handel-zwischen-china-der-eu-und-deutschland.html> (besucht am 16.02.2024).
- [Net24] Statistics Netherlands. *Natural gas balance sheet; supply and consumption*. 2024. URL: <https://www.cbs.nl/en-gb/figures/detail/00372eng> (besucht am 25.01.2024).
- [OEC21] OEC. *Petroleum Gas in Norway*. 2021. URL: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/petroleum-gas/reporter/nor> (besucht am 23.02.2024).
- [Ore+22] Boris N. Oreshkin u. a. *N-BEATS: Neural basis expansion analysis for interpretable time series forecasting*. 2022. URL: <https://openreview.net/forum?id=r1ecqn4YwB#> (besucht am 18.02.2024).
- [PLK] Dominik Peper, Sven Längle und Dr. Christoph Kost. *Photovoltaikzubau in Deutschland in Zahlen*. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/>

- content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Kurzstudie_Fraunhofer_ISE_Photovoltaik-Zubau-in-Zahlen.pdf (besucht am 23.02.2024).
- [PV24] Oxford PV. *Oxford PV stellt neuen Weltrekord im Wirkungsgrad von Solarmodulen auf*. 2024. URL: <https://de.oxfordpv.com/news/oxford-pv-stellt-neuen-weltrekord-im-wirkungsgrad-von-solarmodulen-auf> (besucht am 20.02.2024).
- [Rei+22] Christian Reichel u. a. *CO2 Emissions of silicon photovoltaic modules - Impact of module design and production location*. 2022. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/wcpec-8/Reichel_5DV234.pdf (besucht am 23.02.2024).
- [Res19] Bernreuter Research. *Solar Value Chain*. 2019. URL: <https://www.bernreuter.com/solar-industry/value-chain/> (besucht am 17.12.2023).
- [SMA23] SMARD. *Marktdaten / realisierte Erzeugung*. 2023. URL: <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten/?downloadAttributes=%7B%22selectedCategory%22:2,%22selectedSubCategory%22:5,%22selectedRegion%22:%22DE%22,%22selectedFileType%22:%22CSV%22,%22from%22:1483225200000,%22to%22:1703458799999%7D> (besucht am 24.12.2023).
- [SMA24a] SMARD. *Daten herunterladen*. 2024. URL: <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten> (besucht am 21.02.2024).
- [SMA24b] SMARD. *Marktdaten / installierte Erzeugungsleistung*. 2024. URL: <https://www.smard.de/home/marktdaten?marketDataAttributes=%7B%22resolution%22:%22year%22,%22from%22:1609445960302,%22to%22:1672520090357,%22moduleIds%22:%5B3000189,3003792,3004076,3000186,3000188,3000194,3004073,3004072,3004075,3000198,3004074,3000207%5D,%22selectedCategory%22:null,%22activeChart%22:true,%22style%22:%22color%22,%22categoriesModuleOrder%22:%7B%7D,%22region%22:%22DE%22%7D> (besucht am 10.02.2024).
- [Sol22] BSW Solar. *Feste Einspeisevergütungen in Cent/kWh gemäß bisherigem EEG 2021 und EEG 2017*. 2022. URL: <https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/02/EEG-Verguetungsuebersicht-Basis.pdf> (besucht am 23.02.2024).
- [TL23] Umweltbundesamt Dessau-Roßlau Petra Icha und Dr. Thomas Lauf. *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022*. 2023. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf (besucht am 23.02.2024).
- [Umw23] Umweltbundesamt. *Kohlendioxid-Emissionen*. 2023. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in->

- deutschland/kohlendioxid-emissionen#kohlendioxid-emissionen-im-vergleich-zu-anderen-treibhausgasen (besucht am 21.02.2024).
- [Umw24a] Umweltbundesamt. *Primärenergiegewinnung und -importe*. 2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe> (besucht am 23.02.2024).
- [Umw24b] Umweltbundesamt. *Primärenergiegewinnung und -importe*. 2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe> (besucht am 19.01.2024).
- [WFBWZ23] Zentrum für Sonnenenergie-und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). *Wirtschaftliche Impulse durch Erneuerbare Energien*. 2023. URL: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/Genau_der_Newsletter/Ausgabe_1_Dezember_2023/wirtschaftliche-impulse-durch-erneuerbare-energien.pdf (besucht am 23.02.2024).
- [Wir23] Dr. Harry Wirth. *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. 2023. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> (besucht am 27.09.2023).

Abbildungsverzeichnis

1	Historischer Zielparame-ter und die Prognosewerte von N-Beats	11
2	Stündliche Stromerzeugung nach Methode und Netzlast vom 7.8.23 bis zum 15.8.23 (PV in Gelb, Netzlast als rote Linie, Residuallast als graue Linie, Einheit: MWh) [Bun24]	13
3	Stromerzeugungsverlust bei Wachstum der PV-Bruttostromerzeugung . . .	14
4	„China’s share in production volumes along the solar value chain in 2019“ („Chinas Anteil an den Produktionsvolumen der Wertschöpfungskette der Solarindustrie in 2019“ [Res19])	15
5	„China’s share in production volumes along the solar value chain in 2019“ („Chinas Anteil an den Produktionsvolumen der Wertschöpfungskette der Solarindustrie in 2019“ [Res19])	20
6	SAIDI-Index bundesweit [Bun23b]	21
7	Stromausfälle in Minuten pro Jahr europäischer Staaten [Cub23]	22

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntliche gemacht habe.

Albig, den 23.2.24

Davide Wiest

Unterschrift