



24.11.2021

## Stresstest für den vorgezogenen Kohleausstieg – Preppen für die Dunkelflaute III

### Anlass

---

Die Energiewende in Deutschland ist eine Revolution der Stromversorgung: Sie stützt sich auf Windräder und Photovoltaik-Anlagen (PV) und richtet sich damit nach dem Wetter. Das durch Thomas Edison erdachte Prinzip, immer so viel Strom zu erzeugen wie Menschen gerade verbrauchen, wird damit ersetzt durch ein wesentlich älteres: Die Arbeit folgt Wind und Sonne, das Wetter liefert den Takt der Stromerzeugung. Dabei wird es nicht nur gute Stromernten mit großen Überschüssen geben, sondern auch Stromflauten – Zeiten, in denen die Stromerzeuger weniger Strom erzeugen als gebraucht wird.

Das wirft Fragen auf: Kann es künftig zu Stromausfällen kommen, wenn nicht genug Wind weht? Wie speichert man Strom für schlechte Zeiten? Kann man Atom- und Kohlekraftwerke wirklich mit wenigen Jahren Abstand nacheinander vollständig abschalten? Wie viel Wind- und PV-Anlagen wird Deutschland brauchen? Womit soll bei Flaute Strom erzeugt werden?

Um diese und andere Fragen einzuschätzen, hat das SMC ein interaktives Tool entworfen, mit dem es möglich ist, auf der Basis der Stromerzeugungsdaten von 2015 bis 2020 künftige Szenarien der Energiewende, politische Pläne und auch eigene Ideen zu testen [5]. In diesem Fact Sheet zeigen wir anhand von zwei Szenarien aus der Forschung: Ein Kohleausstieg 2030 ist von der Strombilanz her möglich – aber nur, wenn viel mehr Windräder, Solar-Anlagen und auch Gaskraftwerke als Back-up gebaut werden.

### Übersicht

---

▶ Stress für die Stromversorgung: Die Dunkelflaute	2
▶ Die Dunkelflaute in der Vergangenheit	3
▶ Die Dunkelflaute mit den Werten der Zukunft	4
▶ Der vorgezogene Kohleausstieg: Stresstest für die Stromversorgung	8
▶ Der vorgezogene Kohleausstieg mit realistischem Stromimport: Stresstest Teil 2	9
▶ Weitere Recherchethemen, die wir sehen	11
▶ Fazit	14
▶ Literaturstellen, die zitiert wurden	15



## Stress für die Stromversorgung: Die Dunkelflaute

- ▶ Kurze Stromflauten gibt es über das ganze Jahr verteilt. Längere Phasen mit sehr niedrigen Einspeisungen von Photovoltaik (PV) und Windrädern sind dagegen seltener; über acht Tage lange fanden wir mit einem selbst entwickelten Tool in den Stromerzeugungsdaten zwischen 2015 und 2020 drei [10]. Das sind Stress-Phasen für Erneuerbare Stromsysteme.
- ▶ Mit diesem Tool kann man mit den historischen Stromerzeugungsdaten nun auch simulieren, wie sich ein möglicher künftiger Kraftwerkspark in diesen Situationen bewährt hätte [5]. Solche Verfahren werden auch in der Forschung eingesetzt, um Annahmen zu testen [1][2][10]. Um zu zeigen, wie man dieses Tool einsetzen kann, haben wir zwei Szenarien aus der Forschung für das Jahr 2030 ausgewählt, um Schritt für Schritt zu zeigen, wo die Schwierigkeiten für einen vorzeitigen Kohleausstieg lägen.
- ▶ Wir haben diese beiden Szenarien ausgewählt:
  - 1. „Klimaneutrales Deutschland 2045“, erstellt von Prognos, Agora, Öko-Institut und Wuppertal-Institut [3]. Ziele und Rahmen des Szenarios:
    - orientiert an Bundestagsbeschlüssen,
    - 100 Prozent klimaneutrale Energieversorgung 2045,
    - keine politisch verordneten Verhaltensänderungen,
    - eingebunden in die demografische und wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands,
    - technische Machbarkeit berücksichtigt,
    - Markthochlauf berücksichtigt, das heißt, die Ausbauraten sollen auch von den Wirtschaftskapazitäten erreichbar sein,
    - 2030 ist ein Rest Kohle dem aktuellen Ausstiegsplan zufolge noch Teil des Strommixes.
  - 2. „Wege zu einem Klimaneutralen Deutschland“, erstellt vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg, Referenzszenario 65/100 [4]. Ziele und Rahmen des Szenarios:
    - orientiert an den Forderungen von Friday und Scientists for Future,
    - 100 Prozent klimaneutrale Energieversorgung eines von mehreren Szenarien,
    - technische Machbarkeit,
    - Kosten,
    - gesellschaftliche Widerstände,
    - klimabedingte Verhaltensänderungen,
    - Vergleich mit Referenzmodellen,
    - 2030 ist ein Rest Kohle dem aktuellen Ausstiegsplan zufolge noch Teil des Strommixes.
- ▶ Beide Studien haben einen Zwischenschritt für 2030 errechnet, den wir als Ausgangsbasis für eine Recherche nutzen können.
- ▶ Die Frage ist dabei eine Art vereinfachter Stresstest: Wie kann der Kohleausstieg gefahrlos auf 2030 vorgezogen werden? Dafür braucht man:
  - Die Werte einer Dunkelflaute: Wie tief fiel der Anteil der Erneuerbaren, wie lange dauerte sie?
  - Die Werte für eine zukünftige Stromerzeugung: Wie viel Kraftwerke sind installiert, wie hoch ist der Verbrauch?
  - Ein Umrechnungs-Tool, das die zukünftige Stromerzeugung mit den aus der Vergangenheit bekannten Erzeugungsparametern so umrechnet, als hätte diese Situation stattgefunden.

- ▶ Mit diesem Szenario testen wir anhand der Erzeugungswerte in einer Dunkelflaute zuerst, wie die Stromerzeugung unter der Annahme ein späten Kohleausstiegs laufen könnte, und dann unter der Annahme eines vorgezogenen Kohleausstiegs.

## Die Dunkelflaute in der Vergangenheit

Als erstes also die Werte der Dunkelflaute:

- ▶ Mit Hilfe des Dunkelflauten-Guides haben wir drei Acht-Tage-Dunkelflauten zwischen 2015 und 2020 gefunden. Davon haben wir für diese Übersicht die Flaute vom Januar 2017 ausgewählt [10].
- ▶ Der Tag mit dem niedrigsten Anteil an Wind- und PV-Strom war dabei Freitag, 24.01.2017.
- ▶ Wir konzentrieren uns auf diesen Tag, weil:
  - der kombinierte Anteil von Wind und PV an der öffentlichen Stromversorgung auf 1,06 Prozent fiel und damit die Residuallast fast so hoch wie Gesamtlast kletterte (Fr. 24.01.2017, 07:00 Uhr, Abb. 1, Kurve „Anteil in %“, Grafik „Leistung in GW“, die gepunktete Linie gibt die Residuallast an, die durchgezogene Linie die Gesamtlast. Residuallast = Gesamtlast - Strom aus Wind und PV),
  - alle steuerbaren Kraftwerkstypen an der Deckung der Gesamtlast beteiligt waren, insbesondere Kohlekraftwerke, die ja 2030 nicht mehr vorhanden sein sollen (siehe Abb.1, Grafik „Leistung in GW“),
  - während der Tagesstunden zusätzlich Strom importiert wurde (Abb. 1, Grafik „Leistung in GW“).
  - Importstrom bedeutet jedoch nicht, dass der Kraftwerkspark nicht ausgereicht hätte: Vom verfügbaren Gaskraftwerkspark wurde nur ein Teil der Leistung aktiviert. Es könnte sein, dass Strom aus dem Ausland billiger war.

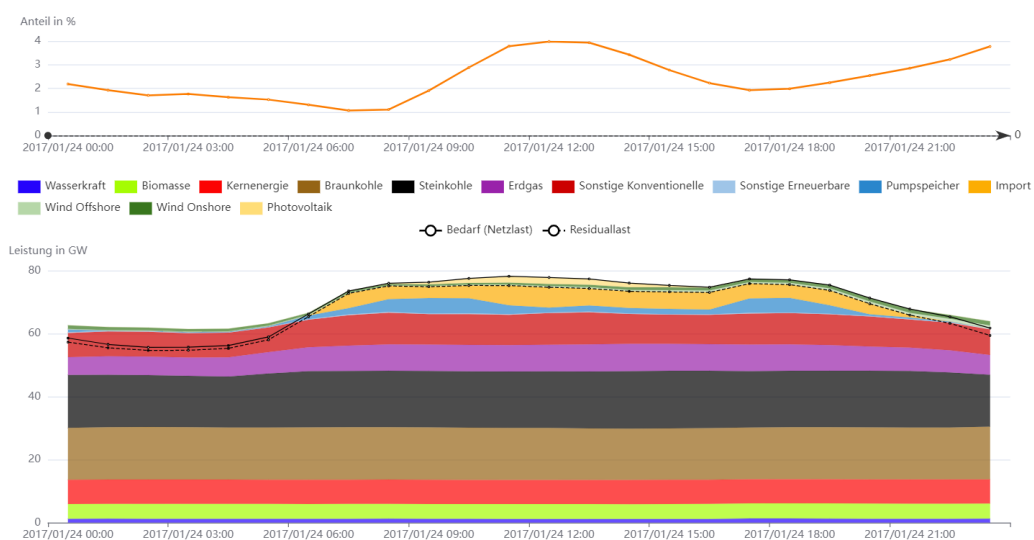


Abbildung 1: Anteil Erneuerbare am Bedarf und Kraftwerkmix 24.01.2017. Quelle: eigene Darstellung.

- ▶ Das deutet auf ausreichend herausfordernde Bedingungen für die Recherche hin.



## Die Dunkelflaute mit den Werten der Zukunft

Für die Werte der Zukunft greifen wir auf die Annahmen der beiden Szenarien für 2030 zu. Als erstes testen wir die Dunkelflaute mit dem in den Szenarien noch vorhandenen Anteil an Kohlestrom.

- ▶ Dafür brauchen wir ein Umrechnungs-Tool, den Energiewende-Explorer. Mit diesem Tool können wir 19 für die Stromversorgung relevante Werte frei wählen, etwa die installierte Leistung von Windkraft- oder PV-Anlagen, die Volllaststundenzahl von Erneuerbaren, per Lastmanagement verschiebbare Leistungen oder die installierte Leistung steuerbarer Kraftwerke.
- ▶ Damit manipulieren wir die Stromerzeugungsdaten von 2017: Die Werte für die installierten Windkraft- und PV-Anlagen, für die Gaskraftwerke, Batterien und andere Stromspeicher sowie der Stromverbrauch werden so angehoben, dass er den Annahmen der Studien entspricht, die Werte für die Kohlekraftwerke werden dagegen entsprechend gesenkt [5].
- ▶ Anschließend rechnet das Tool die Erzeugungswerte von 2017 um, wobei die Einspeisung von Wind- und PV-Anlagen über einen Faktor leicht angehoben werden, damit die Erzeugung der technischen Verbesserung des Kraftwerksparks entspricht. Die Verbrauchskurven werden dabei allerdings nur angehoben, neue zeitliche Verläufe können wir nicht darstellen. Das ist für eine wissenschaftliche Untersuchung zu wenig, aber für eine Überblicks-Recherche reicht es.
- ▶ Die neuen Kurven zeigen jetzt, wie sich der Bedarf und die Stromerzeugung entwickelt hätten, wenn Deutschland 2017 den angenommenen Kraftwerkspark und Jahresverbrauch gehabt hätte.
- ▶ Dafür haben wir in Absprache mit dem Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie3) der Technischen Universität Dortmund noch eine Reihe von weiteren Annahmen getroffen, zum Beispiel über den Einsatz von Batterien, Lastmanagement oder die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken. Mehr dazu siehe [5].
- ▶ Die wichtigsten Werte für diesen Schritt sind:

Tabelle 1: Werte für installierte Windkraft- und PV-Anlagen 2030 sowie Jahresverbrauch in den Szenarien

	Wind onshore	Wind offshore	Photovoltaik (gesamt)	Nettostrombedarf
Fraunhofer	119 GW	25 GW	199 GW	629,4 TWh
Prognos.	80 GW	25 GW	150 GW	604 TWh
Installierte Leistung 2020	54,5 GW	7,8 GW	53,2 GW	486 TWh

Tabelle 1: [1][2]

<sup>1</sup>Realisierter Stromverbrauch = Nettostromverbrauch + Netzverluste - die Stromerzeugung der reinen Industrie- und Bahnstromkraftwerke. Nur dieser Strom wird gehandelt und läuft über die Stromnetze.

- ▶ Das Tool hebt die Kurve für Verbrauch und Quellen der Erzeugung entsprechend den Werten in den Szenarien stundengenau an und passt die anderen Erzeuger entsprechend an. Veränderungen des Verbrauchs durch neue Verbraucher wie etwa Wärmepumpen berücksichtigt es derzeit nicht.



## ► Der Anteil der Erneuerbaren am Strombedarf der 2030er Szenarien in der Dunkelflaute von 2017

- Abbildungen 2 bis 5 zeigen die Ergebnisse der Berechnung von Strombedarf und Stromerzeugung für die beiden Szenarien unter den Bedingungen des Jahres 2017 am 24.01.
- Der extrem niedrige Wert für die Auslastung der Windkraftwerke (1,8 Prozent der installierten Leistung) am 24.01.2017, 07:00 verbessert sich leicht durch technische Verbesserungen an den Windkraftanlagen, vor allem aber durch mehr Offshore-Windparks, auf 2,47 (Prognos) beziehungsweise 2,91 Prozent (Fraunhofer).
- Dennoch bleibt der Anteil aufgrund des erhöhten Verbrauchs niedrig:
  - Das Fraunhofer-Szenario erreicht einen Anteil von 3,26 Prozent an der für dieses Szenario errechneten Realisierten Stromverbrauch.
  - Das Prognos-Szenario erreicht einen Anteil von 2,6 Prozent an der für dieses Szenario errechneten Realisierten Stromverbrauch.



Abbildung 2: Anteil Wind- und PV-Erzeugung am Bedarf am 24.01. im Fraunhofer Referenz 65/100 Szenario für 2030 aus [2].

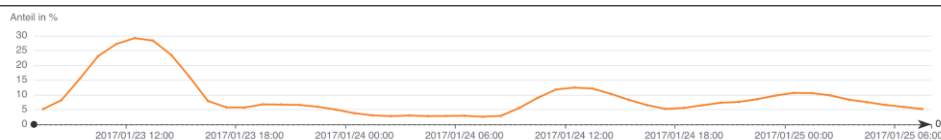


Abbildung 3: Anteil Wind- und PV-Erzeugung am Bedarf am 24.01. im Prognos Szenario für 2030 [1].

- Das bedeutet: Auch unter der Annahme deutlich erhöhter installierter Leistungen für Wind und Photovoltaik kann deren Leistung und damit ihr Anteil an der Stromversorgung stark absinken.
- Ein Back-up müsste in einer Dunkelflauten-Situation wie am 24.01.2017 zeitweilig also über 95 Prozent des Bedarfs abdecken können – sei es als Kraftwerkspark, in Form von Batterien oder durch Importe, oder durch ein geschicktes Zusammenspiel dieser drei und mehr Komponenten.
- Der Einsatz von Speichern wird jedoch erschwert durch den Umstand, dass die Dunkelflaute zu diesem Zeitpunkt bereits seit einigen Tagen anhält und die Erneuerbaren nicht über einen Anteil von 20 Prozent am realisierten Stromverbrauch hinauskommen.

## ► Die Stromerzeugung der 2030er Szenarien in der Dunkelflaute von 2017

- Das Tool errechnet darüber hinaus den realisierten Stromverbrauch und die Stromerzeugung des Kraftwerkspark stundengenau für jeden Tag des Jahres (Abbildungen 4 und 5).
- Die Verbrauchskurve wird dabei so angehoben, dass der im Szenario angesetzte Wert für den Nettostrombedarf (Nettostrombedarf = gesamter Strombedarf - Eigenbedarf von Kraftwerken - Exportüberschuss - Netzverluste) erreicht wird. Gleichzeitig berechnet das Tool die fiktive Stromerzeugung aus den geänderten Werten für die installierte Leistung der steuerbaren Kraftwerke sowie der Wind- und PV-Anlagen, für die das Tool den Anteil der erzeugten Leistung

an der installierten Leistung verwendet, der um einen Faktor erhöht wird, um der technischen Entwicklung im Kraftwerkspark Rechnung zu tragen.

- ▶ Weil wir dabei keine Annahmen über die Möglichkeit treffen können, ob während einer Dunkelflaute Strom aus dem Ausland importiert werden kann, haben wir versuchsweise dem Einsatz von Gaskraftwerken Vorrang vor Importen gegeben (s.u.).
- ▶ Die beiden Szenarien treffen sehr unterschiedliche Annahmen über die noch vorhandenen Kohlekraftwerke sowie über die schon vorhandenen Batterien, die Strom speichern können, um ihn im Falle von Dunkelflauten zur Verfügung zu stellen:

Tabelle 2: Werte für installierte Kohlekraftwerke und Batterien 2030

	Braunkohle	Steinkohle	Batterien
Fraunhofer	13,1 GW	12,58 GW	84,2 GW
Prognos .	3 GW	3 GW	2 GW

Tabelle 2 nach [1][2]

- ▶ Dabei fallen zwei Annahmen des Fraunhofer ISE auf:
  - Die Werte für Batterien sind sehr hoch.
  - Die Werte für die installierte Kohlekraftwerksleistung sind höher als vom Kohleausstieg vorgesehen. So sieht zum Beispiel der Braunkohle-Ausstiegspfad für Ende 2030 nur noch 8,8 GW vor [12].
- ▶ Aufgrund dieser Annahmen sowie jener über die Importmöglichkeiten von Strom (siehe nächster Abschnitt) errechnet das Tool die folgenden Werte für den Bedarf und den Kraftwerkeinsatz:

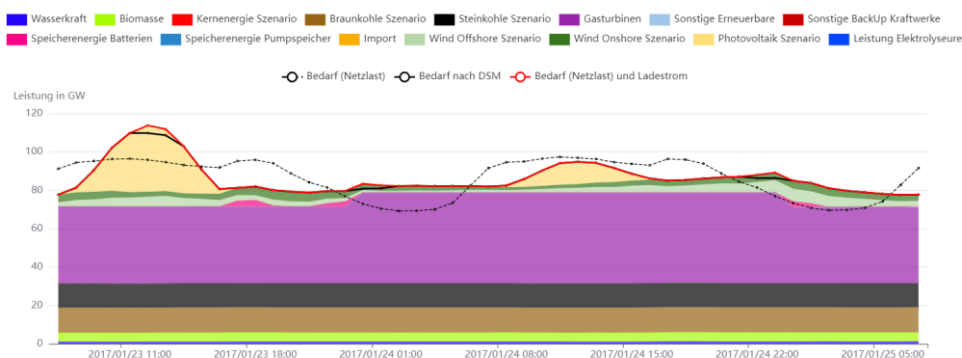


Abbildung 4: Stromerzeugung Januar 2017 nach Fraunhofer ISE Referenz 65/100 2030 – eigene Berechnung.

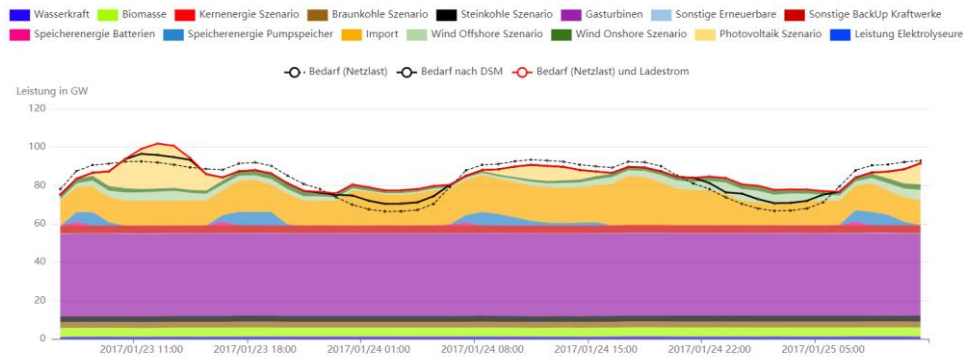


Abbildung 5: Stromerzeugung Januar 2017 nach Prognos 2045 für 2030 – eigene Berechnung.

- ▶ Die sehr hohe Residuallast (gepunktete Linie) zeigt sich auch in der Simulation:
  - Die Gesamtlast liegt höher als 2017, weil die Szenarien insgesamt mit einem höheren Jahresverbrauch für 2030 rechnen.
  - Die Anteile für Kohlestrom liegen deutlich niedriger als 2017, die geraden Flächengrenzen in den Grafiken deuten darauf hin, dass diese Kraftwerke mit Höchstleistung arbeiten.
  - Im Fraunhofer-Szenario zeigen sich große Mengen an Batterie-Einsätzen.
  - Im Prognos-Szenario werden an diesen Stellen vor allem Pumpspeicherwasserkraftwerke eingesetzt.
  - Das liegt daran, dass im Fraunhofer-Szenario mehr Batterien angesetzt sind und das Tool Batterien vor den Pumpspeicherwasserkraftwerken einsetzt.
  - Die höheren Werte für die Installation von PV und Wind im Fraunhofer-Szenario zeigen sich zum Beispiel in der größeren Photovoltaik-Einspeisung.
- ▶ Beide Szenarien decken den simulierten Strombedarf trotz der großen Stromflaute.
- ▶ Beide Szenarien enthalten noch wie geplant Kohlekraftwerksleistungen. Klimaneutral sollen sie ja auch noch nicht sein.
- ▶ Das Prognos-Szenario enthält aber zudem große Anteile an Import-Strom. Das ist ein offener Punkt, der unten genauer beleuchtet wird.
- ▶ Damit lassen sie sich nutzen, um zu testen, ob und wenn ja welche Schwierigkeiten ein vorzeitiger Kohleausstieg verursachen könnte.

## Der vorgezogene Kohleausstieg: Stresstest für die Stromversorgung

- ▶ Um zu testen, welcher Stress durch einen vorgezogenen Kohleausstieg entsteht, haben wir nun die installierte Leistung dieser Kraftwerke aus Tabelle 2 auf null gesetzt und alle anderen Werte unangetastet gelassen.
- ▶ Das Tool errechnet aufgrund der gewählten Parameter die folgenden Werte für den Kraftwerkseinsatz in den beiden jetzt an einen vorgezogenen Kohleausstieg angepassten Szenarien – der Bedarf bleibt gleich:

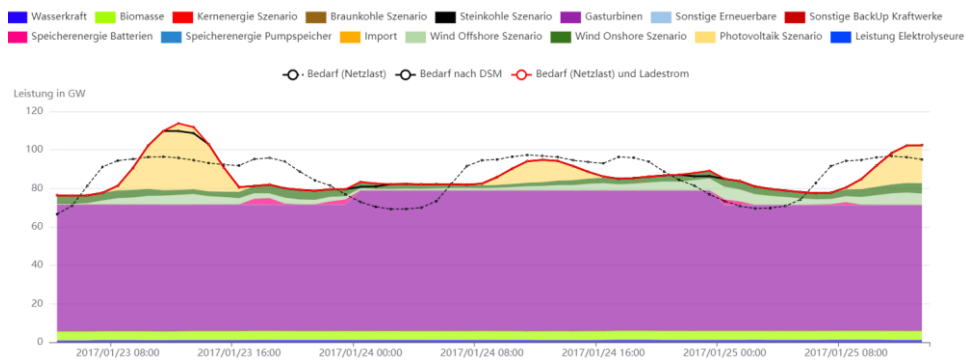


Abbildung 6: Stomerzeugung Januar 2017 nach Fraunhofer ISE Referenz 65/100 2030 ohne Kohle – eigene Berechnung.

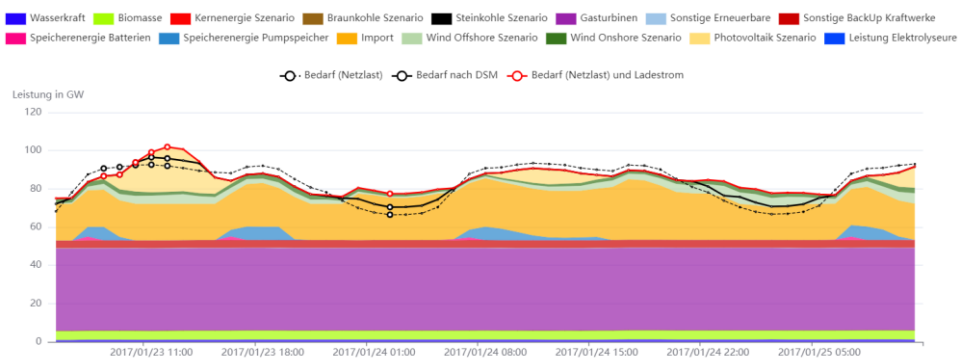


Abbildung 7: Stomerzeugung Januar 2017 nach Prognos 2045 für 2030 ohne Kohle – eigene Berechnung.

- ▶ Beide Szenarien lassen trotz der hohen Residuallast keine Lücken in der Stromversorgung entstehen.
- ▶ Das ist keine Überraschung, denn beide Szenarien setzen wie allgemein üblich mehr installierte Gaskraftwerksleistung als heute (31,9 GW) an – wobei der Wert für die Gaskraftwerke im Fraunhofer-Szenario sehr hoch liegt. Ob der realistisch ist, wäre eine Recherche wert:





Tabelle 3: Werte für installierte Gaskraftwerke 2030

Fraunhofer	Prognos
80 GW	43 GW

Tabelle 3: nach [1][2]

- ▶ Im Fraunhofer-Szenario (Abb. 6) ersetzen vor allem Gaskraftwerke die fortfallende Kohlestromerzeugung.
- ▶ Im Prognos-Szenario (Abb. 7) fällt auf, dass die Werte für den importierten Strom fast genauso hoch sind wie die Werte für die installierten Gaskraftwerke.

## Der vorgezogene Kohleausstieg mit realistischem Stromimport: Stresstest Teil 2

- ▶ Die hohen durch das Tool errechneten Werte für den importierten Strom sehen wir ohne weitere Recherche kritisch. Sie liegen an den Annahmen der Szenarien über die technische Importmöglichkapazität von Strom.

Tabelle 4: Werte für maximale Stromimportleistung 2030 aus Szenarien und ENTSO-E-Prognose

Fraunhofer	Prognos	ENTSO-E
24 GW	36GW	21,8 GW

Tabelle 4: nach [1][2][5]

Der exakte Wert für Fraunhofer lag dabei allerdings nicht vor, dieser ergibt sich aus dem linearen Ausbau der Grenzkuppelstellen 2020 und den Fraunhofer-Annahmen für 2050.

- ▶ Strom kann zwar über Grenzkuppelstellen aus den Nachbarländern einfach importiert werden. Diese Grenzkuppelstellen haben auch eine maximale theoretische Leistung. Diese wird jedoch in der Praxis nicht immer zur Verfügung stehen [6].
- ▶ Ob hinter diesen Kapazitäten tatsächlich auch Leistung zur Verfügung steht, muss gesondert geprüft oder recherchiert werden. Hier gibt es verschiedene Annahmen:
  - Ein Teil der Forscher vermutet, dass Flauten meistens regional begrenzt sind. Herrscht Flaute in Deutschland, könnte es in der Biskaya oder der Irischen See stürmen. Große Importkapazitäten und ein europaweites HGÜ-Netz (Hochspannungs-Gleichstrom Übertragungs-Netz) vorausgesetzt, könnten dann Sturm und Flaute sich ausgleichen.
  - Ein anderer Teil der Forscher jedoch weist darauf hin, dass es in der Vergangenheit auch europaweit Flauten gegeben habe, zumindest aber ein vollständiger Ausgleich nicht immer geschehen wird.
  - Zudem weisen Netzingenieure darauf hin, dass auch steuerbare Leistung von Kraftwerken nicht notwendigerweise zur Verfügung steht. Einer wissenschaftlichen Analyse, in der Importe eine so wichtige Rolle spielen, müsste also eine Analyse der Stromversorgung in den Nachbarländern zur Seite gestellt werden.
- ▶ Das überschreitet jedoch derzeit die Grenzen dieses Tools.



- ▶ Was wir aber tun können, ist: Wir können diesen Bedenken Rechnung tragen und die Kapazität der Grenzkuppelstellen begrenzen. Damit könnten wir einer unter Umständen zu optimistischen Annahme von zur Verfügung stehenden Leistungen entgegenwirken.
- ▶ Aus diesem Gedanken heraus haben wir versuchsweise den Wert für die Kapazität der Grenzkuppelstellen auf den von dem Verband der Europäischen Stromnetzbetreiber aufgrund der bekannten Projekte für 2030 veranschlagten Wert von 22 GW begrenzt.
- ▶ Das Ergebnis zeigen die Abbildungen 8 für das angepasste Fraunhofer-Szenario und 9 für das angepasste Prognos-Szenario:
- ▶ Die Werte und die Grafik für das Fraunhofer-Szenario ändern sich fast gar nicht.
- ▶ Die Werte für das Prognos-Szenario ändern sich erheblich: Es entsteht tatsächlich eine Stromlücke:
  - Der Einsatz der Gaskraftwerke wird von einer Kurve zum Strich: Alle installierten Gaskraftwerke werden maximal ausgelastet,
  - sonstige Back-up-Kraftwerke treten in Aktion, sie fahren ebenfalls „Strich“,
  - es entstehen weiße Flächen zwischen der Bedarfskurve (rot beziehungsweise schwarz) und der Erzeugung.
  - Das ist ein Hinweis auf eine Stromlücke.
  - Die Lücke öffnet sich am 24.01. mit dem Abnehmen der PV-Stromerzeugung gegen 13:00 Uhr,
  - vergrößerte sich bis 17:00 Uhr auf 9,76 GW,
  - das entspricht der Leistung von neun bis zehn sehr großen Kraftwerken,
  - und schießt sich bis Mitternacht durch etwas auffrischenden Wind.

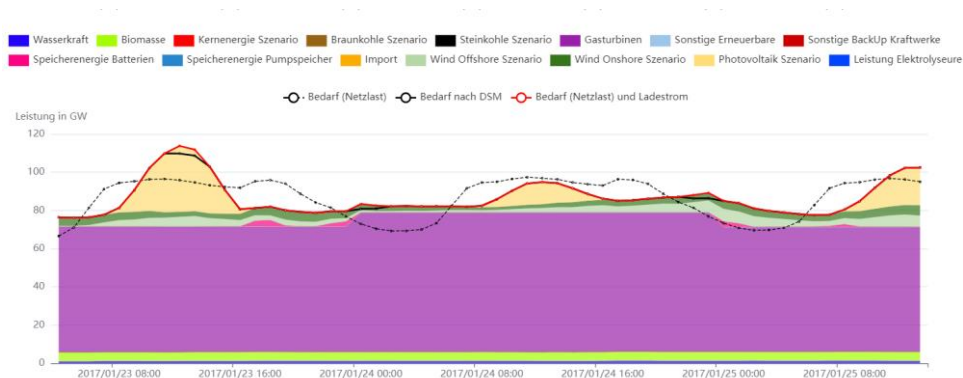


Abbildung 8: Stromerzeugung Januar 2017 nach Fraunhofer ISE Referenz 65/100 2030 ohne Kohle, Import-Kapazität 22 GW – eigene Berechnung.

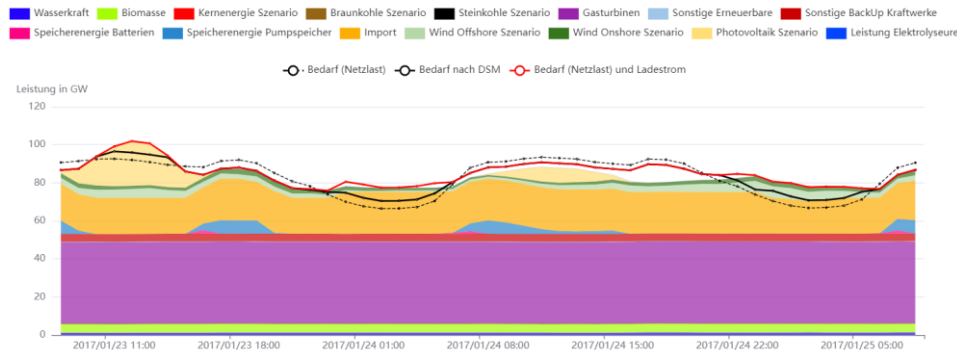


Abbildung 9: Stromerzeugung Januar 2017 nach Prognos 2045 für 2030 ohne Kohle, Import-Kapazität 22 GW – eigene Berechnung.

- ▶ Unter den Annahmen dieser beiden Szenarien müsste mindestens eine Flotte von Back-up-Gaskraftwerken gebaut werden, die größer als 47 GW ist, aber vielleicht doch nicht 80 GW umfasst.
- ▶ Tatsächlich setzt das Prognos-Szenario für die klimaneutrale Stromerzeugung ganz ohne Kohlekraftwerke 2045 auch eine höhere installierte Gaskraftwerks-Leistung von 71 GW an. Das zieht natürlich weitere Fragen nach sich, zum Beispiel zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Kraftwerke, siehe unten.
- ▶ Die genaue Größe und Form eines Back-ups kann man nur durch wissenschaftliche Untersuchungen ermitteln. Weitere Faktoren, die eine Rolle spielen, sind zum Beispiel die regionale Verteilung der Erzeuger, der Verbraucher, der Ausbau der Netze, der Einsatz von Batterien, die Verschiebung von Lasten.
- ▶ Unabhängig davon zeigt jedoch die Dunkelflaute auch: Fallen die Erträge der Erneuerbaren für längere Zeit stark ab, gibt es derzeit kaum eine andere Möglichkeit als eine große Zahl steuerbarer Gaskraftwerke als Back-up vorzusehen.

## Weitere Recherchethemen, die wir sehen:

### ▶ Wäre es zu einem Stromausfall gekommen?

- ▶ Unter den gegebenen Bedingungen würde es wohl zumindest zu (hoffentlich kontrollierten) Stromabschaltungen kommen.
- ▶ Kurzfristig – ein bis mehrere Tage im Voraus – lassen sich Wettersituationen gut vorhersagen und vorplanen.
- ▶ Allerdings ist die fehlende Leistung so groß, dass klassisches Lastmanagement – Verschieben von Verbrauch um eine oder zwei Stunden – womöglich nicht geholfen hätte.
- ▶ Zudem hat das Szenario von Prognos Verhaltensänderungen ausgeschlossen und für Lastmanagement nur Anlagen mit vier GW Leistung vorgesehen.
- ▶ Als Spekulation könnte man annehmen, dass es in dieser Situation zu Krisensitzungen kommen könnte und Großverbraucher für mehrere Stunden abgeschaltet werden müssten.



## ► **Wie sicher ist das Ergebnis?**

- Unser Tool liefert ein Szenario, keine Vorhersage.
- Es gibt dabei natürlich eine Reihe von Annahmen über den Einsatz von Kraftwerken, die in der Wirklichkeit nicht eintreffen müssen, oder durch politische Entscheidungen geändert werden könnten.
- Die Datenlage aber, die von den Übertragungsnetzbetreibern zur Verfügung gestellten Strommarktdaten, sind robust. Sie spiegeln wider, wie viel Strom Wind und PV an den Standorten unter den Wetterbedingungen von 2015 bis 2020 tatsächlich erzeugt haben [6].
- Die Rechenwege, mit denen wir die mögliche Stromerzeugung der beiden Szenarien auf dem historischen Stromerzeugungsverlauf von sechs Jahren nachbilden, sind vom Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie3) der Technischen Universität Dortmund positiv begutachtet worden.
- In Bezug auf die Aussage, dass es bei Bedingungen wie am 24.01.2017 zu einem starken Abfall der Leistung von Wind- oder PV-Anlagen kommen kann, ist dieses Modell hinreichend sicher.
- Auch eine Verdopplung der installierten Windenergie- oder PV-Leistungen führten nicht zu einer Vermeidung des Lochs.
- In Bezug auf die Aussage, dass es bei Bedingungen wie am 24.01.2017 darauf ankommt, genügend Back-up-Leistung zur Verfügung haben zu müssen, ist dieses Modell hinreichend sicher.
- Ob es zu so einer Situation kommt, ist nicht vorhersagbar, sie ist in der Vergangenheit jedoch mehr als einmal vorgekommen [1] [2] [6].
- Eine präzise Aussage über Stromausfälle, Netzausbau oder die Frage, wie in einer vergleichbaren Situation in Zukunft Kraftwerke, Importe oder Lastmanagement tatsächlich eingesetzt werden, ist mit diesem Szenario nicht möglich, es beschreibt eine Möglichkeit.

## ► **Wie könnte man Stromabschaltungen vermeiden?**

- Unser Energiewende-Tool bietet – wie gesagt – eine Reihe von Einstellmöglichkeiten für verschiedene Parameter, mit denen man testen kann, an welchen Schrauben man drehen kann, um Unterdeckungen zu vermeiden, kann aber als vereinfachtes Modell nicht alles.
- Es zeigt, dass ein Back-up für Dunkelflauten nötig ist und gibt eine Vorstellung von der Größe, die dieses Back-up erreichen muss.
- Die fehlende Leistung ist so groß und das Defizit hält so lange an, dass unter den Rahmenbedingungen des Tools (z.B. das Wetter 2017, geringe Importe) eine Deckung des Strombedarfs kaum durch eine andere Technik erfolgen könnte als durch steuerbare Back-up-Kraftwerke.
- Das kann sich ändern, wenn man Importe von großen Mengen Erneuerbarer Energie aus anderen Teilen Europas oder des Mittelmeerraums ermöglicht. Ob das bis 2030 realistisch ist, müsste recherchiert werden.
- Steuerbare Back-up Kraftwerke müssten sich dem Einspeiseverhalten von PV- und Windkraftanlagen schnell anpassen können, sie müssen unter Umständen lange stillstehen und trotzdem schnell anfahren.
- Derzeit sind dazu am besten Gaskraftwerke in der Lage, eingeschränkt auch Steinkohle und mit genügend Vorlauf eingeschränkt vielleicht auch Braunkohlekraftwerke. Siehe dazu auch die Ausführungen [5].



- ▶ Ob Atomkraftwerke dazu in der Lage wären, wurde in Deutschland letztlich nicht abschließend geklärt [7], Erfahrungen aus Frankreich deuten auf eine eingeschränkte Fähigkeit hin.
- ▶ Die einfachste Möglichkeit, eine Stromlücke im Szenario von Prognos zu vermeiden, wäre es daher, mehr Gaskraftwerke vorzusehen, statt 43 GW zum Beispiel 53 GW. Das Tool zeigt dann keine Stromlücken mehr.
- ▶ Aufwendiger wäre es, mit Hilfe von Lastmanagement zu agieren.
- ▶ Ein Programm für einen verstärkten Ausbau von Grenzkuppelstellen kann nur dann diese kritische Situation vermeiden helfen, wenn hinter den Grenzen auch tatsächlich Leistung zur Verfügung steht – durch einen verstärkten Ausbau von Erneuerbaren in ganz Europa und womöglich auch Nordafrika und bis zum Ural und durch den Aufbau eines passenden Stromnetzes. Ob das möglich ist, wäre eine eigene Recherche wert.

### ▶ **Verderben Gaskraftwerke die Ökobilanz?**

- ▶ Wenn es sich um Erdgas-Kraftwerke handelt, hängt es davon ab, ob ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen per CCS aufgefangen werden können und/oder ob die Emissionen durch andere Negative Emissionen wie zum Beispiel Aufforstungen kompensiert werden können.
- ▶ Langfristig sollten die Gaskraftwerke daher auf Wasserstoff als Energieträger umgerüstet werden.
- ▶ Neue Gaskraftwerke sollten folglich nur dann zugelassen werden, wenn sie auf Wasserstoff umgestellt werden können.
- ▶ Auch Industrie- und Fernwärmekraftwerke sollten möglichst auf Wasserstoff umgestellt werden können.
- ▶ Steht langfristig nicht genug Wasserstoff zur Verstromung zur Verfügung, stünden zwei andere Brennstoffe zur Verfügung:
  - Erdgas. Damit die Stromversorgung klimaneutral wird, müssten die Kraftwerke mindestens mit CCS-Anlagen ausgerüstet werden. Außerdem wären Kompensationsmaßnahmen nötig, weil die CCS-Anlagen nicht zu 100 Prozent CO<sub>2</sub> aus dem Abgas abscheiden.
  - Biogas. In den meisten Modellen, die ein 1,5- oder 2-Grad-Ziel erreichen, werden auch Kapazitäten für Biogas eingesetzt.
  - Die Forscher sehen die Chance, die Kraftwerke mit CCS-Anlagen auszurüsten und so CO<sub>2</sub> aus der Luft zu entfernen.
  - Allerdings wirkt in Deutschland die öffentliche Diskussion über Biogasanlagen entschieden: Ein weiterer Ausbau ist nicht geplant, und es gibt derzeit auch keine Bestrebungen, diesen in Gang zu bringen.

### ▶ **Kann man Erneuerbare Stromsysteme überhaupt als klimaneutral bezeichnen?**

- ▶ Wir betrachten hier nur die politische Absicht, den Kohleausstieg auf 2030 vorzuziehen.
- ▶ Würde die Stromversorgung dabei so ausgebaut, wie die beiden betrachteten Szenarien vorschlagen, könnten Wind und PV unter den Bedingungen der Jahre 2015 bis 2020 Anteile von 65 (Prognos) beziehungsweise 72,5 Prozent (Fraunhofer) am Strombedarf erreichen, wenn man Überschüsse in Batterien speichern oder damit Wasserstoff erzeugen und rückverstromen kann – mit entsprechenden Wirkungsgraden. Das ergibt die Berechnung unseres Tools.
- ▶ Gaskraftwerke würden mindestens die Hälfte der übrigen Stromleistung erbringen, viel Strom würde zudem importiert. Aus welchen Quellen der stammt, können wir derzeit nicht simulieren.



- ▶ Allerdings wäre die Energiewende 2030 auch noch nicht abgeschlossen.
- ▶ Auswertungen dieser Szenarien für 2045 durch unser Tool zeigen jedoch, dass Photovoltaik und Windstrom nicht jeden Tag im Jahr vollständig ohne Back-up abdecken können.
- ▶ Allerdings erscheint es möglich, durch Verwertung von Überschüssen genügend Wasserstoff zu erzeugen, um die Stromversorgung komplett klimaneutral zu betreiben.
- ▶ Das müsste allerdings gegen die Verwendung von Wasserstoff in anderen Sektoren abgewogen werden.
- ▶ Insofern lautet die Antwort: Es ist möglich.
- ▶ Die genaue Form ist jedoch noch offen, es sind viele Möglichkeiten denkbar [8] [9].

## Fazit

---

- ▶ Ein Kohleausstieg 2030 ist von den Bilanzen her machbar, wenn:
  - der Ausbauplan der Windanlagen von derzeit 71 auf mindestens 80 bis 120 GW angehoben wird und die genehmigten Anlagen auch tatsächlich gebaut werden,
  - der Ausbau der Offshore-Windparks wieder in Gang kommt und auf 25 GW angehoben wird,
  - der Ausbau der Photovoltaik von derzeit 100 auf 150 bis 200 GW angehoben wird,
  - ein **Ausbau von Gaskraftwerken** als Back-up in der Größenordnung von 53 bis womöglich 80 GW angestrebt wird.
- ▶ Wichtig: Diese Kraftwerke werden die Stromerzeugung der Kohlekraftwerke **nicht** ersetzen, sondern nur dann in Aktion treten, wenn Wind- und PV-Anlagen weniger erzeugen als gebraucht wird.
- ▶ Wichtig auch: Es gibt derzeit Ausbaupläne für Gaskraftwerke, viele liegen jedoch offenbar auf Eis [11]. Inwiefern sich diese Situation geändert hat, wie viele Gaskraftwerke immer noch abgeschaltet werden sollen und wie schnell sich diese bauen ließen, wäre eine eigene Recherche.
- ▶ Denkbar erscheint, dass zumindest ein Teil von Kohlekraftwerken nach britischem Vorbild auch auf Gasfeuerung umgerüstet werden könnte. Entsprechende Vorhaben gibt es bereits.
- ▶ Um eine klimaneutrale Stromversorgung zu erreichen, müssten jedoch die Gaskraftwerke, egal welcher Brenntechnik (Turbine, Motor, Brennstoffzelle) entweder künftig mit Wasserstoff betrieben werden können oder der von ihnen erzeugte Kohlendioxid ausstoß per CCS oder mit Direct Air Capture Anlagen wieder aus der Luft entfernt werden.
- ▶ Sollte absehbar nicht genug Wasserstoff zur Verfügung stehen, erscheint es sinnvoll, das Für- und Wider von CCS-Technik an den Gaskraftwerken abzuwägen.
- ▶ Für einen Kohleausstieg 2030 sollte jedoch auch geprüft werden, inwieweit die Stromnetze beschleunigt ausgebaut werden müssten.
- ▶ Ebenso scheint es sinnvoll, ein Finanzierungssystem für die Back-up-Kraftwerke zu entwerfen, da diese mit Sicherheit niedrigere Auslastungen erreichen werden als heute.
- ▶ Diese Arbeit basiert auf der Entwicklung eines Analysetools für die von der Bundesnetzagentur unter [www.smard.de](http://www.smard.de) veröffentlichten Strommarktdaten durch das Science Media Center selbst. Eine vereinfachte Variante dieses Tools ist die Grundlage für [5]. Wir planen, das Tool im Rahmen von Workshops Journalistinnen und Journalisten für Recherchen zur Verfügung zu stellen. Wenn Sie Interesse an einer Teilnahme haben, melden Sie sich bitte bei der unten



genannten Kontaktadresse, wir werden Sie dann vormerken. Sollten Sie Rückfragen haben, bitte wenden Sie sich an [redaktion@sciencemediacenter.de](mailto:redaktion@sciencemediacenter.de).

- Wie die Strombilanz der Energiewende funktioniert könnte – das skizziert dieses interaktive Fact Sheet auf der Basis historischer Stromerzeugungsdaten.

## Literaturstellen, die zitiert wurden

---

- [1] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) (2021). [Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems](#). Herausgegeben von der Deutschen Energie -Agentur GmbH (dena).
- [2] Energy Brainpool (2017): [Kalte Dunkelflaute](#). Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter. Greenpeace Energy.
- [3] Prognos et al. (2021): [Klimaneutrales Deutschland 2045](#). Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Gemeinsame Studie mit Öko-Institut und Wuppertal Institut, im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- [4] Brandes J et al. (2020): [Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem](#). Die Deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update für ein CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel von 65% in 2030 und 100% in 2050. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.
- [5] ENTSO-E (2019): TYNDP 2018 [Executive Report Appendix](#). Appendix iV: Cross-Border capacities.
- [6] Science Media Center (2021): [Wie man eine Dunkelflaute findet – Preppen für die Dunkelflaute I](#). Fact Sheet. Stand 19.11. 2021.
- [7] Grünewald R et al. (2017): [Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke](#). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Hintergrundpapier Nr. 21.
- [8] Kendzioriski M et al. (2021): [100% erneuerbare Energie für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe – Potenziale, Szenarien und Auswirkungen auf Netzinfrastrukturen](#). Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Politikberatung kompakt 167.
- [9] VDE (2015): [Der zellulare Ansatz](#). Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende.
- [10] Science Media Center (2021): [Kurze Dunkelflauten – lange Stromflauten? Preppen für die Dunkelflaute II](#). Fact Sheet. Stand 19.11.2021.
- [11] BDEW (2019): [Kraftwerksliste](#). Neubau von CO<sub>2</sub>-armen Kraftwerkskapazitäten stockt.
- [12] BMWi (2020): [Stilllegungspfad Braunkohle](#).
- [13] Bundesnetzagentur (2021): [Stromerzeugung und Stromverbrauch](#). SMARD Strommarktdaten.



fact sheet

## Ansprechpartner Redaktion

**Sönke Gäthke**

Redakteur für Energie und Technik

## Ansprechpartner Lab

**Dr. Bernhard Armingeon**

Software Entwickler im SMC Lab

Telefon +49 221 8888 25-0

E-Mail [redaktion@sciencemediacenter.de](mailto:redaktion@sciencemediacenter.de)

## Disclaimer

Dieses Fact Sheet wird herausgegeben vom Science Media Center Germany. Es bietet Hintergrundinformationen zu wissenschaftlichen Themen, die in den Schlagzeilen deutschsprachiger Medien sind, und soll Journalisten als Recherchehilfe dienen.

SMC-Fact Sheets verstehen sich nicht als letztes Wort zu einem Thema, sondern als eine Zusammenfassung des aktuell verfügbaren Wissens und als ein Hinweis auf Quellen und weiterführende Informationen.

Dieses Fact Sheet wurde von entsprechenden Fachleuten aus der Wissenschaft auf Korrektheit geprüft.

Sie haben Fragen zu diesem Fact Sheet (z. B. nach Primärquellen für einzelne Informationen) oder wünschen Informationen zu anderen Angeboten des Science Media Center Germany? Dann schicken Sie uns gerne eine E-Mail an [redaktion@sciencemediacenter.de](mailto:redaktion@sciencemediacenter.de) oder rufen Sie uns an unter +49 221 8888 25-0.

## Impressum

Die Science Media Center Germany gGmbH (SMC) liefert Medienschaffenden schnellen Zugang zu Stellungnahmen und Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft – vor allem dann, wenn neuartige, ambivalente oder umstrittene Erkenntnisse aus der Wissenschaft Schlagzeilen machen oder wissenschaftliches Wissen helfen kann, aktuelle Ereignisse einzuordnen. Die Gründung geht auf eine Initiative der Wissenschafts-Pressekonferenz e.V. zurück und wurde möglich durch eine Förderzusage der Klaus Tschira Stiftung gGmbH.

Nähere Informationen: [www.sciencemediacenter.de](http://www.sciencemediacenter.de)

### Diensteanbieter im Sinne MStV/TMG

Science Media Center Germany gGmbH  
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33  
69118 Heidelberg  
Amtsgericht Mannheim  
HRB 335493

### Redaktionssitz

Science Media Center Germany gGmbH  
Rosenstr. 42-44  
50678 Köln

### Vertretungsberechtigter Geschäftsführer

Volker Stollorz

### Verantwortlich für das redaktionelle Angebot (Webmaster) im Sinne des § 18 Abs.2 MStV

Volker Stollorz



science  
media center  
germany