



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



Mai 2019

Kurz erklärt!

## Warum sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland nur langsam, obwohl die erneuerbaren Energien stark ausgebaut werden?

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

### Kurz erklärt!

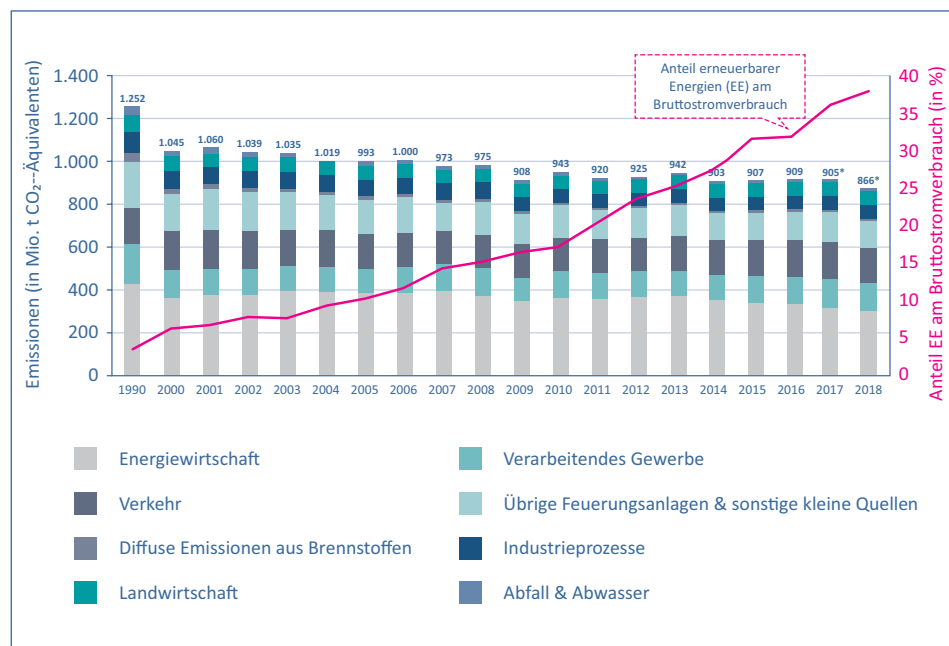
Obwohl in Deutschland bereits über ein Drittel des Stroms aus erneuerbaren Energien produziert wird, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen seit dem Jahr 2000 nur um 17 Prozent gesunken. Das hat vor allem vier Gründe:

1. Die **Emissionen außerhalb des Stromsektors** sind kaum gesunken.
2. Die **Verstromung von Braunkohle ist auf fast gleichbleibend hohem Niveau**. Strom aus emissionsintensiver Braunkohle war lange aufgrund niedriger Preise für CO<sub>2</sub>-Zertifikate billiger als andere Energieträger wie Erdgas.
3. **Strom aus Erneuerbaren ersetzt teilweise CO<sub>2</sub>-arme Kernenergie**. Gleichzeitig wurde die Erzeugung aus Kernkraftwerken teilweise durch fossile Kraftwerke aufgrund der Versorgungssicherheit ersetzt.
4. **Deutschland produziert mehr Strom, von dem immer mehr ins Ausland exportiert wird**. Hohe volatile erneuerbare Erzeugungskapazitäten sowie eine gleichbleibend hohe und unflexible fossile Stromproduktion führen zu niedrigen Strompreisen, die für das Ausland attraktiv sind.

Dennoch konnte Deutschland im Stromsektor im Vergleich zur Wärmeversorgung oder dem Verkehrsbereich bereits mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen. Allerdings reichen diese Einsparungen nicht aus, um die Pariser Klimaziele zu erreichen.

## Hintergrund

Deutschland konnte seine gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen seit 2000 um 17 Prozent reduzieren [1][2]. Dieser Rückgang liegt vor allem an der Energiewirtschaft, die ihre Emissionen im gleichen Zeitraum um 16 Prozent senken konnte. Die anderen Sektoren haben nur wenig beigetragen (vgl. Abbildung 1). Dabei ist zu beachten, dass milde Temperaturen im Winter stark zur Minderung der Emissionen von 2017 auf 2018 beigetragen haben [3]. Die Emissionen in der Energiewirtschaft werden im Wesentlichen durch die Stromerzeugung bestimmt. Vor dem Hintergrund des massiven Ausbaus der erneuerbaren Energien erscheint die Emissionsminderung im Stromsektor jedoch gering. Was sind die Gründe dafür?



**Abbildung 1: Jährliche Treibhausgasemissionen aller Sektoren nach Kategorie und Anteil der erneuerbaren Energien (EE) am Bruttostromverbrauch** (eigene Darstellung mit Daten aus [1][2][4]) \*Schätzung für 2017, 2018

Der Stromerzeugung aus Erneuerbaren kommt beim Umbau der Energieversorgung eine zentrale Rolle zu: Sie soll wesentlich dazu beitragen, die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr mit emissionsarmer Energie zu versorgen. Mit einem Anteil von 37,8 Prozent am Bruttostromverbrauch im Jahr 2018 haben sich die Erneuerbaren im Stromsektor bereits zum wichtigsten Energieträger entwickelt [4]. Im Wärmebereich beträgt ihr Anteil aktuell 13,9 Prozent, im Verkehrssektor sind es nur 5,6 Prozent [4] – diese Sektoren haben also noch einen erheblichen Nachholbedarf.

Dennoch sind die Erfolge im Stromsektor nicht wie erwartet: Trotz der mehr als sechsfachen Stromproduktion aus Erneuerbaren gegenüber dem Jahr 2000 [4], ist die Stromerzeugung durch die Verbrennung von fossilen Rohstoffen und dem damit verbundenen Ausstoß von CO<sub>2</sub> noch immer für rund ein Drittel der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Seit dem Jahr 2000 reduzierte sich zwar die Emissionsintensität des Strommixes um rund ein Viertel von 644 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde auf 474 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde, die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen waren aber mit rund 273 Millionen Tonnen nur um knapp 17 Prozent geringer als im Jahr 2000 [5].

## Gründe für die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor

### 1. Fast gleichbleibend viel Strom aus Braunkohlekraftwerken

Braunkohlekraftwerke haben im fossilen Kraftwerkspark die geringsten Grenzkosten. Wird zu einem Zeitpunkt eine zusätzliche Megawattstunde Strom benötigt, lässt sie sich am günstigen durch die Verstromung von Kohle decken [6]. Daher blieb insbesondere der Anteil von Braunkohle an der deutschen Stromerzeugung in den letzten Jahren fast gleichbleibend hoch. Im Jahr 2018 wurden noch 23 Prozent des Stroms aus Braunkohle und 13 Prozent aus Steinkohle erzeugt. Nur rund 13 Prozent des deutschen Stroms wurden aus dem emissionsärmeren, aber derzeit noch teurerem Erdgas gewonnen [7]. Die durchschnittlichen Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde betragen in Deutschland bei Erdgas 374 Gramm, bei Steinkohle 815 Gramm und bei Braunkohle 1.142 Gramm [5]. Kohle stellt somit zwar nur ein Drittel der Stromerzeugung bereit, ist aber für rund 75 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor verantwortlich.

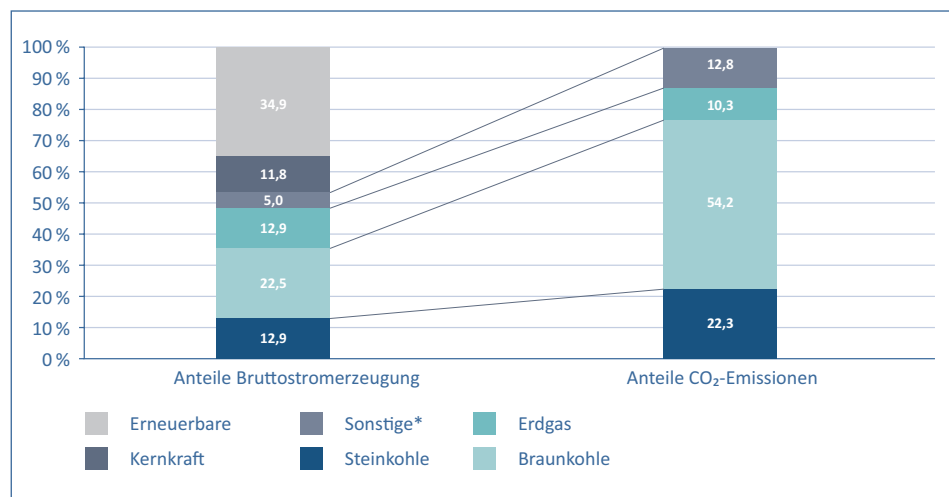


Abbildung 2: Bruttostromerzeugung und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung nach Energieträgern, 2018 (eigene Darstellung mit Daten aus [5][7]) \*inkl. Mineralöl und Müllverbrennung

Die Lenkungswirkung des europäischen Emissionshandels (EU-ETS), der emissionsintensive Kraftwerke verteuern soll, kam aufgrund der sehr **niedrigen Zertifikatspreise** lange Zeit kaum zum Tragen. Von 2013 bis 2017 bewegten sich die Preise für CO<sub>2</sub>-Zertifikate zwischen drei und acht Euro [8]. Es war somit weiterhin billiger, Strom aus Kohle statt aus Erdgas zu produzieren. Aufgrund der Ende 2017 beschlossenen Reformen des EU-ETS, wie die ab 2019 geltende Marktstabilitätsreserve, stieg der Preis für Zertifikate im Jahr 2018 kurzzeitig auf bis zu 25 Euro an [8]. Um emissionsärmere Erdgaskraftwerke gegenüber Kohlekraftwerken konkurrenzfähig zu machen, wäre allerdings ein **stabiler CO<sub>2</sub>-Preis von mindestens 30 bis 40 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>** erforderlich [6][9][10].

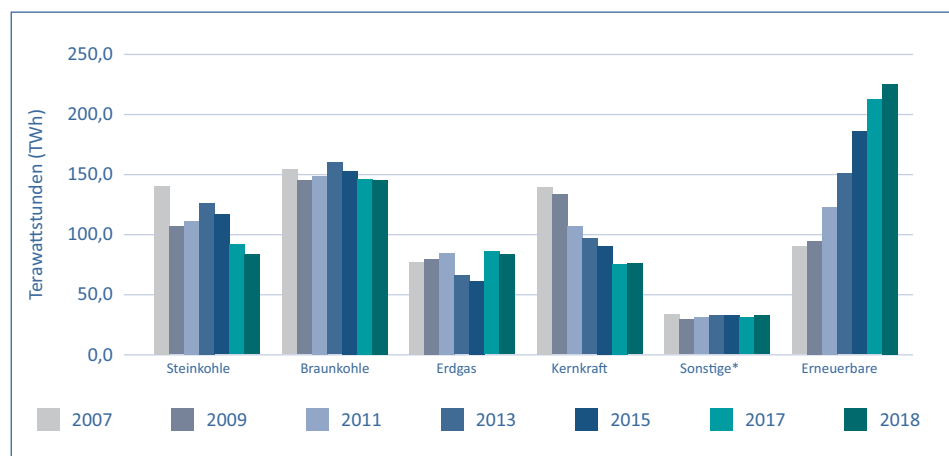
Kurzfristige Preisschwankungen hatten bisher geringe Auswirkungen auf die Kohleverstromung: Zeitweise liefen Kohlekraftwerke auch dann, wenn es sich scheinbar wirtschaftlich gar nicht lohnte – im Extremfall selbst bei negativen Börsenstrompreisen. In diesem Fall bezahlen die Kraftwerksbetreiber sogar dafür, dass ihnen jemand den Strom abnimmt. Das hat technische und betriebswirtschaftliche Gründe: Kohlekraftwerke sind relativ unflexibel und daher ist ein kurzfristiges Hoch- oder Runterfahren schwierig und teuer. Zudem haben viele Kraftwerksbetreiber langfristige Lieferverträge mit Endkunden, die sie unabhängig von den aktuellen Börsenpreisen erfüllen. Einige Kraftwerke werden auch weiterhin betrieben, da sie zur Lieferung von Regelleistung verpflichtet sind. Gaskraftwerke arbeiten dagegen flexibler und können schneller auf schwankende Börsenstrompreise reagieren, sind aber derzeit aufgrund fehlender Anreize noch teuer [6].

## 2. Strom aus Erneuerbaren schließt unter anderem Lücke der Kernkraft

Seit 2010 ist die Erzeugung aus Kernkraft um 65 Terawattstunden gesunken [7]. Zeitgleich stieg die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien um 110 Terawattstunden [4]. In der Bilanz haben also die Erneuerbaren eine **andere emissionsarme Technologie zur Stromerzeugung ersetzt**, wodurch ihr Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert wurde.

Die Bilanz zeigt aber auch: Der Bruttostromverbrauch in Deutschland ging von 2007 bis 2018 von 622 Terawattstunden auf 595 Terawattstunden zurück, während die Stromerzeugung im gleichen Zeitraum von 640 Terawattstunden auf 646 Terawattstunden anstieg [7][11]. Die Produktion aus fossilen Kraftwerken war zwar rückläufig, allerdings nicht gleichmäßig zum Ausbau der Erneuerbaren. Ein Grund dafür ist, dass ein Teil der Erzeugung der Kernkraftwerke auch durch eine höhere Auslastung einiger der vorhandenen, emissionsintensiven Kohlekraftwerke ersetzt wurde, die in wind- und sonnenarmen Zeiten sowie zur **Gewährleistung der Versorgungssicherheit** (Systemdienstleistungen) weiterhin betrieben werden. Wäre die weggefallene Stromproduktion der Kernkraft vollständig durch Braunkohle ersetzt worden, würden zusätzlich 74 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr emittiert werden [5][7].

Die Entwicklung zeigt aber, dass Deutschland jedenfalls mengenmäßig die CO<sub>2</sub>-armen Kernkraftwerke ersetzen kann, ohne zusätzlichen Kohlestrom erzeugen zu müssen (vgl. Abbildung 3). Ohne weitere Stromspeicher, hochflexible Kraftwerke und einen flexiblen Stromverbrauch wird Kohlestrom ein Bestandteil des Strommixes bleiben.



**Abbildung 3: Stromerzeugung nach Energieträgern, 2007–2018** (eigene Darstellung mit Daten aus [7][11]) \*inklusive Mineralöl und Müllverbrennung

### 3. Viel Strom und hohe Stromexporte

Deutschland hat im Jahr 2017 rund 646 Terrawattstunden Strom erzeugt [7] – etwa 83 davon wurden ins EU-Ausland exportiert, während nur 32 Terrawattstunden importiert wurden (vgl. Abbildung 4). Kein anderes EU-Land liefert so viel Strom an andere Staaten wie die Bundesrepublik. Der Grund: Die zusätzliche, teilweise stark schwankende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kann temporär zu einem erhöhten Angebot führen. Da ein Teil der fossilen Kraftwerke nur **unflexibel** betrieben werden kann und einige der Kraftwerke auch bei einem hohen Angebot an Strom aus erneuerbaren Quellen zur **Gewährleistung der Versorgungssicherheit** betrieben werden, sinkt in der Folge der Börsenstrompreis. Das macht es für das Ausland attraktiv, günstigen Strom aus Deutschland zu importieren. Durch die Nachfrage aus dem Ausland wird außerdem verhindert, dass die Strompreise noch weiter fallen und die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle gänzlich unattraktiv machen. So haben bisher die zusätzlichen erneuerbaren Energien im Strommix also kaum dazu geführt, dass die Erzeugung aus fossilen Energieträgern zurückgeht.

2018 war der Exportüberschuss mit rund 51 Terawattstunden dreimal so hoch wie 2010 [7]. Die bei der Stromerzeugung entstandenen Emissionen fließen gemäß dem Verursacherprinzip vollständig in die deutsche CO<sub>2</sub>-Bilanz ein, während die Emissionsbilanz der Empfängerländer hingegen nicht belastet wird. Zwar können die Exporte einzelnen Erzeugungstechnologien nicht direkt zugeordnet werden. Geht man jedoch davon aus, dass der exportierte Strom dem durchschnittlichen deutschen Energiemix entspricht, können im Jahr 2018 etwa 25 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> dem Exportstrom zugerechnet werden – das sind 17 Millionen Tonnen mehr als 2010 [5][7].

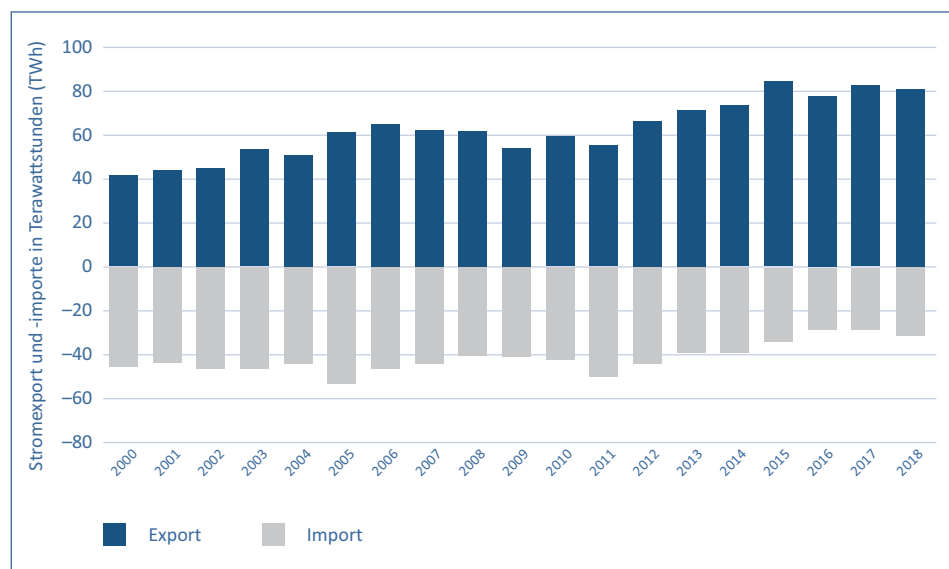


Abbildung 4: Entwicklung der Stromexporte und -importe in Deutschland, 2000–2018 (eigene Darstellung mit Daten aus [7][11])

### Mehr zum Thema

Wie könnte die Stromversorgung im Jahr 2050 aussehen? Die **ESYS-Stellungnahme *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien*** zeigt verschiedene Möglichkeiten auf.

Wie das gesamte Energiesystem – bestehend aus Stromerzeugung, Wärmeversorgung und Verkehr – klimafreundlich gestaltet werden kann, wird in der **ESYS-Stellungnahme »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende** diskutiert.

## Literatur

### [1] UBA 2018

Umweltbundesamt (UBA): *Nationales Treibhausgasinventar 2018*, Dessau-Roßlau 2018. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24\\_climate-change\\_12-2018\\_nir\\_2018.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24_climate-change_12-2018_nir_2018.pdf) [Stand: 16.04.2019].

### [2] UBA 2019-1

Umweltbundesamt (UBA): *Grafiken und Tabellen zur Klimabilanz 2018*, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/galerie/grafiken-tabellen-zur-klimabilanz-2018> [Stand: 16.04.2019].

### [3] UBA 2019-2

Umweltbundesamt (UBA): *Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen*, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger> [Stand: 16.04.2019].

### [4] AGEE-Stat 2019

Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat): *Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2018* (Stand: Februar 2019), URL: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html) [Stand: 16.04.2019].

### [5] UBA 2019-3

Umweltbundesamt (UBA): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018. Reihe: Climate Change | 10/2019*. Dessau-Roßlau 2019. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10\\_cc\\_10-2019\\_strommix\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf) [Stand: 16.04.2019].

### [6] Huneke & Streitmayer 2017

Huneke, F., Streitmayer, A.: *Wie hoch muss ein wirkungsvoller CO<sub>2</sub>-Preis sein?*, Berlin 2017. URL: [https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/2017-09-27\\_Energy-Brainpool\\_White\\_Paper\\_Hoehhe-CO2-Preis.pdf](https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/2017-09-27_Energy-Brainpool_White_Paper_Hoehhe-CO2-Preis.pdf) [Stand: 16.04.2019].

### [7] AGEB 2019

AG Energiebilanzen e.V. (AGEB): *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018*, Berlin 2019. URL: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_jahresbericht2018\\_20190326\\_dt.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2018_20190326_dt.pdf) [16.04.2019].

### [8] EEX 2018

European Energy Exchange AG (EEX): *European Emission Allowances Auction*. URL: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction> [Stand: 16.04.2019].

### [9] Edenhofer 2018

Edenhofer, O.: „Klima, Kohle, Kapital – Herausforderungen der gegenwärtigen Klimapolitik“ (Keynote zum ESYS-Energiesymposium vom 12.09.2018). URL: <https://youtu.be/MAoxEemAKC4> [Stand: 16.04.2019].

### [10] Matthes et al. 2018

Matthes, F., Flachsbarth, F., Loreck, C., Hermann, H., Falkenberg, H., Cook, V.: *Zukunft Stromsystem II*, Berlin 2018. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf> [Stand: 02.11.2018].

### [11] BMWi 2019

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BmWi): *Energiedaten Gesamtausgabe* (Stand 22.01.2019), Berlin 2019. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> [Stand: 16.04.2019].

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für die Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Im Akademienprojekt erarbeiten mehr als 100 Fachleute aus Wissenschaft und Forschung in interdisziplinären Arbeitsgruppen Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung.

## Das Format „Kurz erklärt!“

In dem kompakten Publikationsformat „Kurz erklärt!“ werden aus der Projektarbeit heraus im Sinne der Wissenschaftskommunikation aktuelle, häufig ohne solide wissenschaftliche Grundlage in der öffentlichen Debatte aufgegriffene Fragen rund um das Energiesystem geklärt. Grafiken veranschaulichen die dargestellten Inhalte. „Kurz erklärt!“ erscheint in Autorenverantwortung und wird von einem Kreis der ESYS-Mitglieder erstellt.

### Kontakt:

Dr. Ulrich Glotzbach  
Leiter der Geschäftsstelle Energiesysteme der Zukunft  
Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin  
Tel.: +49 30 2067957-0 | E-Mail: [glotzbach@acatech.de](mailto:glotzbach@acatech.de)  
[www.energiesysteme-zukunft.de](http://www.energiesysteme-zukunft.de)

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.**  
**Nationale Akademie der Wissenschaften**  
Jägerberg 1  
06108 Halle (Saale)  
Tel.: 0345 47239-867  
Fax: 0345 47239-839  
E-Mail: [politikberatung@leopoldina.org](mailto:politikberatung@leopoldina.org)  
Berliner Büro:  
Reinhardtstraße 14  
10117 Berlin

**acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.**  
Geschäftsstelle München:  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
Tel.: 089 520309-0  
Fax: 089 520309-9  
E-Mail: [info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)  
Hauptstadtbüro:  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin

**Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.**  
Geschwister-Scholl-Straße 2  
55131 Mainz  
Tel.: 06131 218528-10  
Fax: 06131 218528-11  
E-Mail: [info@akademienunion.de](mailto:info@akademienunion.de)  
Berliner Büro:  
Jägerstraße 22/23  
10117 Berlin