DIW Wochenbericht

48 2026

Wirtschaft. Politik. Wissenschaft. Seit 1928

DIW BERLIN



Sozial-ökologische Transformation

739 Editorial von Franziska Holz, Alexander Schiersch, Martin Kittel, Antonia Kurz, Alexander Roth und Wolf-Peter Schill

Herausforderungen bei der Transformation des Strom- und Stahlsektors mitdenken

741 Bericht von Martin Kittel, Alexander Roth und Wolf-Peter Schill

Energiewende wetterfest machen: Langfrist-Stromspeicher können Versorgung gegen extreme Dunkelflauten absichern

752 Interview mit Martin Kittel

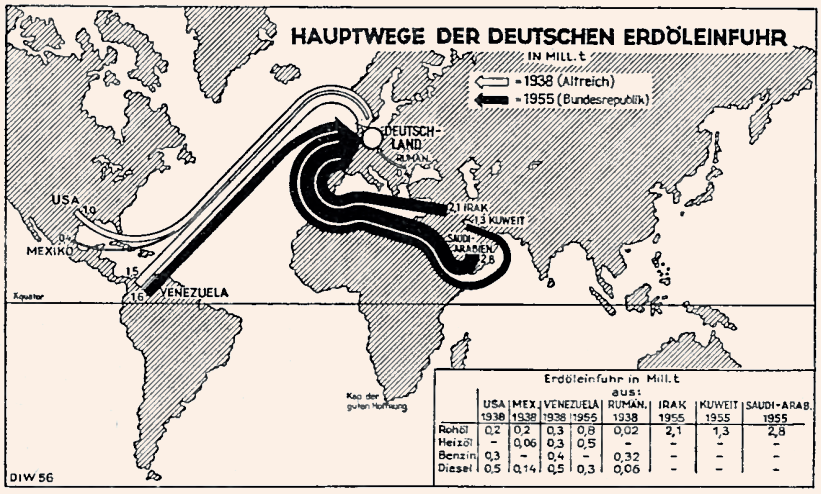
753 Bericht von Antonia Kurz

EU-Exportbeschränkungen für Stahlschrott würden globale CO_2-Emissionen nicht senken

764 Kommentar von Levent Neyse

Wie Wissenschaft mehr Vertrauen schafft

Der interkontinentale Erdölverkehr und der Weg der deutschen Öleinfuhr



Erdöleinfuhr in Mill. t

	aus: USA 1938	MEX 1938	VENEZUELA 1938	VENEZUELA 1955	RUMÄN. 1938	IRAK 1955	KUWEIT 1955	SAUDI-ARAB. 1955
Rohöl	0,2	0,2	0,3	0,8	0,02	2,1	1,3	2,8
Heizöl	–	0,06	0,3	0,5	–	–	–	–
Benzin	0,3	–	0,4	–	0,32	–	–	–
Diesel	0,5	0,14	0,5	0,3	0,06	–	–	–

CC BY 4.0

In den ersten Novembertagen ist mit zusätzlichen Erdölverschiffungen aus den USA nach Europa begonnen worden. Außerdem wurden in der letzten Woche umfangreiche Ölkäufe auf dem amerikanischen Markt für Westeuropa getätigt. Fest steht, daß die Öllieferungen aus dem Irak an das Mittelmeer z. Z. praktisch unterbrochen sind und daß frühestens nach einem halben Jahr an eine Wiedereröffnung des Suez-Kanals zu denken ist[1]. Aber selbst nach der Wiedereröffnung der Produktion der Freien Welt hatte der amerikanische Kontinent einschließlich Karibiens einen Anteil von rund zwei Dritteln. Da die Produktion und der Verbrauch von Erdöl sich, abgesehen von den USA, zum großen Teil in weit auseinanderliegenden Räumen abspielen und die modernen Industriewirtschaften einen rasch steigenden Ölbedarf haben, nimmt Erdöl den ersten Platz unter den Welthandelsgütern ein.

1) Vgl. Wochenbericht des DIW, 23. Jg., Nr. 33, v. 17. B. 56.

Aus dem Wochenbericht Nr. 48 vom 30. November 1956

IMPRESSUM

DIW BERLIN

DIW Berlin — Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.
Anton-Wilhelm-Amo-Straße 58, 10117 Berlin
www.diw.de
Telefon: +49 30 897 89–0 E-Mail: kundenservice@diw.de
93. Jahrgang 25. November 2026

Herausgeber*innen
Prof. Anna Bindler, Ph.D.; Prof. Dr. Tomaso Duso; Sabine Fiedler; Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.; Prof. Dr. Peter Haan; Prof. Dr. Claudia Kemfert; Prof. Dr. Alexander S. Kritikos; Prof. Dr. Alexander Kriwoluzky; Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.; Prof. Dr. Sabine Zinn

Chefredaktion
Prof. Dr. Pio Baake; Claudia Cohnen-Beck; Sebastian Kollmann; Kristina van Deuverden

Lektorat
Dr. Thibault Deletombe; Prof. Dr. Franziska Holz

Redaktion
Dr. Hella Engerer; Petra Jasper; Hanna Kathreen Antony; Adam Mark Lederer; Sandra Tubik

Gestaltung
Roman Wilhelm; Stefanie Reeg; Eva Kretschmer, DIW Berlin

Umschlagmotiv
© imageBROKER / Steffen Diemer

Satz
Satz-Rechen-Zentrum Hartmann + Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Der DIW Wochenbericht ist kostenfrei unter **www.diw.de/wochenbericht** abrufbar. Abonnieren Sie auch unseren Wochenberichts-Newsletter unter **www.diw.de/wb-anmeldung**

ISSN 1860-8787

Herausforderungen bei der Transformation des Strom- und Stahlsektors mitdenken

Von Franziska Holz, Alexander Schiersch, Martin Kittel, Antonia Kurz, Alexander Roth und Wolf-Peter Schill

Europas Weg zur Klimaneutralität ist politisch vorgezeichnet: Bis 2050 soll die EU keine Netto-Treibhausgase mehr ausstoßen, bis 2040 wurde nun ein verbindliches Zwischenziel zur Minderung der Emissionen um 90 Prozent gegenüber 1990 beschlossen. Dies erfordert weitreichende Umstellungen in vielen Sektoren. So muss die Stromversorgung künftig weitgehend auf erneuerbaren Energien basieren. Gleichzeitig muss die verarbeitende Industrie klimaschonend werden, was in vielen Anwendungen mit einem technologischen Wandel verbunden ist. Beides birgt Herausforderungen und kann globale Auswirkungen haben, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen.

Der Ausbau wetterbedingt schwankender erneuerbarer Energien macht es erforderlich, dass langanhaltende Dunkelflauten mitgedacht werden, also Perioden, in denen über viele Tage oder mehrere Wochen kaum Solar- und Windenergie verfügbar ist. Versorgungssicherheit im Stromsektor muss nicht nur für durchschnittliche Schwankungen des Wetters sichergestellt werden, sondern auch unter seltenen und extremen Bedingungen. In welchem Umfang jedoch Langfrist-Stromspeicherkapazitäten vorgehalten werden müssen, gilt es im Zuge des Transformationsprozesses zu klären – auch, um rechtzeitig entsprechende Kapazitäten umzusetzen. In der Stahlerzeugung, die mehr als ein Viertel der Industrieemissionen verursacht, wird im Zuge der Modernisierung und Transformation zunehmend auf den Einsatz von Strom statt Kohle oder Erdgas gesetzt. Das ermöglicht auch den weiterreichenden Einsatz von Stahlschrott in der Stahlerzeugung. Dabei kann eine in Europa plausibel erscheinende Maßnahme, nämlich Schrott im Land zu halten, negative Effekte auf die globalen Emissionen von Kohlendioxid (CO_2) haben.

Im ersten Bericht wird auf Basis von knapp 40 historischen Wetterjahren (1982 bis 2019) untersucht, wie häufig und wie lange Dunkelflauten in Europa aufgetreten sind und welche Langfrist-Stromspeicherkapazität nötig wäre, um ein vollständig erneuerbares Stromsystem dagegen abzusichern. Kurze Phasen geringer erneuerbarer Erzeugung sind nichts Außergewöhnliches. Längere Dunkelflauten können durchaus jedes Jahr auftreten, sehr lange kommen hingegen deutlich seltener vor. Ein Mix verschiedener erneuerbarer Energieerzeugungstechnologien sowie ein europäischer Stromaustausch verkürzen solche Ereignisse erheblich. Die im betrachteten Zeitraum extremste Dunkeflaute trat im Winter 1996/97 auf und dauerte europaweit 55 Tage an, wobei in diesem Zeitraum das durchschnittliche erneuerbare Erzeugungspotenzial immer noch bei knapp der Hälfte des langjährigen Mittels lag. Zur Bewältigung dieses Ereignisses wären in einem vollständig erneuerbaren Stromsystem laut Modellrechnungen rund 350 Terawattstunden Langfrist-Speicher nötig, was etwa sieben Prozent der angenommenen jährlichen zukünftigen europäischen Stromnachfrage entspricht und mit Wasserstoff-Kavernenspeichern technisch umsetzbar wäre. Die Studienautoren empfehlen, den Einstieg in die Wasserstoffspeicherung politisch anzuschieben und die Wasserstoffspeicherkapazität auch im ab 2032 geplanten Kapazitätsmarkt zu berücksichtigen.

Im zweiten Bericht wird untersucht, ob Exportbeschränkungen für Stahlschrott dem Klima nützen. Die EU exportiert vor allem verunreinigten Altschrott, den die europäische Flachstahlindustrie nicht verwenden kann. Knapp ist hingegen hochwertiger Neuschrott. Die ab Mai 2027 geltenden EU-Exportbeschränkungen betreffen nur gut ein Viertel der Stahlschrottexporte und dürften die globalen Schrottflüsse

DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-48-1

vor allem umlenken, so dass Länder wie Indien künftig mehr Schrott beispielsweise aus den USA beziehen. Ein genereller EU-Exportstopp in alle Nicht-EU-Länder würde den EU-Schrottpreis in Modellrechnungen im ersten Jahr um knapp 30 Prozent senken und Erlöse von Recyclern zu Stahlwerken verschieben. Gleichzeitig würden aber die Emissionen in den bisherigen Abnehmerländern um rund 20 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr steigen, da dort auf die Stahlerzeugung mit Hilfe von Kohle umgestiegen werden müsste. Wer die Versorgung und Modernisierung der europäischen Stahlindustrie sichern will, sollte eher in Sortierung und Aufbereitung von Stahlschrott sowie in emissionsärmere Technologien investieren, anstatt Schrottexporte zu beschränken. Dem Klima nützt das vor allem dann, wenn dadurch weltweit mehr Schrott verwertbar wird.

Franziska Holz ist Ko-Sprecherin der Arbeitsgemeinschaft Sozial-ökologische Transformation und stellvertretende Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | fholz@diw.de

Alexander Schiersch ist Ko-Sprecher der Arbeitsgemeinschaft Sozial-ökologische Transformation und Wissenschaftler in der Forschungsgruppe Entrepreneurship und in der Abteilung Unternehmen und Märkte im DIW Berlin | aschiersch@diw.de

Martin Kittel ist Wissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | mkittel@diw.de

Antonia Kurz ist Wissenschaftlerin in der Abteilung Klimapolitik im DIW Berlin | akurz@diw.de

Alexander Roth ist Wissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin und Affiliate Fellow beim Brüsseler Thinktank Bruegel | aroth@diw.de

Wolf-Peter Schill ist Leiter des Forschungsbereichs „Transformation der Energiewirtschaft" in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | wschill@diw.de

Der Artikel ist gemäß der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 nachnutzbar: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

DIW Wochenbericht 48 2026

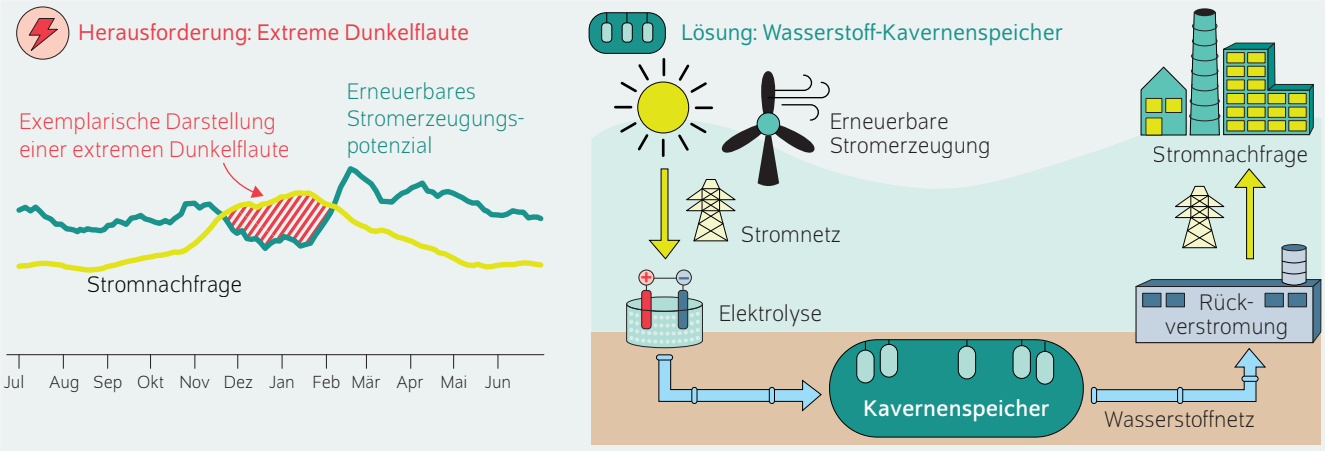
AUF EINEN BLICK

Energiewende wetterfest machen: Langfrist-Stromspeicher können Versorgung gegen extreme Dunkelflauten absichern

Von Martin Kittel, Alexander Roth und Wolf-Peter Schill

- Stromversorgung in Deutschland und Europa wird durch steigende Anteile von Solar- und Windenergie wetterabhängiger; Dunkelflauten werden dadurch zur Herausforderung
- Historische Wetterdaten zeigen: Kurze Perioden mit wenig Wind und Sonne treten häufig auf, längere Dunkelflauten durchaus jedes Jahr, extreme Dunkelflauten aber sehr selten
- Kombination aus Photovoltaik und Windkraft sowie grenzüberschreitender Stromaustausch können Dunkelflauten abmildern
- Modellanalyse zeigt Maximalbedarf an Langfrist-Stromspeichern, um Versorgung auch in vollständig erneuerbarem Stromsystem gegen extreme Dunkelflauten abzusichern
- Wegen langer Planungs- und Bauzeiten sollte Einstieg in wasserstoffbasierte Langfrist-Stromspeicher politisch angeschoben werden

Langfrist-Stromspeicher können Versorgung auch in vollständig erneuerbarem Energiesystem gegen extreme Dunkelflauten absichern



Quelle: Eigene Darstellung, Zeitreihen geglättet.

CC BY 4.0, creativecommons.org/licenses/by/4.0

ZITAT

„Langfrist-Stromspeicher sind eine plausible Option, um extreme Dunkelflauten selbst in einem vollständig erneuerbaren Stromsystem zu bewältigen. Voraussetzung ist aber, dass der Einstieg in diese Speichertechnologien rechtzeitig politisch angeschoben wird."

— Martin Kittel —

MEDIATHEK

Audio-Interview mit Martin Kittel
www.diw.de/mediathek

Energiewende wetterfest machen: Langfrist-Stromspeicher können Versorgung gegen extreme Dunkelflauten absichern

Von Martin Kittel, Alexander Roth und Wolf-Peter Schill

ABSTRACT

Mit steigenden Anteilen an Solar- und Windenergie wird die Stromversorgung in Deutschland und im restlichen Europa immer wetterabhängiger. Als besondere Herausforderung gelten zunehmend sogenannte Dunkelflauten, in denen über einen längeren Zeitraum wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung steht. Auf Basis historischer Wetterdaten aus fast vier Jahrzehnten untersucht dieser Bericht, wie häufig und wie ausgeprägt diese Ereignisse in Europa in der Vergangenheit waren und welche Kapazität von Langfrist-Stromspeichern zur Bewältigung extremer Dunkelflauten in einem rein erneuerbaren europäischen Stromsystem der Zukunft erforderlich wäre. Es zeigt sich, dass kurze Phasen mit geringer erneuerbarer Stromerzeugung sehr häufig sind, während längere regelmäßige und sehr lang anhaltende Dunkelflauten äußerst selten auftreten. Die Kombination von Photovoltaik und Windkraft sowie grenzüberschreitender Stromaustausch verringern das Ausmaß von Dunkelflauten erheblich. Das im untersuchten Zeitraum am stärksten ausgeprägte Ereignis trat im Winter 1996/97 auf und dauerte europaweit 55 Tage. Trotz der ungünstigen Wetterbedingungen lag das Potenzial zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in dieser Zeit immer noch bei knapp der Hälfte seines langjährigen Mittels. Unter der Annahme, dass der in Europa geplante Strom- und Wasserstoffnetzausbau wie vorgesehen umgesetzt wird, entspräche der Bedarf an Langfrist-Stromspeicherkapazitäten zur Bewältigung dieses Extremereignisses rund sieben Prozent der angenommenen jährlichen zukünftigen Stromnachfrage in Europa. Der Aufbau von Kapazitäten in dieser Größenordnung erscheint mit Wasserstoff-Kavernenspeichern grundsätzlich umsetzbar. Angesichts langer Planungs- und Bauzeiten sollte der Einstieg in solche Speicher jetzt politisch angeschoben werden.

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein zentraler Baustein der deutschen Klimaschutzstrategie. Zudem trägt er dazu bei, Deutschlands geopolitische Abhängigkeit von Importen fossiler Energieträger zu verringern. Aufgrund ihrer Verfügbarkeit und günstigen Kosten werden Wind- und Solarenergie zunehmend zu den tragenden Säulen der Stromversorgung. Mit steigendem Anteil dieser fluktuierenden Technologien unterliegt die Stromerzeugung verstärkt wetterbedingten Schwankungen unterschiedlicher Dauer. Eine besondere Herausforderung stellen sogenannte Dunkelflauten dar. Dabei handelt es sich um längere Perioden mit geringer Stromerzeugung aus Windkraft und Solaranlagen, die bei ungünstigen Wetterbedingungen auftreten können.

In diesem Bericht[1] wird dargestellt, wie häufig und wie ausgeprägt Dunkelflauten in der Vergangenheit in Europa aufgetreten sind und welcher Bedarf an Langfrist-Stromspeichern erforderlich wäre, um eine vollständig erneuerbare europäische Energieversorgung auch gegen extreme Dunkelflauten abzusichern.

Begriff „Dunkelflaute" ist nicht klar definiert

Der Begriff „Dunkelflaute" wird in der energiepolitischen Debatte zwar oft genutzt; eine exakte, wissenschaftlich allgemein anerkannte Definition fehlt aber bisher. Oft werden kurze Phasen über wenige Stunden bis Tage mit geringer Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie und infolgedessen sehr hohen Strompreisen als Dunkelflauten bezeichnet.[2] Auch die Frage, mit welchen Methoden eine Dunkelflaute am besten gemessen werden kann, wird in

1 Grundlage für den Bericht sind zwei kürzlich veröffentlichten Fachartikel. Der erste Artikel quantifiziert in der Vergangenheit aufgetretene Dunkelflauten in Europa auf Basis von Verfügbarkeitszeitreihen von Windkraft und Solarenergie, vgl. Martin Kittel und Wolf-Peter Schill (2026): Multi-threshold time series analysis enables characterization of variable renewable energy droughts in Europe. Communications Earth & Environment, 7, 242 (online verfügbar, abgerufen am 6. November 2026. Das gilt für alle Onlinequellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt). Der zweite ermittelt den Langfrist-Stromspeicherbedarf zur Absicherung gegenüber diesen Dunkelflauten, vgl. Martin Kittel et al. (2026): Long-duration electricity storage needs for coping with Dunkelflaute events in Europe. Nature Communications, 17, 4210 (online verfügbar).

2 Vgl. unter anderem Patrick Bernau (2024): Warum der Strom so knapp wurde. Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 22. Dezember 2024 (online verfügbar) oder Michael Bauchmüller (2024): Wenn die Dunkelflaute die Strompreise treibt. Süddeutsche Zeitung vom 13. Dezember 2024 (online verfügbar).

DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-48-2

Kasten 1

Methoden zur Quantifizierung von Dunkelflauten

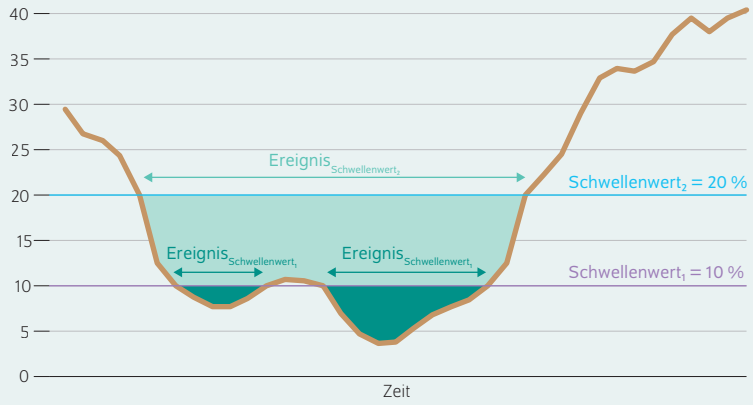
Bei der Vermessung von Dunkelflauten geht es um die Frage: Wie oft steht wie lange wie wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung? Für die Messung der Häufigkeit, Dauer und Schwere solcher Ereignisse können verschiedene Methoden genutzt werden. Dazu gehören reine Analysen des erneuerbaren Stromangebots, Untersuchungen der sogenannten Residuallast (Stromnachfrage abzüglich der erneuerbaren Stromerzeugung) sowie Analysen von historischen oder modellierten Strommarktpreisen. Dabei wird der erste Ansatz besonders häufig genutzt – unter anderem, da er relativ wenige Annahmen erfordert. Die in diesem Wochenbericht beschriebene Analyse nutzt ebenfalls diesen Ansatz und untersucht Zeitreihen des Stromerzeugungspotenzials von Photovoltaik, Windkraft an Land und Windkraft auf See sowohl getrennt voneinander als auch kombiniert in einem erneuerbaren Technologieportfolio mit einem politikrelevanten Mix dieser Technologien. Allerdings führt dieser Ansatz nicht unmittelbar zu konkreten energiewirtschaftlichen Schlussfolgerungen, wie etwa zum Speicherbedarf – hierfür sind ergänzende Untersuchungen beispielsweise mit Energiesystemmodellen erforderlich.

Ein wesentlicher Parameter von Dunkelflauten-Analysen auf Basis des erneuerbaren Stromangebots ist der anzulegende Schwellenwert. Dieser definiert, unter welches Niveau das Stromangebot fallen muss, um eine Phase mit geringer Stromerzeugung als Dunkelflaute zu bezeichnen. In der vorliegenden Analyse sind die angewendeten Schwellenwerte relativ zur durchschnittlichen Verfügbarkeit einer Stromerzeugungstechnologie pro untersuchter Region definiert. Je nach Schwellenwert werden unterschiedliche Ereignisse erfasst, sodass dieser Parameter einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat (Abbildung). Für eine vollständige Charakterisierung aller möglichen Dunkelflauten ist daher eine Analyse verschiedener Schwellenwerte notwendig.

Abbildung

Identifikation von Dunkelflauten bei verschiedenen Schwellenwerten

Verfügbarkeit erneuerbarer Stromerzeugung in Prozent der installierten Erzeugungsleistung



Anmerkung: Vereinfachte Darstellung. Zusammenhängende Perioden mit erneuerbarer Stromerzeugung unterhalb eines spezifischen Schwellenwerts werden als ein Ereignis identifiziert.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kittel und Schill (2024), a. a. O.

CC BY 4.0

Je niedriger die Schwellenwerte, desto kürzere Ereignisse werden erfasst.

der Fachliteratur[3] nicht eindeutig beantwortet. Es werden unterschiedliche Daten und Identifikationsmethoden herangezogen,[4] die zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen (Kasten 1).

Kurze Ereignisse mit wenig Wind- und Solarenergie viel häufiger als lange Dunkelflauten

Eine Analyse historischer Dunkelflauten auf Basis von Wetterdaten aus 38 Jahren (1982 bis 2019) ergibt, dass kurze Perioden mit geringer erneuerbarer Stromerzeugung sehr häufig auftreten. Am Beispiel Deutschlands zeigt sich, dass die Photovoltaik (PV) im Durchschnitt 175-mal im Jahr für zwölf Stunden und siebenmal für 24 Stunden mit weniger als der Hälfte[5] ihrer langjährigen durchschnittlichen Stromerzeugungsleistung verfügbar ist (Abbildung 1). Bei der Windkraft an Land ist 40-mal im Jahr für zwölf Stunden und 32-mal für 24 Stunden mit einer Stromerzeugung von weniger als 50 Prozent ihres langjährigen Mittels zu rechnen. In einem erneuerbaren Technologiemix, der PV mit Windkraft an Land und auf See kombiniert, treten solche Ereignisse durchschnittlich 112-mal für zwölf Stunden beziehungsweise 24-mal für 24 Stunden auf. Solche kurzen Perioden mit geringer erneuerbarer Stromerzeugung sind jedoch ein normales und erwartbares Merkmal eines auf Wind- und Solarenergie basierenden Energiesystems, für das es verschiedene Lösungsoptionen wie beispielsweise

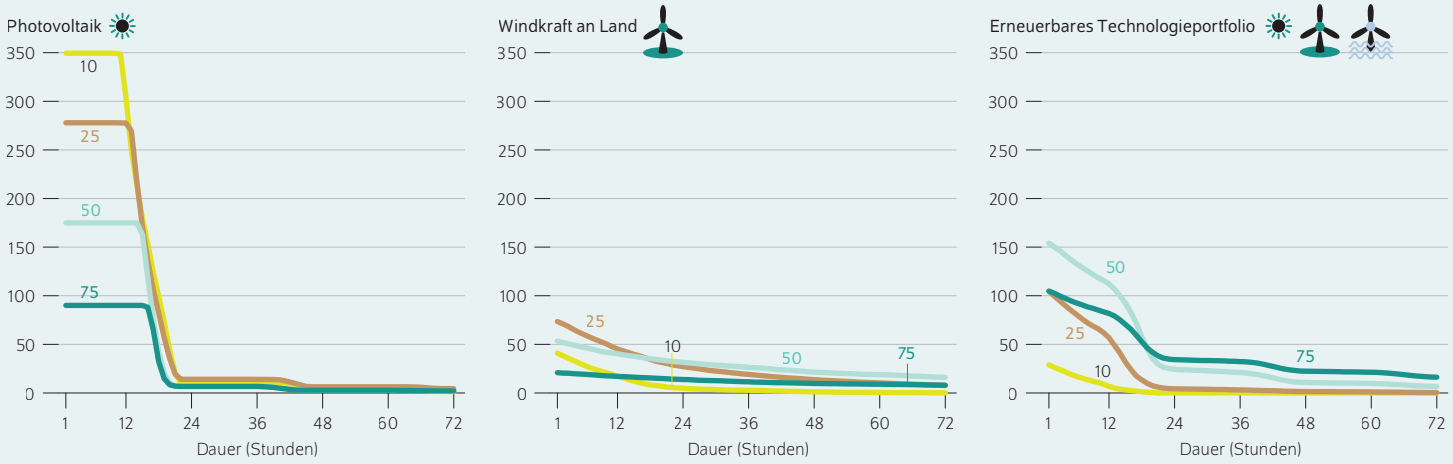
3 Martin Kittel und Wolf-Peter Schill (2024): Measuring the Dunkelflaute: How (not) to analyze variable renewable energy shortage. Environmental Research: Energy 1.3, 035007 (online verfügbar).

4 Vgl. Episode #44 des DIW-Energiewende-Podcasts „fossilfrei": Die Vermessung der Dunkelflaute (online verfügbar), sowie Kittel und Schill (2024), a. a. O. und Kittel und Schill (2026), a. a. O.

5 Bei höheren Schwellenwerten werden grundsätzlich mehr Ereignisse erfasst, bei niedrigeren weniger. Zugleich werden bei höheren Schwellenwerten zunehmend mehrere Ereignisse zu einem einzigen zusammengefasst, die bei niedrigeren Schwellenwerten noch getrennt erfasst werden, sodass sich die durchschnittliche jährliche Häufigkeit wieder reduziert. Dieser Effekt zeigt sich beispielsweise bei den dargestellten Ereignissen für PV, die weniger als 24 Stunden andauern.

Abbildung 1

Häufigkeit und Dauer von Phasen mit niedriger erneuerbarer Stromerzeugung in Deutschland
Durchschnittliche jährliche Häufigkeit für Schwellenwerte von 10, 25, 50 und 75 Prozent des langjährigen Mittels des Stromerzeugungspotenzials der jeweiligen Technologie bzw. Technologiemix



Anmerkung: Untersucht wurden die Wetterjahre 1982 bis 2019. Das erneuerbare Technologieportfolio umfasst Photovoltaik, Windkraft an Land und auf See, wobei sich die Ergebnisse beider Windkrafttechnologien ähneln. Lesebeispiel: Im erneuerbaren Technologieportfolio traten durchschnittlich rund 60 (110/80) Ereignisse mit einer Dauer von mindestens zwölf Stunden pro Jahr auf, in denen das durchschnittliche Stromerzeugungspotenzial weniger als 25 (50/75) Prozent des langjährigen Mittels betrug.

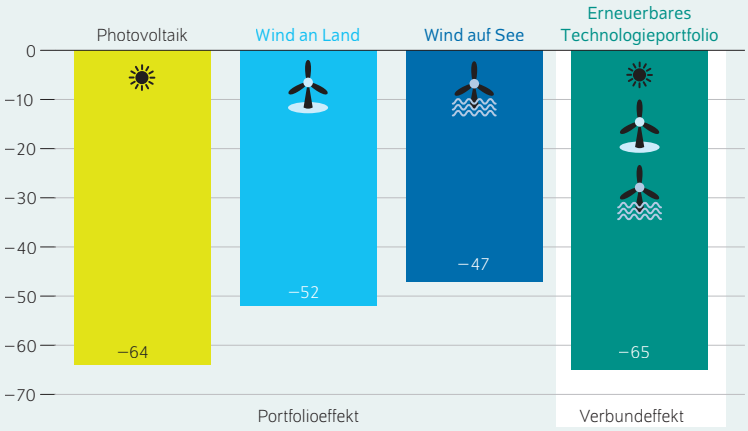
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kittel und Schill (2026), a. a. O.

CC BY 4.0

Kurze Phasen mit niedrigem Stromangebot sind sehr häufig, vor allem bei der Photovoltaik.

Abbildung 2

Verkürzung von Dunkelflauten durch Portfolio- und Verbundeffekte
In Prozent



Anmerkung: Durchschnittliche Verkürzung der jeweils längsten Ereignisse aller betrachteten europäischen Länder, Wetterjahre und Schwellenwerte. Verbundeffekt unter der Annahme eines unbegrenzten grenzüberschreitenden Stromaustauschs in Europa.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kittel und Schill (2026), a. a. O.

CC BY 4.0

Ein erneuerbarer Technologiemix und ein großräumiger Stromverbund reduzieren die Dauer von Dunkelflauten deutlich.

Kurzfrist-Stromspeicher gibt. Dazu zählen beispielsweise stationäre Batteriespeicher, die Strom über wenige Stunden verschieben können. Deutlich kritischer erscheinen dagegen besonders langanhaltende Dunkelflauten.

Europäischer Stromaustausch und erneuerbarer Technologiemix verringern Dunkelflauten

Die Analyse von historischen Wetterdaten nicht nur für Deutschland, sondern ganz Europa[6] zeigt, dass Häufigkeit, Dauer und Schwere von Dunkelflauten zwischen verschiedenen Technologien und geografischen Bezugsräumen stark variieren. Dabei ergänzen sich die Erzeugungsprofile von Wind- und Solarenergie: Wenn wenig Wind weht, scheint dafür manchmal die Sonne, und in Phasen mit geringer Solarstromerzeugung weht dafür oft der Wind. Das gilt nicht nur für die typischen täglichen und saisonalen Schwankungen.[7] Ein kombiniertes Portfolio aus PV und Windkraft an Land und auf See kann auch die am stärksten ausgeprägten Dunkelflauten innerhalb eines Landes wesentlich verkürzen (Abbildung 2). Bezeichnet wird dies als *Portfolioeffekt*.

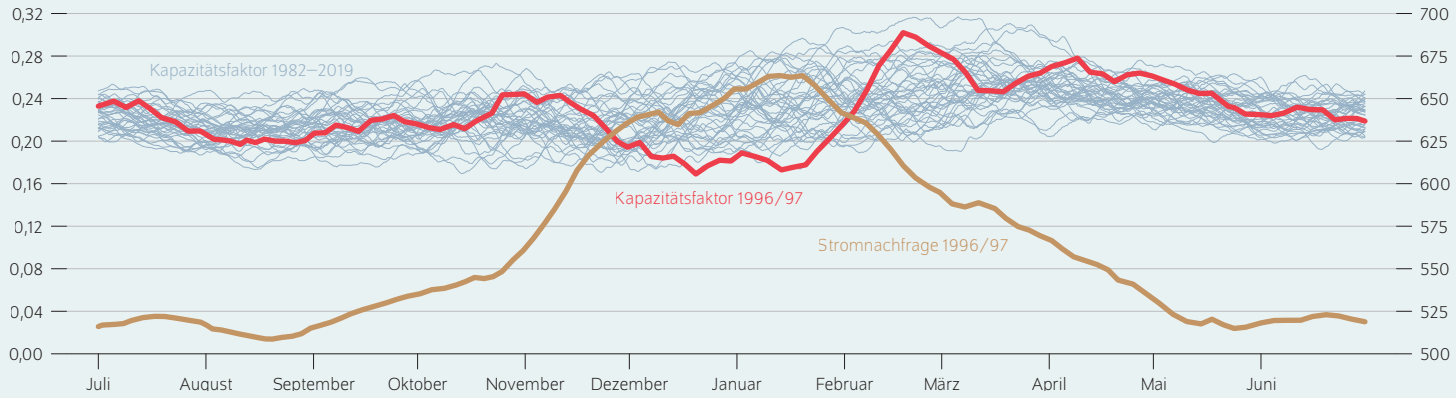
6 Die Analyse wurde für 34 europäische Länder mit Wetterdaten aus 38 Jahren (1982 bis 2019) durchgeführt, vgl. Kittel und Schill (2026), a. a. O.

7 Frank Kaspar et al. (2019): A climatological assessment of balancing effects and shortfall risks of photovoltaics and wind energy in Germany and Europe. Advances in Science and Research, 16, 119–128.

Abbildung 3

Erneuerbares Stromerzeugungspotenzial aller untersuchten Wetterjahre im Jahresvergleich und Stromnachfrage im Wetterjahr 1996/97

Kapazitätsfaktor (linke Achse) und Stromnachfrage in Gigawatt (rechte Achse) als Zeitreihen im gleitenden 28-Tage-Durchschnitt



Anmerkung: Dargestellt ist das geglättete Stromerzeugungspotenzial eines erneuerbaren Technologieportfolios als Kapazitätsfaktor und die geglättete Stromnachfrage in dem Wetterjahr 1996/97 aggregiert über alle betrachteten Länder in Europa.

Quelle: Eigene Darstellung.

CC BY 4.0

Im Winter 1996/97 kam es zeitgleich mit dem jährlichen Höchststand der Stromnachfrage zu einer besonders extremen Dunkelflaute.

In einem hypothetischen Szenario ohne grenzüberschreitenden Stromaustausch verringert sich die Dauer der längsten Perioden mit geringer Stromerzeugung bei einem erneuerbaren Technologieportfolio gegenüber einzelnen Technologien jeweils isoliert betrachtet deutlich: Gemittelt über alle untersuchten Länder, Wetterjahre und Schwellenwerte verkürzt sich deren Dauer gegenüber einer reinen Stromversorgung aus PV um 64 Prozent, gegenüber Windkraft an Land um 52 Prozent und gegenüber Windkraft auf See um 47. Dieser *Portfolioeffekt* ist besonders stark für PV ausgeprägt, da die Windkraft oft dann Strom erzeugt, wenn keine oder nur wenig Solarenergie zur Verfügung steht, insbesondere nachts und im Winterhalbjahr.

Mit zunehmender Größe des betrachteten Gebiets, innerhalb dessen Strom ausgetauscht werden kann, reduzieren sich die aufgetretenen Dunkelflauten ebenfalls. Unter der idealisierten Annahme eines unbegrenzten Stromaustauschs im europäischen Verbundsystem verkürzen sich die längsten Dunkelflauten für ein erneuerbares Technologieportfolio im Durchschnitt um 65 Prozent im Vergleich zu einem Szenario ohne Stromaustausch zwischen den betrachteten Ländern. Grund für diesen sogenannten *Verbundeffekt* ist, dass sich Schwankungen in der erneuerbaren Stromerzeugung über ein großes Gebiet hinweg teilweise ausgleichen. In Europa weht nahezu immer irgendwo etwas Wind oder es scheint die Sonne, wodurch in einzelnen Ländern vorherrschende, besonders ausgeprägte Dunkelflauten durch Stromaustausch abgemildert werden können. Ein unbegrenzter europäischer Stromaustausch ist zwar in der Praxis nicht realisierbar. Jedoch verdeutlicht der *Verbundeffekt*, dass eine stärkere Integration des europäischen Strommarkts und der Netzinfrastruktur ein effektiver Baustein zur Bewältigung ausgeprägter Dunkelflauten ist.

Extreme Dunkelflauten können über viele Wochen andauern

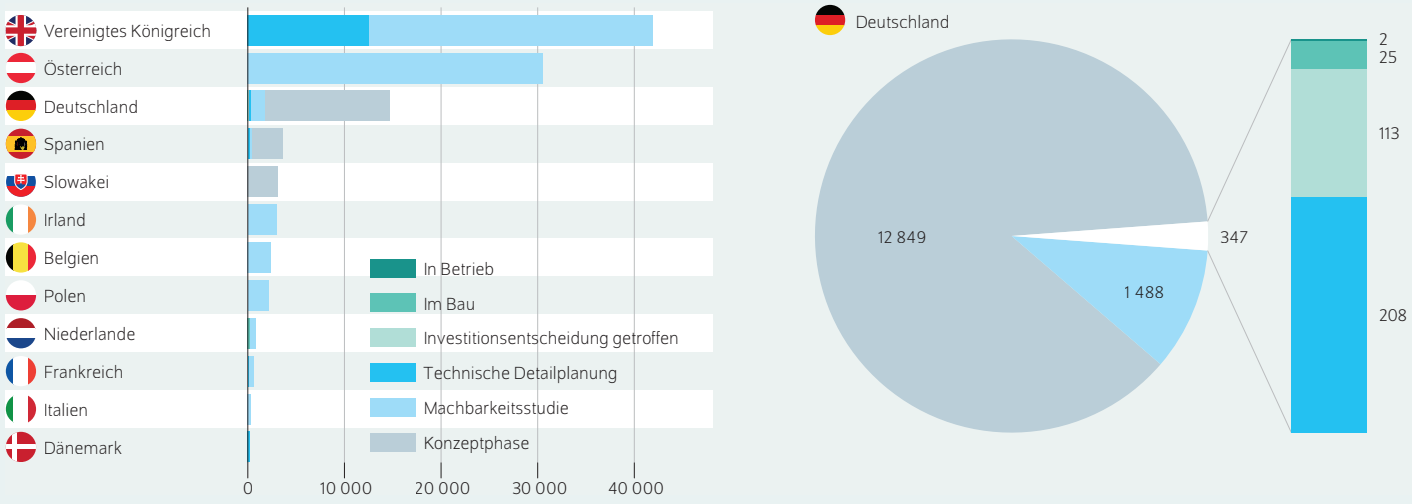
Sehr stark ausgeprägte Dunkelflauten treten in den untersuchten Wetterjahren von 1982 bis 2019 nur sehr selten auf. Sie setzen sich aus mehreren aufeinanderfolgenden mehrtägigen oder mehrwöchigen Einzelereignisse zusammen, in denen jeweils sehr wenig Strom aus Wind- und Solarenergie erzeugt werden kann. Solche zusammenhängenden Dunkelflauten können sich über viele Wochen erstrecken und treten vor allem im Winter auf, wenn ausgeprägte Phasen von Windstille an Land und auf See und eine ohnehin saisonal bedingte schwache Sonneneinstrahlung zusammenfallen.[8]

Ein Beispiel hierfür auf europäischer Ebene war der Winter 1996/97 (Abbildung 3), in dem über einen Zeitraum von insgesamt 55 Tagen mehrere mehrtägige und mehrwöchige Dunkelflauten aufeinander folgten, und zwar in vielen europäischen Ländern gleichzeitig. Während solcher Extremereignisse fällt die Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie allerdings nie vollständig aus. In der Dunkelflaute

8 Kittel und Schill (2026), a. a. O.

Abbildung 4

Untergrund-Wasserstoffspeicher in Europa und in Deutschland nach Projektstatus
Speicherkapazität in Gigawattstunden



Anmerkung: Die Kategorie „Technische Detailplanung" heißt in der Originalquelle „Front-End Engineering Design".

Quelle: Internationale Energieagentur, eigene Auswertung.

CC BY 4.0

Es gibt umfangreiche Planungen für Wasserstoffspeicher, aber erst sehr wenige konkret realisierte Projekte.

im Winter 1996/97 lag das Stromerzeugungspotenzial von Wind- und Solarenergie während der 55 Tage im Durchschnitt[9] bei fast der Hälfte des langjährigen Mittels. Ereignisse, bei denen nahezu gar kein Strom aus Wind- und Solarenergie erzeugt werden kann, sind hingegen auch im Extremfall meist auf wenige Stunden begrenzt.

Dennoch stellt das Energiedefizit, das sich über die gesamte Dauer langer Winter-Dunkelflauten ergeben kann, eine Herausforderung für eine Stromversorgung mit hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien dar. Dies gilt umso mehr, da die Stromnachfrage in Mittel- und Nordeuropa im Winter durch den erhöhten Wärmebedarf besonders hoch ist und damit das Energiedefizit weiter verschärfen kann. Diese Saisonalität dürfte durch die zunehmende Elektrifizierung der Raumwärmebereitstellung künftig noch stärker ausgeprägt sein.

Langfrist-Stromspeicher können extreme Dunkelflauten absichern

Stromspeicher können dazu beitragen, eine auf Windkraft und PV basierende Stromversorgung gegen Dunkelflauten abzusichern. Bisher werden vor allem stationäre Batteriespeicher mit kurzer Speicherdauer eingesetzt. Sie eignen sich vor allem dazu, kurzzeitige Schwankungen im Stromsystem auszugleichen, da sie kostengünstig viel Stromerzeugungsleistung bereitstellen können. Für die Speicherung und Verschiebung größerer Strommengen über längere Zeiträume sind die Kosten für Speicherkapazität der heute gängigen Batteriespeicher allerdings sehr hoch.[10] Langfrist-Stromspeicher haben hingegen sehr niedrige Kosten für Speicherkapazität. Sie können daher erneuerbare Energie kostengünstig einspeichern, über mehrere Monate vorhalten und bei Bedarf über viele Wochen hinweg wieder ausspeichern. Sie sind daher besonders geeignet, stark ausgeprägte Energiedefizite im Stromsystem während langandauernder Dunkelflauten im Winter auszugleichen.

Bislang wird die Stromerzeugung vor allem durch konventionelle Kraftwerke gegen längere Dunkelflauten abgesichert, weshalb Langfrist-Stromspeicher bisher kaum benötigt wurden und somit noch nicht im großen Maßstab vorhanden sind. Allerdings geht die Energiewende mit tiefgreifenden Veränderungen des Stromsystems einher. Der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien steigt stetig, während die gesicherte Stromerzeugungsleistung durch den Ausstieg aus der Atomkraft, den geplanten Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 sowie den zum Erreichen der Klimaneutralität notwendigen Ende der fossilen Stromerzeugung insgesamt kontinuierlich sinkt. Langfrist-Stromspeicher rücken daher zunehmend in den Fokus.

9 Dieses Ergebnis beruht auf der Annahme eines unbegrenzten Stromaustauschs zwischen den betrachteten Ländern. Ohne grenzüberschreitenden Austausch können extreme Dunkelflauten deutlich länger andauern. Das schwerste Ereignis in Deutschland dauerte demnach 109 Tage und trat im Winter 1995/96 auf. Über diesen Zeitraum belief sich das durchschnittliche Stromerzeugungspotenzial auf 37 Prozent des langjährigen Mittels.

10 Vgl. Wolf-Peter Schill et al. (2025): Hintergrund: Welche Rolle spielen Speicher in der Energiewende? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam (online verfügbar).

Kasten 2

Analysen mit dem Stromsektormodell DIETER

Das „Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables" (DIETER) ist ein quelloffenes Stromsektormodell. Es minimiert die Investitions- und Betriebskosten des Stromsektors und kann genutzt werden, um ein möglichst günstiges Zusammenspiel verschiedener Stromerzeugungs- und Flexibilitätstechnologien in zukünftigen Szenarien des europäischen Stromsystems zu bestimmen. Es bildet alle Stunden eines Jahres ab, um die Fluktuation erneuerbarer Energien sowie insbesondere langanhaltende Dunkelflauten realistisch zu modellieren. Die Ergebnisse umfassen die gesamten Systemkosten, kostenminimale Ausbauentscheidungen verschiedener Technologien sowie deren stündlicher Einsatz. DIETER wird seit mehr als zehn Jahren am DIW Berlin entwickelt und wurde bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Studien genutzt.[1]

Die Modellergebnisse können als Ergebnis eines vollkommenen Marktes mit perfektem Wettbewerb interpretiert werden. Eingangsdaten umfassen hauptsächlich Zeitreihen zur Nachfrage und Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, technische und Kostenparameter verschiedener Stromerzeugungs- und Speichertechnologien sowie Ausbaupotenziale für Windkraft und Solarenergie. Technologien wie Elektromobilität und dezentrale Wärmepumpen gehören zur Stromnachfrage, die als preisunelastisch angenommen wird. Der Modellcode und alle Inputdaten für die hier dargestellte Analyse sind quelloffen verfügbar.[2]

1 Vgl. Modelldokumentation (online verfügbar).

2 Vgl. Gitlab-Repository (online verfügbar).

Eine plausible und aktuell am häufigsten diskutierte Technologie für Langfrist-Stromspeicher sind Wasserstoffspeicher.[11] Bei diesem Mehrkomponentensystem wird zunächst Wasserstoff mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom erzeugt. Dieser sogenannte grüne Wasserstoff[12] wird anschließend unterirdisch gespeichert und bei Bedarf durch Verbrennung in einer Wasserstoff-Gasturbine wieder in Strom umgewandelt. Die einzelnen Komponenten können entweder am selben Standort angesiedelt oder über ein Wasserstoffnetz miteinander verbunden sein.

11 Vgl. Dana Kirchem et al. (2025): Was sind Wasserstoffspeicher und welche Rolle spielen sie in der Stromversorgung der Zukunft? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam (online verfügbar). Ein alternatives Konzept, das noch einen weiteren Umwandlungsschritt erfordert, ist die Speicherung von E-Biomethanol, das aus Biogas unter Zugabe von grünem Wasserstoff erzeugt und in flüssiger Form kostengünstig in oberirdischen Tanks gespeichert werden kann. Vgl. Philipp Glaum et al. (2026): A minimal methanol backstop for high-electrification scenarios. Joule 10 (9), 102464 (online verfügbar).

12 Vgl. Martin Kittel et al. (2023): Nationale Wasserstoffstrategie konsequent und mit klarem Fokus umsetzen. DIW Wochenbericht Nr. 41, 561–571 (online verfügbar).

Aufgrund ihrer geologisch vorteilhaften Eigenschaften und der großen erschließbaren Speichervolumina eignen sich unterirdische Kavernen in Salzgestein besonders gut zur kostengünstigen Speicherung großer Mengen an Wasserstoff.[13] Da das Potenzial für solche Salzkavernen in Europa geografisch stark auf Norddeutschland konzentriert ist, könnte Deutschland eine zentrale Rolle bei der Langfrist-Stromspeicherung in Europa einnehmen. Wasserstoff könnte grundsätzlich auch in porösen Gesteinsformationen eingespeichert werden, das von dichten Gesteinsschichten eingeschlossen ist, wodurch das Gas nicht entweichen kann. Allerdings besteht hier noch Forschungsbedarf zur tatsächlichen Realisierbarkeit.[14] In Europa wird bereits heute Erdgas in großem Umfang unterirdisch gespeichert,[15] während Untergrund-Wasserstoffspeicher bislang noch nicht in großem Stil errichtet wurden. Allerdings sind alle ihre technischen Komponenten (Elektrolyse, Untergrundspeicher, Gasturbinen und Pipelines) bereits entwickelt und erprobt.

In Deutschland sind derzeit erste kleinskalige Demonstrations- und Forschungsanlagen für Wasserstoff-Kavernenspeicher im Gigawattstunden-Bereich in Betrieb oder im Bau (Abbildung 4). Zudem sind weitere Projekte mit einer Kapazität von insgesamt knapp 15 Terawattstunden (TWh) in Planung, die sich jedoch überwiegend noch in frühen Umsetzungsstadien von Machbarkeitsstudien oder Konzeptentwicklung befinden, sodass deren tatsächliche Realisierung offen ist. Dies entspricht rund neun Prozent der aktuell in Deutschland für Erdgas genutzten Kavernenspeicherkapazität. In anderen europäischen Ländern, vor allem im Vereinigten Königreich und in Österreich, sind weitere Untergrundspeicher mit einer Gesamtkapazität von fast 90 TWh geplant.

Modellanalyse zeigt erforderlichen Speicherbedarf

Mit dem am DIW Berlin entwickelten quelloffenen Stromsektormodell DIETER (Kasten 2) wurde der Bedarf an Langfrist-Stromspeichern zur Absicherung eines zukünftigen europäischen Stromsystems gegen Dunkelflauten untersucht.[16] Das Basisszenario unterstellt zunächst ein vollständig erneuerbares Stromsystem. Dieser Ansatz wurde gewählt, um den größtmöglichen Flexibilitätsbedarf zu ermitteln, der zur Bewältigung extremer Dunkelflauten erforderlich ist.

Der Einfluss des grenzüberschreitenden Strom- und Wasserstoffaustauschs auf den Speicherbedarf wird mithilfe dreier hypothetischer Austauschszenarien untersucht. Szenario (1)

13 Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2025): Weißbuch Wasserstoffspeicher (online verfügbar), sowie DBI (2026): Wasserstoff speichern – so viel ist sicher. Aktualisierung der Studie Transformationspfade für Untergrundgasspeicher. Erstellt im Auftrag von INES Initiative Energien Speichern e. V. (online verfügbar).

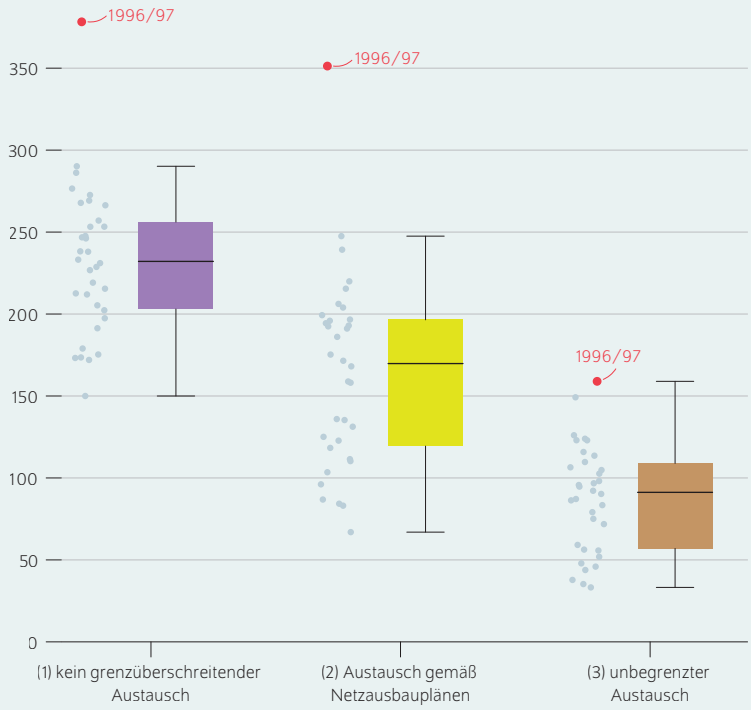
14 Vgl. Episode #29 des DIW-Energiewende-Podcasts fossilfrei: Wasserstoffspeicher für die Energiewende: Technik ist da, Investitionsanreize fehlen (online verfügbar).

15 Dafür werden sowohl Poren- als Kavernenspeicher genutzt, vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2025), a. a. O.

16 Kittel, Roth und Schill (2026), a. a. O.

Abbildung 5

Drei Szenarien für Langfrist-Stromspeicherbedarf im Jahresvergleich
Speicherkapazität in Terawattstunden



Anmerkung: Die Mittellinie markiert den Median, die Boxgrenzen den Interquartilsabstand (Q1–Q3). Die Whisker reichen bis zum äußersten Datenpunkt innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Datenpunkte jenseits der Whisker sind Ausreißer.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kittel et al. (2026), a. a. O.

CC BY 4.0

Unter Annahme des Wetters wie 1996/97 wäre der Speicherbedarf am höchsten, da Dunkelflauten in diesem Winter besonders stark und in vielen europäischen Ländern gleichzeitig auftraten.

unterstellt, dass kein grenzüberschreitender Energieaustausch möglich ist; alle Länder sind als Inselsystem im Modell abgebildet. Das mittlere Szenario (2) geht von grenzüberschreitender Austauschkapazität für Strom und Wasserstoff auf Basis aktueller europäischer Netzentwicklungspläne aus. Im Szenario (3) wird ein unbegrenzter Austausch von Strom und Wasserstoff zwischen allen abgebildeten europäischen Ländern angenommen.

Zudem wird anhand historischer Wetterdaten untersucht, wie sich einzelne Wetterjahre auf den Speicherbedarf auswirken. Dabei wird das zukünftige System mit historischen Wetterbedingungen modelliert.[17] Der jeweilige Modellierungszeitraum reicht pro Modelllauf von einer Jahresmitte zur Jahresmitte des Folgejahres, um die Winterperiode und langanhaltende Dunkelflauten vollständig abzubilden.

Hoher Langfristspeicherbedarf zur Bewältigung der schwersten Dunkelflaute

Die Modellanalyse zeigt, dass der Bedarf an Langfrist-Stromspeichern im kostenminimalen Stromsystem stark von den meteorologischen Bedingungen und dem Grad der europäischen Vernetzung abhängt.[18] Im mittleren Szenario (2), das den geplanten Ausbau der Strom- und Wasserstoffnetze in Europa berücksichtigt, liegt dieser im Median bei gut 170 TWh über alle betrachteten Länder hinweg (Abbildung 5), was etwa drei Prozent der angenommenen zukünftigen jährlichen Stromnachfrage in Europa entspricht. Jedoch treiben extreme Wetterbedingungen in einzelnen Jahren diesen Speicherbedarf in die Höhe. Im Winter 1996/97 waren viele europäische Länder zeitgleich von außergewöhnlich schweren, kurz hintereinander auftretenden Dunkelflauten betroffen. Für solche Wetterbedingungen steigt der modellierte Bedarf an Langfrist-Stromspeicherkapazität auf rund 350 TWh, was etwa sieben Prozent der angenommenen jährlichen europäischen Stromnachfrage entspricht. Dieser Bedarf liegt dabei deutlich über den ermittelten Werten aller übrigen untersuchten Wetterjahre und etwa 40 Prozent über dem zweithöchsten Bedarf in Höhe von rund 250 TWh im Jahr 1984/85.

Der Vergleich der drei Austauschszenarien zeigt, dass selbst ein unbegrenzter grenzüberschreitender Strom- und Wasserstoffhandel den Speicherbedarf zwar senken, jedoch nicht vollständig beseitigen kann. Im Inselszenario (1) ohne grenzüberschreitenden Strom- und Wasserstoffaustausch liegt der Langfrist-Stromspeicherbedarf im Median bei circa 230 TWh und im Maximum bei knapp 380 TWh, also etwas höher als im mittleren Szenario (2). Selbst unter der idealisierten Annahme, dass extreme Dunkelflauten durch den grenzüberschreitenden Austausch von Strom und Wasserstoff über ganz Europa hinweg unbegrenzt räumlich ausgeglichen werden können, bleibt im Szenario (3) ein erheblicher Bedarf an Langfrist-Stromspeichern im kostenminimalen Stromsystem. Der mittlere Speicherbedarf beträgt dabei rund 90 TWh, der maximale rund 160 TWh. Letzteres entspricht gut drei Prozent des angenommenen jährlichen europäischen Stromverbrauchs. Die Ergebnisse unterstreichen, dass Langfrist-Stromspeicher auch bei weitreichendem Energieaustausch wirtschaftlich sinnvoll sind und für Stromsysteme mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle spielen dürften.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Bedarf an Langfrist-Stromspeichern sowie das Auftreten und die Ausprägung extremer Dunkelflauten sehr stark zwischen den Jahren schwanken. Dies verdeutlicht die Herausforderung für die Dimensionierung des Speichers: Um die Versorgungssicherheit in jedem Jahr vollständig zu gewährleisten, müsste der Speicher sich an seltenen Extremereignissen wie denen im Winter 1996/97 orientieren, nicht an einem durchschnittlichen Jahr. Die gesamte im mittleren Szenario benötigte

17 Für die modellgestützte Analyse werden 35 Wetterjahre im Zeitraum 1982 bis 2016 herangezogen.

18 Das Modell optimiert auch den Investitionsbedarf und den Einsatz stationärer Batteriespeicher sowie den Betrieb von Pumpspeicher- und Reservoirkraftwerken. Diese Technologien tragen jedoch kaum zur gesamten Energiespeicherkapazität bei.

Speicherkapazität von 350 TWh, die rund einem Drittel der in Europa derzeit installierten Erdgasspeicher entspricht, würde dann jedoch nur in diesem einen Extremjahr voll genutzt.

Auch bei Berücksichtigung weiterer Optionen bleibt der Speicherbedarf hoch

Die oben dargestellten Ergebnisse gelten für ein vollständig erneuerbares europäisches Stromsystem, das wesentlich auf fluktuierender Wind- und Solarenergie basiert, und in dem Schwankungen von Angebot und Nachfrage überwiegend durch grenzüberschreitenden Energieaustausch sowie Speicher ausgeglichen werden.[19] Somit kann der ermittelte Bedarf an Langfrist-Stromspeichern als Obergrenze betrachtet werden. Er könnte sinken, wenn weitere Flexibilitätstechnologien auf der Stromerzeugungs- oder der Nachfrageseite berücksichtigt werden.

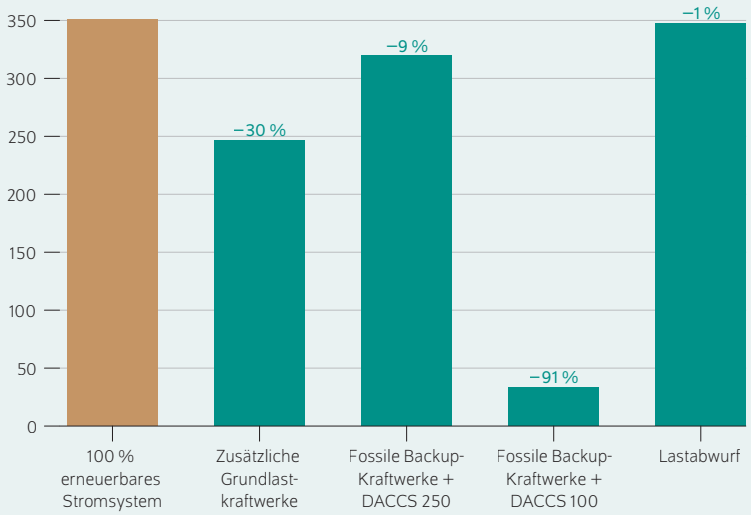
Häufig wird die mögliche Rolle emissionsarmer Grundlastkraftwerke im Stromsystem der Zukunft diskutiert.[20] Modellstudien zeigen, dass zusätzliche Grundlastkraftwerke, die wetterunabhängig Strom erzeugen können, für ein kostengünstiges und verlässliches erneuerbares Energiesystem nicht erforderlich sind.[21] In einer ergänzenden Modellrechnung wird dennoch untersucht, wie sich hypothetische, vollständig emissionsfreie und jederzeit flexibel einsetzbare Kraftwerkskapazitäten in einer ähnlichen Größenordnung wie die heutigen Atomkraftwerke[22] auf den Langfrist-Stromspeicherbedarf auswirken würden. Unter diesen idealisierten Annahmen könnte der Speicherbedarf zur Bewältigung der extremsten Dunkelflaute im Jahr 1996/97 um knapp ein Drittel sinken (Abbildung 6). Auch in diesem Fall blieben also erhebliche Speicherkapazitäten erforderlich. Aus dem zugrundeliegenden Modellierungsansatz lässt sich jedoch weder eine Notwendigkeit noch ein wirtschaftlicher Vorteil solcher Kraftwerke ableiten.

Eine andere aktuell stark diskutierte Option für die Überbrückung von Dunkelflauten ist die Stromerzeugung durch fossile Backup-Kraftwerke.[23] Die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen müssten allerdings kompensiert werden, damit der Stromsektor im Einklang mit dem europäischen Ziel der Klimaneutralität bleibt. Dafür müsste CO_2 aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft gespeichert werden.[24] Die Modellrechnungen zeigen, dass dies nur dann ökonomisch vorteilhaft wäre, wenn die Technologien für CO_2-Entnahme und -speicherung künftig zu extrem niedrigen Kosten verfügbar wären. Derzeit liegen die Kostenschätzungen für erste Projekte in einer Größenordnung von 500 bis 1500 Euro pro Tonne CO_2.[25] Das künftige Kostensenkungspotenzial hängt wesentlich davon ab, wie sehr sich die Investitionskosten durch Lernkurven- und Skalierungseffekte tatsächlich verringern lassen und sich Anlagenauslastung, Energiebezugs- und Finanzierungskosten entwickeln, wobei letztere auch von den künftigen Förderbedingungen abhängen.[26] Könnten die Kosten auf 250 Euro pro Tonne gesenkt werden, würde der Bedarf an Langfrist-Stromspeicherkapazität lediglich um knapp zehn Prozent sinken.

Abbildung 6

Einfluss alternativer Technologien auf den Langfrist-Stromspeicherbedarf

Speicherkapazität in Terawattstunden



Anmerkung: Im Extremjahr 1996/97 hätte der Speicherbedarf bei rund 350 Terawattstunden gelegen. Ausgehend von diesem Bedarf werden die Effekte folgender Alternativen betrachtet: als bereits gebaut angenommene Grundlastkraftwerke, für die keine Investitionskosten berücksichtigt werden; mit fossilen Energien betriebene Backup-Kraftwerke, deren Zubau und Betrieb im Modell optimiert werden und deren Emissionen mittels Direktabscheidung von CO_2 aus der Luft (DACCS) zu Kosten von je 250 bzw. 100 Euro pro Tonne CO_2 aus der Atmosphäre entnommen werden; Lastabwurf zu je 1000 Euro pro abgeworfener Megawattstunde Stromnachfrage.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kittel et al. (2026), a. a. O.

CC BY 4.0

Der Speicherbedarf bleibt hoch, außer die CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre wird extrem günstig, was aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich ist.

19 Hinzu kommt in begrenztem Umfang steuerbare Stromerzeugung aus Bioenergie sowie aus Wasserkraft.

20 Vgl. Alexander Wimmers et al. (2025): Kommerzielle Energieerzeugung mit Kernfusion nicht absehbar – Anwendungsforschung entwickelt sich dynamisch. DIW Wochenbericht Nr. 13, 195–201 (online verfügbar).

21 Vgl. Anke Weidlich et al. (2025): Baseload power plants are not essential for future power systems. Cell Reports Physical Science 7(1), 103050. (online verfügbar); sowie ausführlicher: Philipp Stöcker et al. (2024): Kernspaltung, Erdgas, Geothermie, Kernfusion: Welche Rolle spielen Grundlastkraftwerke in Zukunft? Impuls des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft" (online verfügbar).

22 Konkret werden perfekt flexible emissionsfreie Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 102 Gigawatt als gegeben angenommen, angelehnt an die Atomkraft im „Global Ambition"-Szenario des zehnjährigen Netzentwicklungsplans (TYNDP) 2022.

23 Hier wird von Ölturbinen mit vergleichsweise niedrigen Investitions- und Betriebskosten ausgegangen. Im Gegensatz zu beispielsweise Gas kann Öl kostengünstig über das Straßensystem transportiert und in oberirdischen Tanks gespeichert werden.

24 Theoretisch könnte das bei der fossilen Stromerzeugung entstehende CO_2 direkt vor Ort abgeschieden werden. Dies erfordert jedoch hohe Investitionen in entsprechende Abscheidetechnologien und CO_2-Transportinfrastruktur, die für Spitzenlastkraftwerke mit absehbar geringen Volllaststunden ökonomisch unplausibel erscheinen. Zudem würden sich Fragen des unvollständigen Abscheidegrads sowie der zeitlichen Flexibilität der Stromerzeugung solcher Kraftwerke stellen.

25 John Young et al. (2023): The cost of direct air capture and storage can be reduced via strategic deployment but is unlikely to fall below stated cost targets. One Earth 6(7), 899–917 (online verfügbar).

26 Vgl. Young et. al (2023), a.a.O und Katrin Sievert et al. (2024): Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture. Joule, 8, 979–999 (online verfügbar).

Erst bei einer deutlich weitergehenden, aber aus heutiger Sicht unplausiblen Kostensenkung auf 100 Euro pro Tonne würden fossile Back-up-Kraftwerke mit CO_2-Kompensation im Modell umfangreich eingesetzt, so dass der Bedarf an Langfrist-Stromspeicherkapazität um rund 90 Prozent sinken könnte.

Der Speicherbedarf könnte außerdem verringert werden, wenn die Stromnachfrage künftig stärker auf langanhaltend hohe Preise in Phasen geringer Stromerzeugung durch fluktuierende erneuerbare Energien reagieren würde. Dies betrifft vor allem notwendige Investitionen in Wasserstoff-Turbinen. Im Fall einer freiwilligen Reduzierung der Stromnachfrage von beispielweise großen Industrieverbrauchern, die eine Kompensation in Höhe von 1000 Euro pro vermiedener Megawattstunde erhalten würden, könnte sich die Turbinenleistung um rund 15 Prozent verringern. Die notwendige Langfrist-Stromspeicherkapazität bliebe allerdings auch in so einem Szenario auf unverändert hohem Niveau.

Fazit: Aufbau von Langfrist-Stromspeichern jetzt anschieben

Die vorliegende Analyse zeigt, dass extreme Dunkelflauten zwar sehr selten auftreten, aber länger andauern können als vielfach angenommen. Die längste in den untersuchten Wetterjahren identifizierte europäische Dunkelflaute dauerte 55 Tage. Die Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien fiel während dieser Zeit nicht dauerhaft auf null, sondern lag im Durchschnitt immer noch bei knapp der Hälfte des langjährigen Mittels. Dennoch ist sie während solcher extremer Dunkelflauten über einen langen Zeitraum stark begrenzt, sodass das entstehende Energiedefizit durch geeignete Technologien ausgeglichen werden muss. Die Analyse verdeutlicht, dass diese seltenen Ereignisse kein unüberwindbares Hindernis für ein vollständig erneuerbares Energiesystem darstellen. Im Zusammenspiel mit dem europäischen Stromaustausch und anderen Flexibilitätsoptionen zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen wie etwa Batteriespeichern sind Langfrist-Stromspeicher eine geeignete Option zum Ausgleich länger anhaltender Energiedefizite und damit zur Absicherung der Energiewende.

Der genaue zukünftige Bedarf an wasserstoffbasierten Langfrist-Stromspeichern ist schwer abzuschätzen, da es erhebliche Unsicherheiten bei der Entwicklung der zukünftigen Nachfrage,[27] der Stromerzeugungsseite und auch der alternativen Speicheroptionen gibt. Die vorliegende Analyse deutet jedoch darauf hin, dass im europäischen Energiesystem Langfrist-Speicherkapazitäten in Höhe von mehreren hundert Terawattstunden erforderlich werden könnten. Das entspräche mehreren Prozent der angenommenen jährlichen Stromnachfrage in Europa. Zwar liegt dieser Bedarf deutlich über der derzeitigen Kapazität der installierten Kurz- und Mittelfrist-Stromspeicher. Dennoch erscheint der Aufbau einer Wasserstoffspeicherinfrastruktur dieser Dimension technisch und praktisch umsetzbar. Bereits heute wird in Europa Erdgas in einer ähnlichen Größenordnung unterirdisch gespeichert.

Der hier ermittelte maximale Speicherbedarf lässt sich zudem als Obergrenze für ein europäisches Stromsystem interpretieren, in dem die größte anzunehmende Dunkelflaute in fast vier Jahrzehnten fast vollständig über Langfrist-Stromspeicher abgedeckt wird und die Stromnachfrage jederzeit komplett bedient wird. Der Bedarf an Wasserstoffspeichern könnte sinken, wenn zu einem gewissen Grad andere steuerbare oder emissionsfreie Stromerzeugungsoptionen erschlossen werden, wenn Biogas verstärkt als Langfristspeicher genutzt würde oder wenn die Stromnachfrage über längere Zeiträume während extremer Dunkelflauten nennenswert reduziert werden könnte. Dennoch könnten großvolumige Wasserstoffspeicher eine zentrale Option zur Absicherung des künftigen Energiesystems gegen extreme Wetterlagen darstellen. Der Hochlauf dieser Speicher sollte daher politisch stärker vorangetrieben werden.

Um langfristig über ausreichende Speicherkapazitäten zu verfügen, müssen die Investitionsentscheidungen zeitnah getroffen werden. Für die Umrüstung oder den Neubau von Wasserstoff-Kavernenspeichern sind Planungs- und Bauzeiten von fünf bis 15 Jahren zu veranschlagen, je nachdem ob bestehende Erdgasspeicher umgerüstet oder Wasserstoffspeicher neu gebaut werden. Hinzu kommt, dass Speicherbetreiber erheblichen Wetter-, Mengen- und Preisrisiken ausgesetzt sind, die privatwirtschaftliche Investitionen hemmen. Insbesondere erscheint es unplausibel, dass Speicherkapazitäten, die nur einmal in mehreren Jahren oder gar Jahrzehnten voll ausgelastet werden, von privaten Investoren vorgehalten würden. Daher dürften gezielte Absicherungs- und Förderinstrumente notwendig werden.[28]

Um einen Einstieg in Langfrist-Stromspeicher voranzutreiben und einen Lock-in in fossile Erzeugungstechnologien zu vermeiden, sollten diese bei der Ausgestaltung des ab 2032 geplanten Kapazitätsmarkts diskriminierungsfrei berücksichtigt werden. Dieser Mechanismus soll gewährleisten, dass gesicherte Leistung für Zeiten knapper Stromversorgung vorgehalten wird.[29]

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob ein politisches Mindestziel für Langfrist-Stromspeicher festgelegt werden muss, um die Versorgungssicherheit unter allen Witterungsbedingungen zu gewährleisten. Besonders sinnvoll wäre die Einführung eines solchen Ziels für die Kavernenspeicherkapazität. Aber auch für die Elektrolyse- und Rückverstromungsleistung wären politische Ziele hilfreich.

27 Die künftige Entwicklung der Stromnachfrage ist vor allem aufgrund des ungewissen Tempos und Umfangs der Elektrifizierung in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie sowie wegen des schnellen Ausbaus von Rechenzentren für Anwendungen künstlicher Intelligenz mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Der zusätzliche Strombedarf von Rechenzentren ist in diesem Bericht nicht berücksichtigt; er könnte den zukünftigen Langfrist-Stromspeicherbedarf erhöhen.

28 Vgl. Kirchem et al. (2025), a. a. O.

29 Nach dem Strom-Versorgungssicherheits- und Kapazitätengesetz (StromVKG) soll ab dem Jahr 2032 ein umfassender Kapazitätsmarkt eingeführt werden. Dessen konkrete Ausgestaltung ist derzeit noch offen. Vgl. auch Kirchem et al. (2025), a. a. O.

Besonderer Handlungsbedarf ergibt sich dadurch, dass der Wasserstoff-Hochlauf aktuell viel schleppender verläuft als noch bis vor kurzem geplant, und somit das Umfeld für Investitionen in Elektrolyseure und Wasserstoff-Kavernen aktuell besonders herausfordernd ist. Umgekehrt könnte der politisch angestoßene Einstieg in wasserstoffbasierte Langfrist-Stromspeicher den Wasserstoff-Hochlauf auch in anderen Bereichen des Energiesystems unterstützen, beispielsweise in der energieintensiven Industrie.

Martin Kittel ist Wissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | mkittel@diw.de

Alexander Roth ist Wissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin und Affiliate Fellow beim Brüsseler Thinktank Bruegel | aroth@diw.de

Wolf-Peter Schill ist Leiter des Forschungsbereichs „Transformation der Energiewirtschaft" in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | wschill@diw.de

JEL: Q41, Q47, Q48

Keywords: renewable energy drought, Dunkelflaute, long-duration storage, hydrogen storage

Der Artikel ist gemäß der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 nachnutzbar: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



INTERVIEW

„Dunkelflauten halten die Energiewende nicht auf“

Martin Kittel ist Wissenschaftler in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin.

1. **Herr Kittel, wenn die Sonne nicht scheint und auch der Wind nicht weht, können weder Solar- noch Windenergie erzeugt werden. Wie häufig sind solche Dunkelflauten in Deutschland und wie lange können sie andauern?** Man sollte unterscheiden zwischen kurzen und längeren Perioden mit einer geringen Stromerzeugung aus Windkraft und Solarenergie. Kurze Perioden treten relativ häufig auf und entsprechen den normalen Schwankungen von Sonneneinstrahlung und Wind. Erst längere Perioden bezeichnen wir als Dunkelflaute. Lange Dunkelflauten können mehrere Tage bis hin zu ein oder zwei Wochen andauern und durchaus jedes Jahr auftreten. Extreme Dunkelflauten sind deutlich seltener und können sich über einen wesentlich längeren Zeitraum erstrecken.

2. **Lässt sich das Ausmaß von Dunkelflauten durch grenzüberschreitenden Stromaustausch verringern?** Solarenergie und Windenergie ergänzen sich gegenseitig. Die Komplementarität dieser unterschiedlichen Technologien führt dazu, dass innerhalb eines Landes die Länge einer Dunkelflaute verringert werden kann. Wenn man jetzt das untersuchte Gebiet vergrößert und zum Beispiel nicht nur auf Deutschland schaut, sondern auf ganz Europa, zeigt sich, dass diese Komplementarität zwischen Wind- und Solarenergie auch großflächig wirksam wird. Unter der Annahme eines unbegrenzten grenzüberschreitenden Stromaustauschs lassen sich die längsten Dunkelflauten, die wir in unserer Analyse gefunden haben, um über 60 Prozent verkürzen.

3. **Inwieweit ließen sich die Dunkelflauten mit Stromspeichern überbrücken?** Für die Bewältigung von kürzeren Perioden mit geringer Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie gibt es mehrere Möglichkeiten zur Überbrückung von Dunkelflauten, wie zum Beispiel den grenzüberschreitenden Stromaustausch oder die nachfrageseitige Flexibilität. Aber auch Batteriespeicher sind in der Lage, einen zeitlichen Ausgleich über kürzere Zeiträume vorzunehmen. Für extreme Dunkelflauten braucht es allerdings Technologien, die Stromüberschüsse im Sommer über mehrere Monate hinweg in den Winter hinein verschieben können. Dafür sind Langfrist-Stromspeicher besonders geeignet, weil sie diese saisonale Verschiebung von erneuerbaren Überschüssen ermöglichen.

4. **Bislang wird die Stromerzeugung vor allem durch konventionelle Kraftwerke gegen längere Dunkelflauten abgesichert. Wäre es machbar, diese fossilen Kraftwerke vollständig durch Langfrist-Stromspeicher zu ersetzen?** Bei Langfrist-Stromspeichern handelt es sich um ein Mehrkomponentensystem, das mittels Elektrolyse erneuerbare Überschüsse in grünen Wasserstoff umwandelt und bei Bedarf in Wasserstoffturbinen rückverstromt. Unsere Analyse zeigt, dass selbst ein vollständig erneuerbares europäisches Energiesystem durch den Einsatz solcher Langfrist-Stromspeicher möglich ist. In einem vollständig erneuerbaren Stromsektor liegt der Bedarf zur Bewältigung auch der extremsten Dunkelflaute, die wir in unseren Daten gefunden haben, in der Größenordnung von mehreren hundert Terawattstunden. Das ist ein einstelliger Prozentsatz der jährlichen europäischen Stromnachfrage.

5. **Wo müsste man ansetzen, um den Bedarf an Langfrist-Stromspeichern zu decken?** Derzeit haben wir kaum Langfrist-Stromspeicher im europäischen System installiert. Das große Problem bei diesen Technologien ist, dass sich Betreiber von diesen Anlagen sowohl im Hochlauf als auch im Betrieb verschiedenen Risiken ausgesetzt sehen, die eine Erlösunsicherheit mit sich bringen. Und um das zu adressieren, sollte der Staat tätig werden, indem er diese Technologien fördert und diese Erlösunsicherheit damit abdeckt.

Das Gespräch führte Erich Wittenberg.

Der Artikel ist gemäß der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 nachnutzbar: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Das vollständige Interview zum Anhören finden Sie auf **www.diw.de/interview**

DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-48-3

DIW Wochenbericht 48 2026

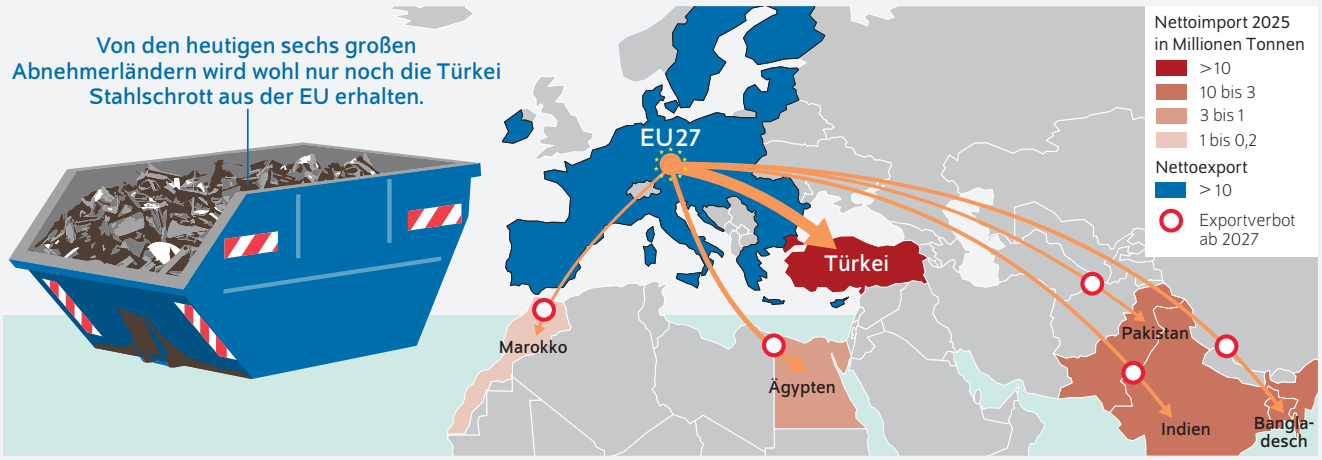
AUF EINEN BLICK

EU-Exportbeschränkungen für Stahlschrott würden globale CO_2-Emissionen nicht senken

Von Antonia Kurz

- EU will ab Mai 2027 Export von Abfällen wie Plastik und Stahlschrott in Nicht-OECD-Länder aus Umweltgründen einschränken
- Studie untersucht, welche Folgen Exportbeschränkungen und vollständiger Exportstopp bei Stahlschrott für weltweiten Handel und Emissionen von Kohlendioxid (CO_2) hätten
- Beschränkung dürfte Handel vor allem umlenken: EU würde Export in Türkei ausweiten; bisherige Abnehmer wie Indien würden aus anderen Ländern Schrott beziehen
- Auch mit einem vollständigen Exportstopp würden weltweite CO_2-Emissionen eher steigen, weil vielerorts Stahl dann emissionsintensiver hergestellt würde
- Statt Exporte zu beschränken, sollte in der EU Altschrott besser aufbereitet werden: Höhere Schrottqualität würde Transformation der Stahlindustrie voranbringen

Stahlschrott aus der EU unterliegt ab Mai 2027 Exportbeschränkungen: Nicht-OECD-Länder sollen aus Umweltgründen nur noch mit Ausnahmegenehmigung importieren dürfen



Quelle: Eurostat; eigene Darstellung.

CC BY 4.0, creativecommons.org/licenses/by/4.0

ZITAT

*„Wenn Altschrott in der EU besser sortiert und aufbereitet würde, könnte er hierzulande zu qualitativ besserem Stahl wiederverarbeitet werden. Das würde den Umstieg von kohlebasierten Hochöfen auf emissionsarme Elektrolichtbogenöfen erleichtern, was zielführender wäre als Exportbeschränkungen und ein wichtiger Schritt hin zu klimafreundlichem Stahl.“ — **Antonia Kurz** —*

FAKTEN

Knapp **16 Millionen Tonnen** Stahlschrott hat die EU im Jahr 2025 exportiert. Davon gingen zwei Drittel in die Türkei.

EU-Exportbeschränkungen für Stahlschrott würden globale CO_2-Emissionen nicht senken

Von Antonia Kurz

ABSTRACT

Europas Stahlwerke wollen Stahlschrott stärker in der EU halten, um sich unabhängiger von Stahlimporten zu machen sowie wettbewerbsfähiger und klimafreundlicher zu werden. Ab Mai 2027 tritt in der EU eine neue Umweltregel in Kraft, die Schrottexporte nur noch in bestimmte Nicht-OECD-Länder erlaubt. Wird das der hiesigen Industrie helfen? Von den derzeit wichtigsten Abnehmern für EU-Stahlschrott bleibt nur die Türkei übrig. Diese Exportbeschränkung dürfte den Schrotthandel aber größtenteils umlenken: Die EU wird wohl mehr Schrott in die Türkei liefern, und Länder wie Indien würden den Schrott von anderen Exporteuren wie den USA erhalten. Die Klimawirkung wäre gering. Gäbe es einen vollständigen EU-Exportstopp, würde dies die globalen Emissionen um geschätzt 16 Millionen Tonnen CO_2 im ersten Jahr erhöhen: Die bisherigen Abnehmer würden mehr Stahl aus Eisenerz als aus Schrott herstellen; die EU könnte den zusätzlichen Schrott nur begrenzt verwerten. Wenn dadurch der Schrottpreis in der EU sänke, könnte dies zu Anstrengungen führen, ungenutzten Schrott besser aufzubereiten. Dies würde nicht nur der hiesigen Wirtschaft nützen, sondern auch die Emissionen senken. Wirksamer als Exportbeschränkungen wäre also die Förderung von Investitionen in bessere Aufbereitung des Schrotts für emissionsärmere Technologien.

Auf dem Weg zur Klimaneutralität spielen die Treibhausgasemissionen der Industrie eine enorme Rolle. Die Stahlerzeugung ist einer der größten Emittenten von Kohlendioxid (CO_2): In der Europäischen Union (EU) verursacht sie direkt rund fünf Prozent der Treibhausgasemissionen und mehr als ein Viertel der Industrieemissionen.[1] Zugleich ist sie für viele Industriezweige von zentraler ökonomischer Bedeutung. Um die Klimaziele zu erreichen, befindet sie sich gerade in einer Transformationsphase und steht gleichzeitig unter hohem Wettbewerbsdruck, da hiesiger Stahl teuer ist. Stahl wird vor allem für Produkte wie Autos und Haushaltsgeräte benötigt, aber auch für die Produktion von Stahlträgern für den Bau. Im Jahr 2025 erzeugte die Stahlindustrie in der EU rund 126 Millionen Tonnen Rohstahl; 2008 waren es allerdings noch rund 185 Millionen Tonnen.[2]

Von zunehmender Bedeutung ist bei der Herstellung auch die Verwendung des anfallenden Schrotts. Da bisher nur ein Teil des Schrotts wieder zu hochwertigem Stahl verarbeitet werden kann (Kasten 1), wird viel Schrott aus der EU exportiert, vorwiegend in die Türkei, aber auch in andere Schwellenländer wie Indien und Ägypten. Mit der Modernisierung der Stahlindustrie könnte der Bedarf nach Schrott in der EU künftig steigen.[3]

Die EU hat bereits eine Initiative auf den Weg gebracht, die ab Mai 2027 die Anzahl der Nicht-OECD-Staaten, die noch Abfall- und Schrottexporte aus der EU erhalten dürfen, anhand einer Länderliste begrenzt.[4] Die Stahlindustrie

1 Vgl. Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (JRC) (2026): Mapping the transition of the EU steel industry to carbon neutrality. Science for Policy Brief, JRC144070, 1 (online verfügbar, abgerufen am 3. November 2026. Dies gilt für alle Onlinequellen in diesem Bericht, sofern nicht anders vermerkt).

2 World Steel Association (2026): World Steel in Figures 2026, 6 (online verfügbar); für 2008: Steel Statistical Yearbook 2017, 5; EUROFER (2026): European Steel in Figures 2026 (online verfügbar).

3 Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (2026): Verfügbarkeit von Stahlschrott in Europa langfristig sichern. Positionspapier, September 2026 (online verfügbar); EUROFER (2023): Missed opportunities in securing EU scrap supply risk delaying industrial decarbonisation. Pressemitteilung vom 13. Dezember (online verfügbar).

4 EU-Verordnung 2024/1157 (online verfügbar); Europäische Kommission (2026): List of non-OECD countries authorised to import certain non-hazardous waste from the EU. Initiative 14861 (online verfügbar).

DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-48-4

fordert darüber hinaus weitergehende Beschränkungen, etwa Exportzölle auf Stahlschrott oder strengere Regeln auch für Ausfuhren in OECD-Länder, um mehr Schrott in der EU verfügbar zu haben.[5]

Dieser Bericht ordnet die Debatte in drei Schritten ein. Welche Bedeutung hat Schrott, und warum exportiert die EU ihn? Welche Gründe werden für Beschränkungen genannt? Und erreichen die geplante Länderliste und, als Extremfall, ein vollständiger Exportstopp die damit verbundenen Ziele wie die Reduktion der CO_2-Emissionen?

Qualität des Schrotts entscheidet über den Einsatz

Wofür sich Stahlschrott zur Weiterverarbeitung eignet, hängt von seiner Verunreinigung mit anderen Metallen ab: Verunreinigungen machen den Stahl schon in kleinen Mengen rissanfällig; Roheisen ist praktisch frei davon. Als Maßstab dient meist der Kupferanteil. Neuschrott (zum Beispiel Stanzreste aus der Weiterverarbeitung) ist rein, Altschrott aus Autos oder Gebäuden enthält dagegen höhere Anteile an Kupfer, etwa aus Elektromotoren oder Kabeln. Solche Verunreinigungen lassen sich beim Einschmelzen nicht entfernen, sondern nur verdünnen.[6]

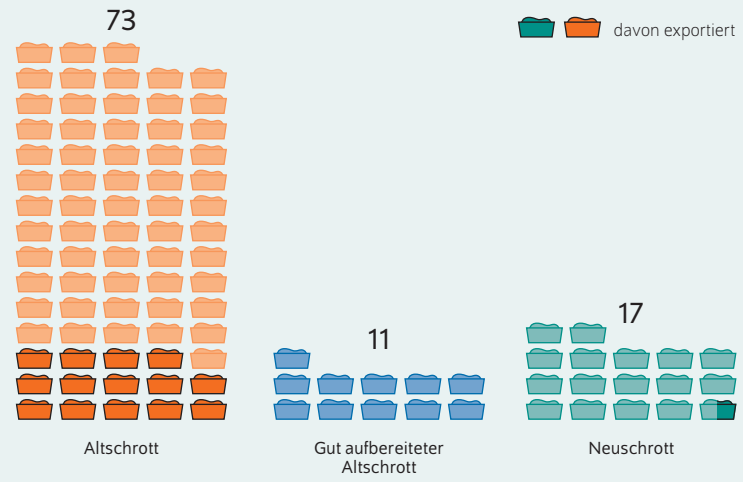
Neuschrott kann für Flachstahl, der beispielsweise für Bleche in der Autoindustrie verwendet wird, eingesetzt werden. Altschrott eignet sich hingegen nur für Produkte wie Betonstahl; andernfalls muss er im Konverter mit Roheisen verdünnt werden (Kasten 1). Die EU exportiert fast nur Altschrott, den ihre eigene Flachstahlindustrie nicht verwenden kann. Das macht ungefähr ein Fünftel des gesamten Altschrotts aus (Abbildung 1). Bessere Aufbereitung – etwa sortenreine Sammlung und sensorgestützte Sortierung – könnten mehr Schrott besser wiederverwertbar machen; bisher lohnt sich das allerdings kaum.

Zwei Drittel der EU-Schrottexporte werden in die Türkei exportiert

Schrott ist weltweit knapp und fürs Klima wertvoll: Deswegen wird aller Schrott wieder eingeschmolzen, was fossile Energie, Eisenerz und CO_2-Emissionen spart.[7] Wie Schrott in der Welt gehandelt wird, erklärt sich aus dem historischen Vorsprung der Industrieländer. Europa hat früh viel Stahl in Gebäuden, Brücken und Maschinen verbaut und dabei

Abbildung 1

EU-Aufkommen und -Exporte von Stahlschrott nach Qualität im Jahr 2024
In Millionen Tonnen



Quellen: Eurostat (Comext); Schätzungen der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU-Kommission (JRC).

CC BY 4.0

Die EU exportiert rund 20 Prozent ihres Altschrotts und kaum Neuschrott.

in Hochöfen viel CO_2 ausgestoßen.[8] Dieser Stahlbestand ist heute die größte Quelle für Schrott in der EU (Abbildung 2).

Länder, die sich später industrialisiert haben, besitzen dagegen bisher einen niedrigeren Bestand an Stahl und haben jährlich weniger anfallenden Schrott. Er wird daher hauptsächlich von Ländern mit langjährigen Stahlbeständen in diejenigen Länder verschifft, die wenig eigenen Schrott haben. Gerade schnell wachsende Schwellenländer brauchen diesen Schrott zur Herstellung von Stahl, insbesondere für Stahlanteile im Hoch- und Tiefbau. Im Jahr 2025 exportierte die EU knapp 16 Millionen Tonnen, die USA rund zwölf Millionen Tonnen.[9] Größter Importeur weltweit ist die Türkei mit knapp 19 Millionen Tonnen, an zweiter Stelle folgt Indien mit rund neun Millionen Tonnen.

Der wichtigste bilaterale Strom geht von der EU in die Türkei, im Jahr 2025 rund zehn Millionen Tonnen Schrott (Abbildung 3). Das entspricht knapp zwei Dritteln der EU-Schrottexporte. Grund ist der kurze Transportweg, meist per Schiff, und die Tatsache, dass die Türkei ihre Stahlindustrie auf Elektrolichtbogenöfen aufgebaut hat; davon haben bisher beide Seiten profitiert. In der EU blieben die Hochöfen in Betrieb; der Schrott, den diese aus technischen Gründen nicht verarbeiten konnten, ging in den Export. Die Türkei baute dagegen vor allem kostengünstigere Elektrolichtbogenöfen, die

5 Vgl. EUROFER (2022): Stop waste and scrap export to countries not meeting EU environmental and social standards. Pressemitteilung vom 11. Mai (online verfügbar); Wirtschaftsvereinigung Stahl (2026), a. a. O. Zur Gegenposition der Recyclingwirtschaft: Karin Gollan (2025): Gutachten zu einer EU-weiten Beschränkung des Schrottexports in Drittländer, im Auftrag von BDSV, VDM und bvse (online verfügbar); Argus (2026): German associations challenge EU scrap export limits, 23. Oktober (online verfügbar).

6 Verunreinigungen lassen sich nur vorher entfernen, etwa indem Kabel und Elektromotoren vor dem Schreddern ausgebaut oder Kupferteile aus dem Schredderschrott aussortiert werden. Das geschieht bisher kaum, weil sauberer Schrott am Markt nur wenig mehr erzielt als verunreinigter.

7 Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (2020): Iron and Steel Technology Roadmap. Paris (online verfügbar).

8 Peng Wang et al. (2021): Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. Nature Communications 12, 2066 (online verfügbar).

9 Für die EU: Eurostat (Comext), Exporte außerhalb der EU, 2025. Für die USA, die Türkei und Indien: UN Comtrade, HS 7204, 2025.

Kasten 1

Wie Stahl hergestellt wird

Die Stahlproduktion lässt sich hauptsächlich in zwei Herstellungsverfahren aufteilen (Abbildung). In der Hochofenroute wird Eisenerz mit Kokskohle im Hochofen zu Roheisen reduziert und im Konverter mit Sauerstoff zu Stahl gemacht. Dabei können 15 bis 25 Prozent Schrott beigemischt werden. Die Hochofenroute liefert vor allem Flachstahl (flache Produkte), also zum Beispiel Bleche für Autos, Haushaltsgeräte und Verpackungen. Diese Produkte brauchen eine hohe Qualität und Reinheit des Stahls.

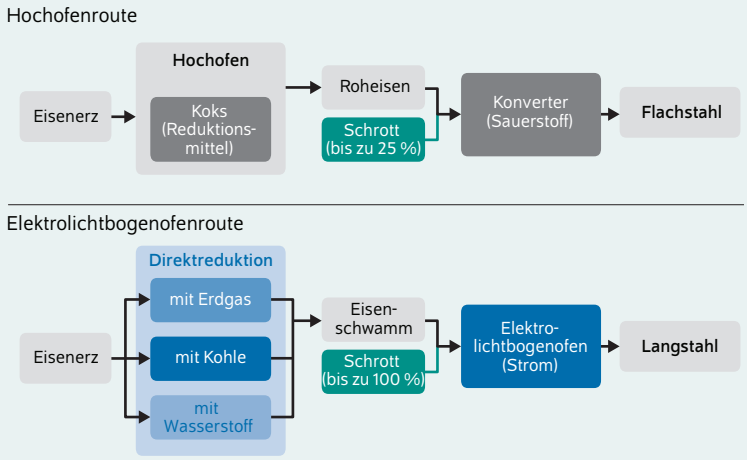
Das zweite Herstellungsverfahren ist die Elektrolichtbogenofenroute. Dabei wird Schrott oder Eisen aus Direktreduktion mit Stromeinsatz eingeschmolzen, in der Regel in einem Elektrolichtbogenofen. Bei der Direktreduktion wird Eisenerz ohne Hochofen mit Erdgas, Kohle oder Wasserstoff zu festem Eisen (Eisenschwamm) reduziert. Der Elektrolichtbogenofen liefert vor allem Langstahl (lange Produkte) wie Betonstahl, Träger und Draht für den Bau; diese Produkte vertragen mehr Verunreinigungen durch Schrott.

Auch die CO_2-Emissionen der Herstellungsprozesse unterscheiden sich stark: Eine Tonne Stahl aus Schrott, die im Elektrolichtbogenofen hergestellt wird, verursacht nur einen Bruchteil der CO_2-Emissionen aus dem kohlebefeuerten Hochofen (Abbildung 6). Mehr als mit der Schrottverwendung emittiert ein Elektrostahlwerk, wenn es Stahl mit Eisen aus Direktreduktion herstellt, aber meist immer noch weniger als eine Hochofen-Produktion: Wird die Direktreduktion mit Erdgas vorgenommen, wird rund ein Fünftel bis die Hälfte weniger CO_2 als im Hochofen mit Koks emittiert; mit Kohle in der Direktreduktion entsteht sogar in Ländern mit CO_2-intensivem Strommix mehr CO_2 als im Hochofen. Am klimafreundlichsten ohne Schrott ist das Verfahren, wenn Wasserstoff aus erneuerbarem Strom in der Direktreduktion und danach im Elektrolichtbogenofen mit erneuerbarem Strom eingesetzt wird.

Um bei begrenztem Schrottangebot die Emissionen bei der Stahlerzeugung weltweit deutlich zu reduzieren, wäre eine Produktion aus Direktreduktion mit Wasserstoff am sinnvollsten. Bisher geschieht das in der EU und im Ausland aber nur in Pilotanlagen. Sein Hochlauf steht noch am Anfang wäre aber ein wichtiger Hebel für klimaneutrale Stahlproduktion.[1]

Abbildung

Zwei Wege zum Stahl
Vereinfachte Darstellung der beiden wichtigsten Herstellungsverfahren



Quelle: Eigene Darstellung.

CC BY 4.0

Die Hochofenroute liefert vor allem hochwertigen Flachstahl, zum Beispiel für die Autoindustrie, die Elektrolichtbogenofenroute vor allem Langstahl für den Bau.

1 Vgl. Global Energy Monitor: Global Iron and Steel Tracker (Juni 2026) (online verfügbar); Adrian Odenweller und Falko Ueckerdt (2025): The green hydrogen ambition and implementation gap. Nature Energy 10, 110–123 (online verfügbar). Damit grüner Stahl produziert wird, braucht es verlässliche Rahmenbedingungen neben gezielter Förderung, etwa über Klimaschutzverträge, vgl. Karsten Neuhoff et al. (2021): Green Deal für die Industrie: Wichtiger als Förderung sind klare Rahmenbedingungen. DIW Wochenbericht Nr. 10, 153–162 (online verfügbar). Vgl. Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2026), a. a. O., 3.

importierten Altschrott zu Stahl für den Bauboom der vergangenen Jahre verarbeiteten. Die EU plant, ihre Hochöfen aber zunehmend durch neue Elektrolichtbogenöfen zu ersetzen, wodurch der Bedarf nach Schrott steigen dürfte. Gleichzeitig wächst in den Abnehmerländern mit dem dortigen Stahlbestand auch das eigene Schrottangebot.[10] Daher dürften die Exporte der EU in diese Länder in den nächsten Jahrzehnten deutlich abnehmen (Abbildung 2).[11]

Stahlschrottexporte sollen aus Umweltgründen beschränkt werden

Aus Umweltgründen dürfen ab dem 21. Mai 2027 auch ungefährliche Abfälle wie Stahlschrott nur noch in Nicht-OECD-Länder ausgeführt werden, wenn diese auf einer Liste der EU-Kommission stehen. Diese sogenannte Länderliste wird noch bis Ende des Jahres finalisiert.

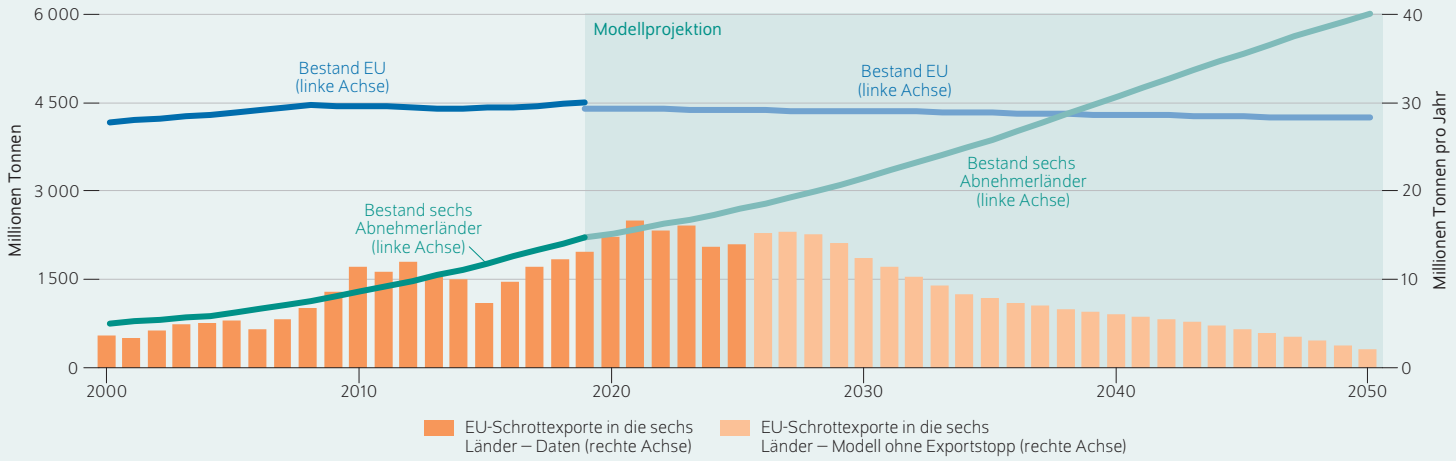
Die EU-Initiative hat gute Gründe: Abfälle sollen nicht dort landen, wo sie nicht sachgerecht behandelt werden; Kunststoffabfälle dürfen vorerst gar nicht mehr in

10 Daten zum Stahlbestand vgl. Kun Sun et al. (2025): A global dataset for steel aluminum and cement in-use stocks at 500 m gridded level 2000–2019. Scientific Data 12, 1560 (online verfügbar). Zu Exportmengen vgl. Eurostat, Comext-Datenbank, HS 7204 (Eisen- und Stahlschrott).

11 Wie viel Schrott die EU dann insgesamt exportiert, hängt auch von weiteren Ländern ab, etwa in Afrika, die ihre Infrastruktur ausbauen.

Abbildung 2

EU-Stahlbestand und Schrottexporte in die sechs wichtigsten Abnehmerländer
Stahl im Gebrauch (linke Achse) und Schrottexporte (rechte Achse) in Millionen Tonnen



Anmerkung: Stahl im Gebrauch (Daten bis 2019) und Exporte (Daten bis 2025); die wichtigsten Abnehmerländer sind Türkei, Ägypten, Marokko, Pakistan, Bangladesch, Indien. Für die Projektion von 2026 bis 2050 wird ein Szenario mit derzeit geltender EU-Klimapolitik unterstellt.

Quellen: Eigene Berechnungen auf Basis von Eurostat-Daten und Kun Sun et al. (2025): A global dataset for steel aluminum and cement in-use stocks at 500 m gridded level 2000–2019.

CC BY 4.0

Europas Schrottpotenzial ist und bleibt groß. In den größten Abnehmerländern wird der Bestand bis zum Jahr 2050 dagegen deutlich wachsen.

Nicht-OECD-Länder gebracht werden.[12] Metallabfälle sollen im Zielland unter Bedingungen verarbeitet werden, die denen der EU für Umwelt und Gesundheit entsprechen.

Im Entwurf der Länderliste vom September 2026 stehen für Stahlschrott nur fünf Nicht-OECD-Länder, allesamt Nachbarn und EU-Beitrittskandidaten: Moldau, Montenegro, Nordmazedonien, Serbien und die Ukraine.[13] Von den derzeit sechs größten Abnehmern bleibt damit nur die Türkei offen, die als OECD-Mitglied nicht von der EU-Verordnung betroffen ist; die anderen fünf großen Abnehmer Ägypten, Bangladesch, Indien, Marokko und Pakistan hingegen sind für Exporte von Metall nicht zugelassen (Abbildung 3). Von dem Verbot betroffen ist damit aber nur gut ein Viertel der EU-Exporte von Stahlschrott.[14]

Die Konsultation der EU-Kommission zum Entwurf der Länderliste macht deutlich, wie weit die Positionen auseinandergehen. In den 161 Stellungnahmen lehnen die Recycler in der EU, die die Metallabfälle sortieren und aufbereiten, und die Importländer die Liste ab; Stahlhütten befürworten sie.[15] In der Debatte fordert die Stahlindustrie sogar darüber hinausgehende Beschränkungen und begründet dies vor allem mit der Versorgungssicherheit.[16] Neue Elektrolichtbogenöfen sollen in der EU vor allem Hochöfen ablösen, wodurch der Schrottbedarf der EU steigen dürfte. Mit mehr Schrott könnte die EU zudem mehr Stahl selbst herstellen, statt ihn zu importieren. 2025 importierte die EU knapp 42 Millionen Tonnen Stahl, das meiste davon fertige Erzeugnisse. Inwieweit der bisher exportierte Schrott einen Teil dieses Bedarfs decken kann, hängt vom Produktmix ab.

Die Stahlindustrie führt außerdem die Klimaziele an: Mehr Schrottverarbeitung in der EU soll teilweise die Stahlproduktion mit Eisen aus Erz ersetzen, was die CO_2-Emissionen reduzieren könnte. Ein gesicherter Zugang zu Schrott könnte zudem gegebenenfalls Wettbewerbsvorteile gegenüber Stahlimporten bringen, vor allem über einen niedrigeren Schrottpreis.

Schrott auf dem Weltmarkt: Die neue Länderliste dürfte ihn vor allem umlenken

Schrott ist innerhalb seiner jeweiligen Qualitätskategorie ein weitgehend homogenes Gut, bei dem es keinen Unterschied macht, aus welchem Land er kommt. Dadurch bewegen sich die Preise, beispielsweise für deutschen Schrott und türkischen Importschrott, aber auch für US-Schrott, im Gleichschritt (Abbildung 4). Das Angebot reagiert kaum auf den Preis; es hängt davon ab, wie viel Stahl aus dem Bestand ausscheidet, beziehungsweise für Neuschrott aus

12 Vgl. Website der Europäischen Kommission: Plastic waste shipments (online verfügbar).

13 Europäische Kommission (2026), a. a. O., Anhang; das Begleitdokument nennt für Montenegro nur Aluminium.

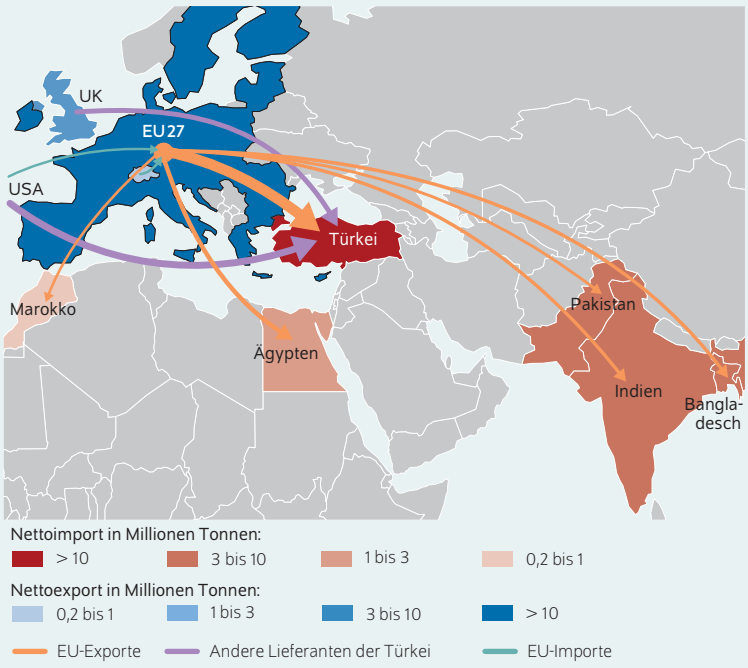
14 Eigene Berechnung auf Basis von Eurostat-Daten. Seit Juli 2025 überwacht die Europäische Kommission zudem die Ein- und Ausfuhren von Metallschrott über die Zollbehörden. Vgl. Europäische Kommission (2025): Commission introduces surveillance of imports and exports of metal scrap, 23. Juli (online verfügbar).

15 Vgl. Europäische Kommission (2026), a. a. O.

16 Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (2026), a. a. O.; EUROFER (2023), a. a. O.

Abbildung 3

Stahlschrotthandel der EU in die wichtigsten Abnehmerländer im Jahr 2025
In Millionen Tonnen



Anmerkung: Die Daten für Indien stammen aus dem Jahr 2024.

Quellen: Eurostat (Comext); UN Comtrade.

CC BY 4.0

Gut zwei Drittel der EU-Schrottexporte gehen in die Türkei, die von den EU-Exportbeschränkungen nicht betroffen sein wird.

Produktionsabfällen, wie viel Stahl produziert wird. Qualität wird kaum belohnt: Sauberer Neuschrott kostet nur wenig mehr als verunreinigter Altschrott. Das erklärt, warum sich bessere Aufbereitung bisher selten lohnt.

Weil das Angebot kaum auf den Preis reagiert und zum Weltmarktpreis stets Abnehmer findet, dürfte mit der Länderliste der EU-Kommission der EU-Schrott vor allem umgelenkt werden: Die EU wird dann mehr in die Türkei exportieren, die dafür weniger in den USA, im Vereinigten Königreich und in Russland kauft; diese Lieferanten könnten stattdessen die für EU-Exporte gesperrten Märkte beliefern. Am Ende könnte weltweit fast dieselbe Menge Schrott in fast denselben Öfen eingesetzt werden, ohne dass sich der EU-Preis stark ändert. Erst ein umfassender Exportstopp würde Schrott tatsächlich in der EU halten. Vorgesehen ist ein solcher Stopp nicht, und handelsrechtlich auch kritisch; er dient in der Modellierung als Extremfall.[17]

Kasten 2

Das Handelsmodell in Kürze

Das Modell bildet die EU einerseits und ihre sechs größten Schrottabnehmer andererseits als zwei Regionen ab, die Schrott und Stahl miteinander handeln. Die sechs Abnehmer sind die Türkei, Indien, Ägypten, Pakistan, Bangladesch und Marokko. In beiden Regionen gibt es sowohl Stahlwerke mit Hochofen als auch mit Elektrolichtbogenofen, die zwischen Schrott und Eisen aus Erz als Input entscheiden; neue Anlagen planen sie vorausschauend. Kurzfristig können bestehende Anlagen nur ihre Auslastung ändern. Haushalte im Modell konsumieren jedes Jahr Stahl, was den Bestand beeinflusst. Von diesem Stahlbestand fällt regelmäßig Abfall an, der dann von Recyclern als Schrott aufbereitet wird: Das jährliche Schrottangebot wächst daher mit dem Stahlbestand, die Sammlung/Aufbereitung von Schrott reagiert leicht auf den Preis.

Das Modell ist auf das Jahr 2019 kalibriert. Dafür werden Produktion, Handel und Preise der Jahre 2017 bis 2021 gemittelt. Von dort rechnet das Modell Jahr für Jahr weiter und folgt bis 2026 den tatsächlichen Preisen. Das Basisszenario enthält die geltende Klimapolitik der EU mit realem CO_2-Preis auf dem Niveau von 2026 und dem CO_2-Grenzausgleich. Dieses Basisszenario wird mit einem Szenario verglichen, in dem es in der EU ab dem Jahr 2027 einen Exportstopp für Schrott gibt. Für Eisenerz und Schrott wird eine unvollständige Substituierbarkeit angenommen.[1] Qualitätsunterschiede für Schrott werden nicht unterschieden, und eine bessere Aufbereitung wird daher nicht abgebildet. Im Modell können Stahlhersteller auch Schrott pro Tonne Stahl sparen, indem sie entweder mehr Eisenschwamm im Elektrolichtbogenofen verwenden oder komplett auf das Verfahren mit Hochofen und Konverter umsteigen. Mit Hilfe dieses Modells wird untersucht, welche Auswirkungen ein Exportstopp auf Angebot, Nachfrage, Preise und CO_2-Emissionen hat. Der Handel mit dem Rest der Welt, etwa Stahlimporte aus China, wird nicht im gleichen Detail modelliert, sondern auf dem Niveau der Daten gehalten. Nur Schrottlieferungen, zum Beispiel der USA an die Türkei, können leicht bei höherem Preis ansteigen; deren Emissionen werden aber nicht mit berechnet.

1 Das Modell bildet die Produktion über konstante Substitutionselastizitäten (CES) zwischen Produkten, Routen und Einsatzstoffen ab.

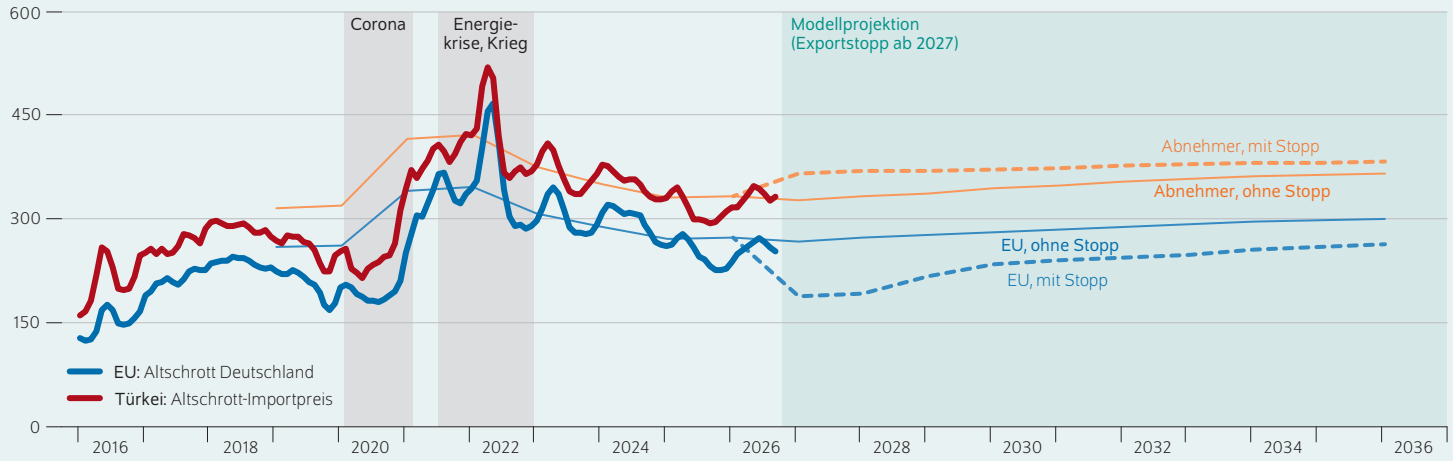
Klima: Entscheidend ist, wo der exportierte Schrott landet

Jede Tonne Schrott, die die EU zurückhält, nimmt einen von drei Wegen: Sie wird in ein anderes Land umgelenkt, sie ersetzt in der EU importierten Stahl oder sie ersetzt Eisen in einem der beiden Herstellungsverfahren (Kasten 1). Fehlt der Schrott aus der EU dem bisherigen Abnehmer, ersetzt er ihn durch Eisen aus Erz, greift auf einen anderen Anbieter zurück oder reduziert die Produktionsmenge an Stahl (Abbildung 5).

17 Exportverbote widersprechen grundsätzlich den Regeln der Welthandelsorganisation (WTO), insbesondere Art. XI GATT. Die Länderliste stützt sich dagegen auf den Umweltschutz (Art. XX GATT).

Abbildung 4

Preise für Altschrott in der EU und der Türkei mit Modellprojektion bis 2036
Euro je Tonne; Daten monatlich (2016–2026), Modell jährlich (2019–2036)



Anmerkung: EU: Lagerverkaufspreis für Altschrott aus Deutschland; Türkei: Importpreis von Altschrott frei Hafen (in Euro umgerechnet); gleitender Dreimonatsdurchschnitt. Modell: Handelsmodell (Kasten 2), ohne und mit vollständigem Exportstopp ab 2027; das Modell rechnet die Fracht als Aufschlag von 22 Prozent auf den EU-Preis, das entspricht etwa der beobachteten Exportparität (59 Euro je Tonne).

Quellen: Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV); Bloomberg; Europäische Zentralbank; eigene Berechnungen.

CC BY 4.0

Schrott folgt der Stahlnachfrage; ein Exportstopp würde die Preise für Schrott im ersten Jahr um 30 Prozent sinken lassen.

Wie sich die CO_2-Emissionen global durch eine Exportbeschränkung ändern, hängt davon ab, wie viele Emissionen eine Tonne Schrott bisher in den Importländern vermieden hat. Am meisten ist es in Indien: Der bisher importierte Schrott hat vor allem die emissionsintensive Herstellung von Eisenschwamm aus Direktreduktion mit Kohle verdrängt und damit wohl rund 2,1 Tonnen CO_2 pro Tonne Schrott vermieden. In der Türkei hat der Schrottimport knapp 1,4 Tonnen CO_2 pro Tonne Schrott vermieden, wenn er Hochofenstahl ersetzt hat, und knapp unter einer Tonne CO_2, wenn stattdessen Eisen aus Gas-Direktreduktion verwendet wurde.[18] Greifen diese Länder mangels EU-Schrott wieder auf andere Verfahren zurück, könnte dies die Emissionen entsprechend erhöhen – sofern sie nicht auf Schrott aus Nicht-EU-Ländern zurückgreifen.

Auf Seiten der EU ließen sich dagegen durch Exportbeschränkungen nur wenige Emissionen vermeiden. Europäische Elektrostahlwerke für Betonstahl schmelzen ohnehin schon fast nur Schrott ein. Dort würde zusätzlicher Schrott kaum Eisen aus Erz ersetzen. Mehr Schrott könnte hier höchstens mehr Produktion von Betonstahl in der EU ermöglichen. Dies würde zumindest einige Betonstahl-Importe verdrängen. Viele CO_2-Emissionen sparte das aber nicht: Mehr als ein Drittel dieser Importe kommt aus der Türkei, die Betonstahl ebenfalls mit Schrott in Elektrolichtbogenöfen verarbeitet.

Mehr CO_2-Emissionen würde in der EU nur sauberer Neuschrott vermeiden, der zu hochwertigem Flachstahl verarbeitet werden kann. Theoretisch könnten auch hier noch rund 1,6 Tonnen CO_2 bei der Verarbeitung im Konverter, in dem Roheisen aus dem Hochofen zu Stahl verarbeitet wird, vermieden werden. Der bisher exportierte Altschrott ist für die Herstellung von Flachstahl allerdings zu stark verunreinigt.

Wenn die Einführung der Länderliste also vor allem Schrottflüsse umlenkt, bliebe ihre globale Klimawirkung gering. Dabei schließt die Länderliste auch Ziele aus, an denen Schrott rechnerisch besonders viel CO_2 vermeiden könnte, also zum Beispiel Indien mit seinen emissionsintensiven Verfahren mit Kohle (Abbildung 6).

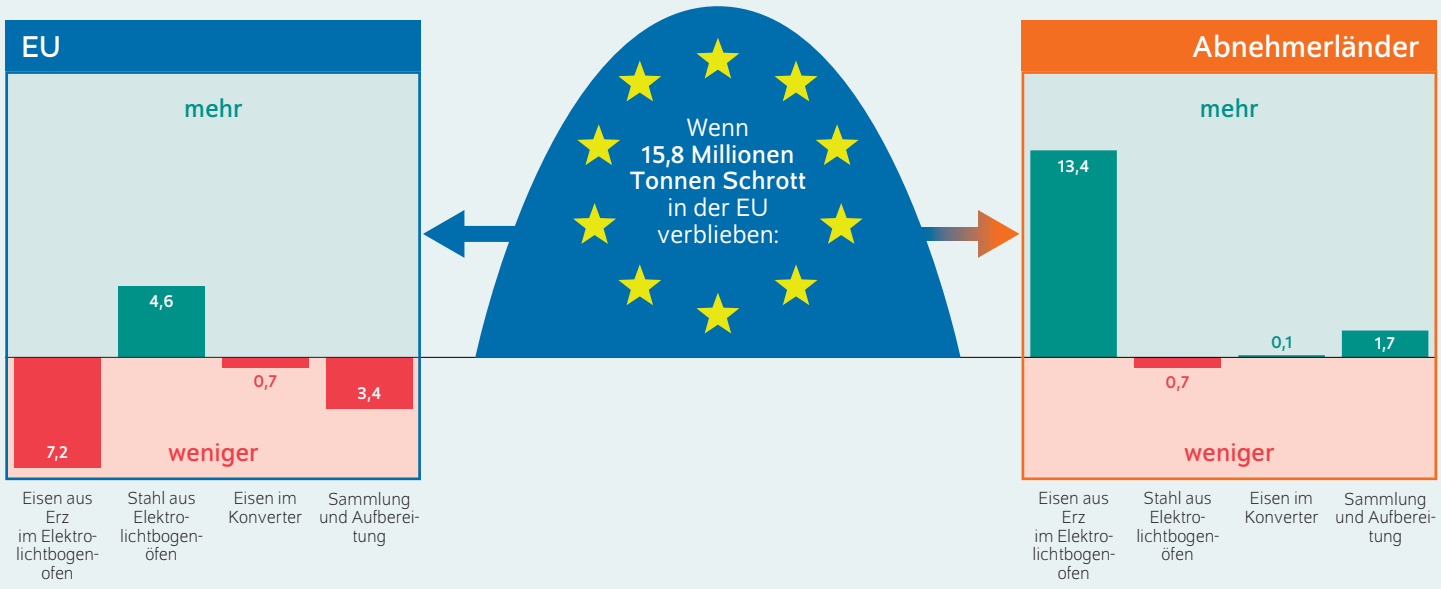
Bei vollständigem Exportstopp würden Emissionen deutlich steigen

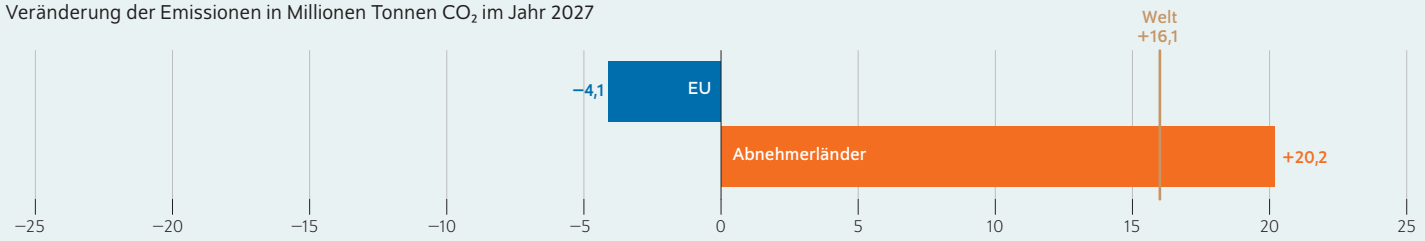
Bei einem vollständigen Stopp von EU-Schrottexporten würden die CO_2-Emissionen noch stärker steigen. Die genaue Wirkung hängt davon ab, wie viel Schrott in der EU genutzt werden kann. Bei unveränderter Qualität kann der bisher exportierte Altschrott vor allem Importe von langen Produkten für den Bau wie Betonstahl ersetzen. Anspruchsvollere lange Produkte wie Walzdraht und Profile sowie flache

18 Dies ist eine Obergrenze und unterstellt, dass jede Tonne Schrott die Herstellung von Eisen aus Erz verdrängt. Berechnet als Emissionen je Tonne Stahl der ersetzten Route (ohne Elektrolichtbogenofen mit 100 Prozent Schrott), geteilt durch 1,1 Tonnen Schrott je Tonne Stahl (Verluste beim Einschmelzen). Vgl. auch Ali Hasanbeigi (2025): Steel Climate Impact 2025: An International Benchmarking of Energy and GHG Intensities. Global Efficiency Intelligence (online verfügbar); Avijit Nayak, Niranjan Nayak und Binod Kumar Sahu (2027): Short-term emission pathways in India's iron and steel sector: A hybrid framework combining quantitative methods and bottom-up modelling. Environmental Pollution and Management 4, 1–13 (online verfügbar); World Steel Association (2026): Sustainability Indicators 2025 (online verfügbar). Die Transportemissionen ändern daran wenig.

Abbildung 5

Klimawirkung eines vollständigen EU-Exportstopps
Veränderung des Schrotteinsatzes in Millionen Tonnen und der Emissionen in Millionen Tonnen CO_2 im Jahr 2027, mit Exportstopp im Vergleich zu ohne Exportstopp





Anmerkungen: Nur CO_2 aus Produktion und Strom (Scope 1+2).

Quelle: Eigene Berechnungen.

CC BY 4.0

Ein vollständiger Exportstopp für Schrott würde die weltweiten Emissionen erhöhen, da der fehlende Schrott im Ausland emissionsintensiver ersetzt werden müsste.

Produkte etwa für die Autoindustrie vertragen die Verunreinigungen in den meisten Schrottqualitäten dagegen nicht so gut.

Hierfür wird der wenige Neuschrott verwendet, der bisher schon nicht exportiert wurde. Im Konverter lässt sich daher kaum mehr Schrott einsetzen. Im Handelsmodell fänden gut drei Viertel des in der EU zurückgehaltenen Schrotts Verwendung, der Rest bliebe potenziell ungenutzt (Kasten 2). Die Emissionen in der EU könnten im Szenario mit einem vollständigen Exportstopp im ersten Jahr um rund vier Millionen Tonnen sinken (Abbildung 5). Bei einer vollständigen Nutzung des Schrotts würden die Emissionen weitaus stärker zurückgehen.

Auf Seiten der bisherigen Importländer stiegen die Emissionen nach den Modellberechnungen um rund 20 Millionen Tonnen CO_2 im Jahr, da sie den fehlenden Schrott vor allem durch Eisen aus Erz ersetzen würden. Besonders in diesem Extremszenario mit einem vollständigen EU-Exportverbot für Schrott dürften die Emissionen weltweit steigen, um rund 16 Millionen Tonnen CO_2 im ersten Jahr (Abbildung 5).

Ungenutzter Schrott könnte allerdings die Anstrengungen verstärken, ihn in der EU besser aufzubereiten.[19] Erst wenn bessere Aufbereitung einen höheren Anteil des Schrotts für flache Produkte verwertbar machte, nähme die Stahlindustrie auch langfristig mehr Schrott auf. Der Hebel zur besseren Schrottnutzung in der EU ist die Aufbereitung, nicht der Exportstopp.

19 Billiger Altschrott könnte es zwar lohnend machen, ihn aufzubereiten und in der Flachstahlerzeugung einzusetzen; niedrigere Erlöse der Recycler könnten aber auch Investitionen in bessere Aufbereitung verhindern.

Preise bewegen sich nur bei einem vollständigen EU-Exportstopp

Dass die Aufbereitung in der EU bisher nicht vorangetrieben wird, liegt vor allem daran, dass qualitativ hochwertiger Schrott zwar knapper, aber nicht wesentlich teurer als verunreinigter Altschrott ist: Dadurch lohnt sich die Aufbereitung des verunreinigten Altschrotts kaum. Auch die Länderliste wird den EU-Schrottpreis voraussichtlich kaum bewegen, solange der Weg in die Türkei offenbleibt. Ein vollständiger EU-Exportstopp könnte hingegen den Schrottpreis vom Weltmarktpreis entkoppeln: In den Modellrechnungen fiele er in der EU im ersten Jahr um rund 30 Prozent, im Ausland stiege er (Abbildung 4). Vor allem dieser Preiseffekt könnte den EU-Stahlwerken einen Kostenvorteil bringen. Insbesondere die Herstellung von Langstahl mit einem hohen Anteil an Altschrott würde davon profitieren. Im Modell steigt die EU-Stahlproduktion daher leicht, unter anderem, weil sie bisherige Importe verdrängt (Abbildung 5).

Was die Stahlwerke beim Rohstoff sparten, verlören die Recycler: Bei einem niedrigeren Schrottpreis sänken ihre Erlöse für die ganze Inlandsmenge, nicht nur beim Export.

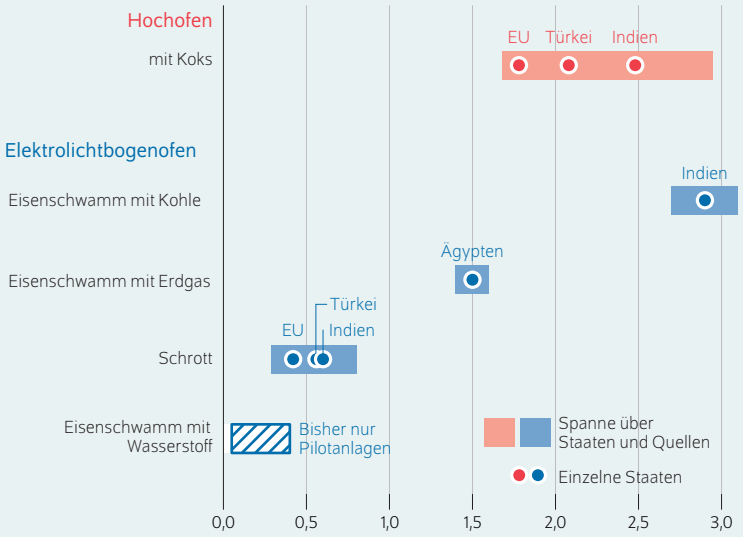
Fazit: Bessere Aufbereitung statt Exportbeschränkungen

Schrott ist weltweit knapp und fürs Klima wertvoll. Wer ihn zurückhält, verschiebt Emissionen, dürfte sie aber kaum senken. Die EU-Länderliste ab Mai 2027 schränkt den Export von Stahlschrott an die meisten Nicht-OECD-Länder aus Umweltgründen ein. Als Exportbeschränkung dürfte sie allerdings wenig bewirken, weil sie Schrott voraussichtlich vor allem umlenkt; an Preis und Versorgung in der EU dürfte sich kaum etwas ändern. Auch die CO_2-Emissionen würde diese Liste wohl nicht senken, da der Großteil der EU-Schrottexporte weiterhin in die Türkei als OECD-Land gehen kann. Wenn Schrott nicht vollständig umgelenkt werden kann, müsste Stahl in den Abnehmerländern emissionsintensiver hergestellt werden.

Erst ein vollständiger Stopp würde den Schrott in der EU halten. Die Schrottpreise würden voraussichtlich sinken, was die Wettbewerbsfähigkeit hiesiger Stahlprodukte stärken könnte. Dies ginge allerdings auf Kosten der Recycler.

Abbildung 6

Emissionen der Stahlherstellung im Jahr 2025 nach Herstellungsweg und Ländern
In Tonnen CO_2 je Tonne Rohstahl



Anmerkung: Nur CO_2 aus Stahlproduktion und Stromverbrauch (ohne Methan aus dem Kohlebergbau). Ägypten: Annahme wie Indien. Wasserstoff: Schwelle der IEA für nahezu emissionsfreien Stahl, kein gemessener Wert.

Quellen: Ali Hasanbeigi (2025): Steel Climate Impact 2025; Ministry of Steel, Government of India; Internationale Energieagentur (IEA); Global Energy Monitor; World Steel Association.

CC BY 4.0

Die Stahlherstellung aus Eisenschwamm mit Kohle im Elektrolichtbogenofen produziert die meisten CO_2-Emissionen.

Der Klimaeffekt wäre aber hierzulande klein. Im Ausland würde der Schrott dagegen fehlen und könnte durch deutlich emissionsintensiveres Eisen aus Erz ersetzt werden. Die globalen Emissionen würden dann beträchtlich steigen.

Exportbeschränkungen allein werden dem Klima nicht helfen. Wichtiger wäre es, Investitionen zu fördern, die die Aufbereitung und Sortierung von verunreinigtem Altschrott verbessern. Dann könnte der bisher exportierte Altschrott in der EU zu hochwertigerem Stahl wiederverarbeitet werden und damit auch die CO_2-Emissionen in der EU senken.

Antonia Kurz ist Wissenschaftlerin in der Abteilung Klimapolitik im DIW Berlin | akurz@diw.de

JEL: F13, F18, L61, Q53, Q56

Keywords: steel scrap, export restrictions, carbon leakage, circular economy, EU policy

Der Artikel ist gemäß der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 nachnutzbar: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

This report is also available in an English version as DIW Weekly Report 47+48/2026:

www.diw.de/diw_weekly

SOEP Papers Nr. 1242
2026 | Berfin Kardaslar, Alexander S. Kritikos, Lukas Menkhoff

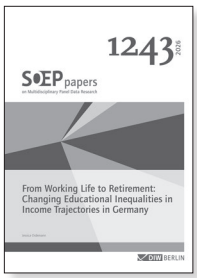


Personality Traits of Entrepreneurs and the Size of their Firms

In this study, we examine the relationship between personality traits, captured by risk tolerance and the Big Five traits, and firm size, as measured by the number of employees. We show that the personality of entrepreneurs matters for the size of their firm they operate. We use a novel add-on to the German Socio-Economic Panel that includes a sub-sample of owner-managers running larger firms. High levels of risk tolerance – associated with an increased likelihood of firm exit in existing research – is positively associated with firm size for entrepreneurs in the market. High scores in extraversion are also associated with larger firms. However, a high level of openness for experience, a main driver of founding ventures, is negatively related to firm size. Overall, we show that running larger firms is associated with traits that are partially different from those that increase the likelihood of entrepreneurial entry or survival.

www.diw.de/publikationen/soeppapers

SOEP Papers Nr. 1243
2026 | Jessica Ordemann

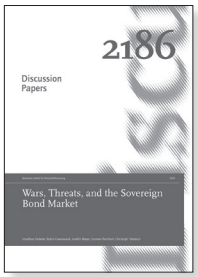


From Working Life to Retirement: Changing Educational Inequalities in Income Trajectories in Germany

Previous literature has mainly focused on either income trajectories of higher education graduates in working life or in retirement. This paper advances this literature by investigating the inequalities of income trajectories at the transition into retirement and compare the trajectories to other educational graduates for the case of Germany. While cumulative advantage theory suggests that education-based income inequalities widen throughout working life, the institutional design of the German pension system fundamentally alters these trajectories. Using data from 1,741 (11,740 observations) baby boomers from the German Socio-Economic Panel Study (SOEP) I combine descriptive income trajectories with fixed effects regression and replacement rate analysis. I find a stratified pattern by educational degree in pre- and post-retirement income. However, income inequality by education degree is more pronounced during work life than in retirement: At the transition into retirement income differences are compressed relative to pre-retirement disparities. This compression operates through heterogeneous replacement rates. Higher educated individuals have lower replacement rates than the rest of the educational groups. Germany's contribution-capped statutory pension system therefore constitutes a structurally induced erosion of the income advantage that higher education generates over a working lifetime.

www.diw.de/publikationen/soeppapers

Discussion Papers Nr. 2186
2026 | Jonathan Federle, Robin Greenwood, Josefin Meyer, Carmen Reinhart, Christoph Trebesch

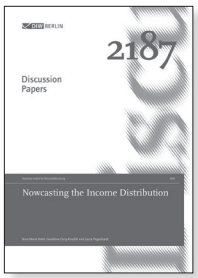


Wars, Threats, and the Sovereign Bond Market

We study how wars and military threats affect financial markets. Leveraging more than 300,000 monthly price observations since 1822, we create an external currency bond index for more than 90 countries—the EXBI. Using the EXBI, we document large effects of wars on returns and borrowing costs. In a global external bond portfolio, a one-standard-deviation war shock lowers returns by five percentage points. At the country level, wars at home generate sharp losses and increase default risk. Military threats depress bond prices in threatened states, but not in threatening ones, highlighting their role as a channel for geoeconomic coercion.

www.diw.de/publikationen/diskussionspapiere

Discussion Papers Nr. 2187
2026 | Nina Maria Brehl, Geraldine Dany-Knedlik, Laura Pagenhardt



Nowcasting the Income Distribution

This paper proposes a framework for nowcasting the income distribution in real time. Decile means of the annual U.S. household income distribution are combined with a panel of about 80 quarterly macroeconomic indicators in a mixed-frequency dynamic factor model (DFM) and evaluated pseudo-real-time from 1990 to 2024. Relative to an auto-regressive benchmark, the DFM reduces decile-level nowcast errors by 16% on average and by up to 25% in the middle of the distribution; improvements are smallest at the two tails, with the volatile bottom decile the hardest to nowcast. The DFM also substantially improves directional accuracy, raising the share of detected turning points from 7% under the benchmark to 45%. The signal is available about eighteen months before the official release, and a news decomposition shows that labor-market releases carry more weight at the bottom of the distribution and price releases at the top. For inequality measures, the DFM does not improve on the benchmark. The framework complements microsimulation and functional approaches by supplying timely, evaluable decile-level signals from standard state-space tools for distributional surveillance and as real-time priors when micro data are delayed.

www.diw.de/publikationen/diskussionspapiere



LEVENT NEYSE

Wie Wissenschaft mehr Vertrauen schafft

Levent Neyse ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sozio-oekonomischen Panel im DIW Berlin.
Der Kommentar gibt die Meinung des Autors wieder.

Dass Forschende überall auf der Welt politische Angriffe erleben, dass Klima- und Geschlechterforschung infrage gestellt werden – das ist inzwischen schon Alltag an den Universitäten. Und treibt sie in eine Glaubwürdigkeitskrise: Ist wirklich wahr und relevant, was ihr da forscht? Nun wird diese Krise noch von anderer Seite verschärft – durch die künstliche Intelligenz. Sie beschleunigt zwar den wissenschaftlichen Prozess. Sie erhöht aber auch das Risiko, dass minderwertige Daten und fingierte Ergebnisse kursieren.

Doch so wie die Wissenschaft sich inzwischen politisch zur Wehr setzt, tut sie das auch hier. Sie hat ihre kritische Selbstprüfung deutlich ausgeweitet durch sogenannte Metawissenschaft: jenes Forschungsfeld, das wissenschaftliche Prozesse untersucht und verbessern will. Hier geht es um methodische Reflexionen: Wie verlässlich sind wissenschaftliche Befunde? Lassen sie sich in unterschiedlichen Ländern replizieren, und bleiben sie über verschiedene statistische Verfahren hinweg stabil? Und wie kann Wissenschaft am Ende glaubwürdiger werden? Diese metawissenschaftliche Arbeit geschieht mittlerweile so systematisch und kooperativ wie nie zuvor. Das zeigt: Die Forschung schaut kritisch auf sich selbst.

Im April 2026 etwa veröffentlichte das Fachjournal Nature mehrere Studien, die Hunderte zuvor veröffentlichte Untersuchungen erneut durchführten. Das Ergebnis: Ein großer Anteil der ursprünglichen Befunde konnte reproduziert werden. Diese Resultate sind ermutigend – Wissenschaft funktioniert. Doch diese Studien zeigten auch, wie wichtig die neue Form wissenschaftlicher Zusammenarbeit ist, die sogenannte Big-Team-Science. Anders als typische Studien, die von wenigen Forschenden durchgeführt werden, bringen Big-Team-Studien Hunderte von ihnen zusammen. Solche systematischen, von Menschen gesteuerten Koordinationsleistungen sind wichtiger denn je.

Die Verhaltensökonomie ist dafür ein gutes Beispiel. Wachsende Sorgen um Datenqualität und KI-Bots bei der Online-Datenerhebung führen dazu, dass sich die Forschung wieder stärker physischen Laboren mit anwesenden Teilnehmenden zuwendet. Doch für einzelne Labore kann es schwierig sein, für ihre Befragungen oder Experimente genug Teilnehmer*innen zu finden, um wissenschaftlich aussagekräftige Daten zu gewinnen.

Daher kooperieren manche Labore jetzt, über Länder hinweg und im großen Stil: In der ManyLabsDACH-Studie haben sich beispielsweise 20 Ökonomielabore aus deutschsprachigen Ländern zusammengeschlossen, um zu testen, ob sich ihre wissenschaftlichen Ergebnisse vergleichen lassen. Sie entwickeln gemeinsam ein experimentelles Design, führen es in allen Laboren durch, analysieren die Ergebnisse kooperativ und verfassen den abschließenden Artikel gemeinsam. Eine ähnliche Initiative namens Explain entsteht derzeit in Frankreich, während sich Forschende unter anderem auch in Italien und Spanien zusammenschließen.

Solche Bemühungen verändern die Arbeitskultur der Wissenschaft zum Guten. Aber sie bringen auch Herausforderungen mit sich: Bürokratie erschwert es, Budgets, Infrastruktur und Personal über Institutionen hinweg zu teilen. Und kurze Förderzyklen sowie befristete Verträge behindern die langfristige Koordination, die große, labor- und länderübergreifende Studien erfordern. Neben solchen formalen Problemen gibt es mitunter auch akademische Hürden: Manche Forschende meiden die Kooperation, weil sie befürchten, dass ihr individueller Beitrag weniger sichtbar wird, wenn sie nur eine*r von 50 Studienautor*innen sind.

Dieser Kommentar wurde bereits am 18. November 2026 in der Zeit veröffentlicht.

Der Artikel ist gemäß der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 nachnutzbar: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-48-5