

Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte



(Version 1.0, Deutsch)

Christoph Gerhards (Scientists for Future), Urban Weber (TH Bingen), Peter Klafka (Scientists for Future), Stefan Golla (Scientists for Future), Gregor Hagedorn (Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, Berlin); Franz Baumann (New York University), Heiko Brendel (Universität Passau), Christian Breyer (LUT University), Jens Clausen (Borderstep Institut), Felix Creutzig (TU-Berlin), Claus-Heinrich Daub (FHNW), Sebastian Helgenberger (IASS), Karl-Martin Hentschel (Mehr Demokratie e. V.), Christian von Hirschhausen (TU Berlin), Ulrike Jordan (Universität Kassel), Claudia Kemfert (DIW und Leuphana Universität), Harald Krause (TH Rosenheim), Sven Linow (Hochschule Darmstadt), Pao-Yu Oei (Europa-Universität Flensburg), Martin Pehnt (Ifeu), Andreas Pfennig (University of Liège), Fabian Präger (TU Berlin), Volker Quaschnig (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin), Jens Schneider (HTWK Leipzig), Uli Spindler (TH Rosenheim), Volker Stelzer (Karlsruhe Institut für Technologie), Michael Sterner (OTH Regensburg), Georg Wagener-Lohse (netzwerk neue energie), Theresa Weinsziehr (Universität Leipzig).¹

Danksagungen: Wir danken Miriam Assad, Christian Borm, Harald Bradke, Katharina Eckartz, Berit Erlach, Markus Feilner, Manfred Fishedick, Maximilian Hübner, Natalia Gier, Karlo B. Hainsch, Lara Hopf, Martin Kräling; Alexander Neumann, Jürgen Reincke, Klaus Russel-Wells, Christine Rüth, Carina Schipper, Volker Schöber, Jochen Theloke, Franz Thoren, Mario Tvrtković und Henry Wilke für inhaltliche und sprachliche Verbesserungsvorschläge.

Dieser Text wurde von Mitgliedern der „Scientists for Future“ verfasst und durch Kollegen und Kolleginnen hinsichtlich der wissenschaftlichen Qualität (insbesondere der Belegbarkeit von Argumenten) ausführlich geprüft.

Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler*innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt als Graswurzelbewegung den aktuellen Stand der Wissenschaft in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form aktiv in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein. Mehr Informationen unter de.scientists4future.org.

Veröffentlicht unter [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Zitationsvorschlag / Suggested citation: Gerhards, C.; Weber, U.; Klafka, P.; Golla, S.; Hagedorn, G.; et al. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte (Version 1.0, Deutsch). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 7, 55 pp. doi: [10.5281/zenodo.4409334](https://doi.org/10.5281/zenodo.4409334).

¹ **Rolle der Autor:innen:** Gerhards (christoph@gerhards-le.de), Weber, Klafka, Golla & Hagedorn haben den gesamten Text geschrieben und die Beiträge der übrigen Autor:innen koordiniert. Die übrigen in alphabetischer Reihenfolge aufgeführten Autor:innen haben themenspezifisch fachliche Beiträge geleistet sowie den Text im Hinblick auf Stimmigkeit und Korrektheit geprüft.

Zusammenfassung

Als fairer Beitrag Deutschlands zur Einhaltung der globalen 1,5-Grad-Grenze werden 16 Orientierungspunkte für eine klimaverträgliche Energieversorgung vorgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass hierfür die deutschen energiebedingten CO₂-Emissionen in etwa 15 Jahren weitgehend auf Null sinken müssen. Energieeinsparung hilft, den notwendigen Ausbau von regenerativen Erzeugungskapazitäten zu verringern. Der Verkehrssektor kann ebenso wie die Bereiche Prozess- und Gebäudewärme hierzu wesentlich beitragen. Die Kernenergie ist mit großen Risiken belastet und kann nicht hinreichend schnell aufgebaut werden. Biomasse in Form von Energiepflanzen zu nutzen, ist ineffizient und steht im Konflikt mit anderen Arten der Landnutzung. Importe klimaneutral erzeugter Energieträger in sehr großem Umfang erfordern extrem große Investitionen im Ausland. Sie sind eine ungesicherte Option auf die Zukunft.

Entscheidend ist daher der ausreichend schnelle Ausbau von Photovoltaik (PV) und Windkraft in Deutschland. Schätzungsweise kann der Elektrizitätsbedarf im Jahr 2030 z. B. durch den Ausbau auf ca. 350 GW PV und ca. 150 GW Windkraft nahezu vollständig regenerativ gedeckt werden. Damit ließe sich eine zum großen Teil elektrifizierte Mobilität und Wärmeversorgung betreiben und ein Teil des benötigten „grünen“ Wasserstoffs in Deutschland bereitstellen. Hierfür ist ein jährlicher Zubau von durchschnittlich ca. 30 GW PV und ca. 9 GW Windkraft nötig. Dies ist ca. sechs- (PV) bzw. dreimal (Wind) so hoch wie bisher vorgesehen und verlangt eine gesellschaftliche Kraftanstrengung. Ein weiter verzögerter Ausbau müsste mit noch deutlich größeren gesellschaftlichen Anstrengungen für drastische Energieeinsparungen oder Importe erneuerbarer Energie ausgeglichen werden. Insgesamt könnte dies noch deutlich schwieriger zu realisieren sein, als ein ambitionierter Ausbau. Da der Aufbau der Kapazitäten mehrere Jahre erfordert, ist es möglich nachzusteuern, z. B. wenn erkennbar wird, dass sich ein ausreichend großer globaler Markt für Importe entwickelt. Bis dahin ist es aus Verantwortung gegenüber der Zukunft und im Sinne des Pariser Vertrages empfehlenswert, die hier genannten Ausbauziele zu verfolgen.

Grüner, also aus erneuerbaren Energien hergestellter Wasserstoff und daraus abgeleitete Syntheseprodukte sind für die Dekarbonisierung von Industrieprozessen, den Flug- und Schiffsverkehr sowie für die Absicherung der Energieversorgung bei Dunkelflauten nötig. Ohne die genannten Ausbauziele für Wind und Solar noch drastisch weiter zu erhöhen, stehen diese Produkte für Straßenverkehr und Wärmeversorgung jedoch nicht in ausreichenden Mengen zur Verfügung. Techniken zum Ausgleich zwischen Elektrizitätsangebot und -nachfrage sind verfügbar und sollten rechtzeitig auf- bzw. ausgebaut werden. Hierzu gehören: Stromaustausch mit den Nachbarländern, Flexibilisierung des Verbrauchs und Energiespeicherung. Für deren Integration sowie den Ausbau der Netze sollten zügig verbesserte rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Die Kosten eines klimaverträglichen Energiesystems sind mittel- bis langfristig nicht höher als im derzeitigen System. Gleichzeitig entstehen Arbeitsplätze und Exportchancen durch Aufbau, Betrieb und Wartung einer regenerativen Energieversorgung

in Deutschland und die energetische Gebäudesanierung. Die politischen Rahmenbedingungen entscheiden, ob eine klimaverträgliche Energieversorgung Deutschlands gelingt.

English Summary

Climate-friendly energy supply for Germany—16 points of orientation

As Germany's equitable contribution to meeting the global 1.5-degree limit, 16 points of orientation for a climate-compatible energy supply system are presented. It is assumed that for this to be realized, German energy-related CO₂ emissions will have to decline to zero within about 15 years. Energy conservation reduces the need for an expansion of renewable power generation capacities. The transport sector, redesigned industrial processes and building retrofits can significantly contribute to this. Nuclear energy is fraught with major risks. Besides, it cannot be scaled up sufficiently quickly. Using biomass as energy crops is inefficient and in conflict with other types of land use. Importing large amounts of carbon-neutral energy requires huge investments abroad. It is an unreliable option for the future.

Therefore, the rapid expansion of photovoltaics (PV) and wind power in Germany is crucial. It is estimated that the electricity demand in 2030 can almost completely be met by renewables, if the capacities are expanded to about 350 GW of PV and about 150 GW of wind power. This expansion would enable supplying largely electrified mobility and heating systems as well as providing part of the required "green" hydrogen in Germany. An average annual increase of around 30 GW of PV and around 9 GW of wind power will be required. This is about six times (PV) or three times (wind) as much as previously planned and will necessitate a significant societal effort. Delaying this expansion further would have to be compensated by even greater efforts in terms of drastic energy savings or imports of renewable energy. Overall, a delayed expansion of renewables would entail more difficulties than an ambitious expansion. Since it takes years to build capacity, it is possible to recalibrate efforts, for example, when it becomes apparent that a sufficiently large global import market is developing. Until then, out of responsibility for the future and in the spirit of the Paris Agreement, it is advisable to pursue the expansion targets outlined here.

Green hydrogen (i.e. hydrogen produced from renewable energies) and derived synthesis products are necessary for the decarbonization of industrial processes, air transport and shipping as well as for securing energy supply for periods when solar and wind power generation is very low. However, without drastically raising the above-mentioned expansion targets for wind and solar even higher, these products will not be available in sufficient quantities for road transport and heat supply. Techniques to balance electricity supply and demand are available and should be speedily developed and expanded. These include electricity exchange with neighboring countries, demand management and energy storage. It is advisable to quickly create improved legal frameworks, to integrate these technologies, and to expand electricity grids.

In the medium to long term, the costs of a climate-compatible energy system are no higher than currently. At the same time, employment and export opportunities are generated in Germany through the development, operation and maintenance of a renewable-based energy system and the energy-efficient retrofitting of buildings. The political framework will determine whether Germany's climate-compatible energy supply system succeeds.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	4
II. Kurzfassung.....	5
III. Ausführliche Betrachtung.....	10
1. Zügige Reduktion der CO ₂ -Emissionen.....	10
2. Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien	11
3. Energieimporte.....	13
4. Biomasse und ökologische Zielkonflikte	15
5. Reduktion des Energiebedarfs.....	18
6. Transport- und Mobilitätssektor.....	19
7. Prozesswärme und prozessbedingte CO ₂ -Emissionen.....	21
8. Wärmeversorgung.....	22
9. Wasserstoff und Syntheseprodukte	26
10. Kernenergie	28
11. Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen	29
12. Bedarf an Speichern im Elektrizitätssystem	34
13. Modernisierung von Elektrizitäts-Infrastruktur und -Marktregeln	36
14. Kosten der Energiewende.....	37
15. Arbeitsmarkt.....	39
16. Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Energiewende.....	41
IV. Schlusswort	42
V. Quellenverzeichnis.....	43
VI. Anhang.....	54

I. Einleitung

Eine klimaverträgliche, also mit dem 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimavertrages kompatible globale Energieversorgung schnell aufzubauen, bildet ein Kernelement wirksamer Klimapolitik. Deutschland steht dabei mit seinen bedeutenden intellektuellen und wirtschaftlichen Ressourcen besonders in der Verantwortung.

Die nachfolgende Zusammenstellung von 16 Orientierungspunkten basiert auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und auf praktischen Erfahrungen, ohne jedoch eine systematische wissenschaftliche Aufarbeitung der gesamten Literatur anzustreben. Vielmehr hat eine Gruppe von Wissenschaftler:innen verschiedener Disziplinen

und Spezialisierungen aus dem Kreis der Scientists for Future ein gemeinsames Verständnis von Lösungen und Prioritäten erarbeitet. Diese Orientierungspunkte können Interessierten helfen, Handlungsoptionen und -empfehlungen für eine zukunftsorientierte deutsche Energiepolitik zu reflektieren und einzuordnen.

Nach Jahrzehnten unzureichender Maßnahmen gegen die Klimakrise bleibt nur wenig Zeit, um eine nachhaltige Energiepolitik umzusetzen. Damit sich etwas tiefgreifend ändert, braucht es gemeinsames und gleichzeitiges Wirken an unterschiedlichen Stellen. Die beschriebenen Maßnahmen basieren auf verfügbarer Technik und deren absehbarer Weiterentwicklung. Um sie im notwendigen Zeitrahmen zu verwirklichen, ist es jedoch erforderlich, den Umbau der Energieversorgung erheblich zu beschleunigen. Dieses Ziel lässt sich nur mithilfe gesellschaftlicher Diskussionen und politischer Entscheidungen erreichen. Die Verfasser:innen sind zuversichtlich, dass dies in einem demokratisch legitimierten Prozess möglich ist. Dazu muss der Zukunftssicherung allerdings mehr Priorität zukommen als bisher.

Insgesamt bedeutet dies eine enorme Anstrengung, eröffnet aber auch große Chancen im gesellschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Bereich. Ein ambitioniertes staatliches Investitionsprogramm in die erneuerbare Energieversorgung könnte in der aktuellen Situation gleichzeitig die Folgen der COVID-Krise mildern, die Wirtschaft stärken, die Wettbewerbsfähigkeit fördern, zukunftsfähige Arbeitsplätze schaffen und das Klima schützen.

II. Kurzfassung

Zu jedem der beschriebenen Punkte findet sich in Teil III eine ausführlichere Betrachtung mit Erläuterungen und Quellenhinweisen. Die Punkte bedingen sich teilweise wechselseitig, daher richtet sich die Reihenfolge nicht nach der Wichtigkeit.

1. Zügige Reduktion der CO₂-Emissionen: Wir sollten die globale Energieversorgung schnellstmöglich umgestalten, um unsere natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten und eine lebenswerte Zukunft sicherzustellen – sowohl für uns als auch für kommende Generationen. Deutschland trägt mit seinen technologischen, wirtschaftlichen und sozialen Fähigkeiten hierfür eine besondere Verantwortung. Der Umbau ist sowohl finanziell als auch technisch möglich. Eine engagierte deutsche Beteiligung sichert den Industriestandort Deutschland. Wieviel Zeit wir dafür haben, ergibt sich aus dem Pariser Klimaschutzabkommen und den CO₂-Budgets, die Deutschland und der Europäischen Union noch bleiben (das CO₂-Budget ist die Gesamtmenge an CO₂, die in der Summe der Jahre noch ausgestoßen werden darf). (Siehe auch III/1)

2. Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien: Um die Klimaziele zu erreichen, ist es notwendig, die Versorgung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien in Deutschland deutlich schneller auszubauen. Bis wann wir davon wieviel mehr brauchen, ergibt sich aus dem CO₂-Budget, dem Energiebedarf und daraus, wieviel Energie wir importieren wollen und können. Die Zeit spielt hierbei eine entscheidende Rolle: Die Ziele, die wir uns für die nächsten fünf bis zehn Jahre setzen,

müssen sich daran orientieren, bereits bis ca. 2035 nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestiegen zu sein. Das ist deutlich früher als Deutschland und die Europäische Union bisher planen. (Siehe auch III/2, für einen Vorschlag für konkrete Ausbauziele siehe auch III/11)

3. Energieimporte: Die Strategie, große Mengen an erneuerbaren Energien in Form von Strom oder synthetischen Energieträgern (einschließlich Wasserstoff und sogenannte „E-Fuels“) zu importieren, birgt Chancen und Risiken. Diese müssen abgewogen werden. Für Importe sind z.B. sehr hohe Investitionen für die Erzeugungs- und meist auch Transportinfrastruktur im Ausland nötig. Weiter besteht ein Sicherheitsrisiko, von Importen abhängig zu sein, und ein Kostenrisiko, dass die Importe sehr teuer werden, falls besonders viele Länder erneuerbare Energie importieren wollen. Darüber hinaus sind Importe in großen Mengen nur dann sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass die Energieversorgung auch in den Exportländern klima-, umwelt- und sozialverträglich ist. Die Chancen hoher Importmengen liegen vor allem in größerer Flächenverfügbarkeit, teilweise höherer solarer Einstrahlung bzw. höherem Wind-ertragspotential sowie bisweilen höherer gesellschaftlicher Innovationsdynamik für den Ausbau einer klimaverträglichen Energieversorgung in anderen Ländern. (Siehe auch III/3)

4. Biomasse und ökologische Zielkonflikte: Bei der Abwägung ökologischer Zielkonflikte muss im Auge behalten werden, dass keine Folgen entstehen, die nicht rückgängig gemacht werden können. Wir sollten nur in geringem Umfang Biomasse zur Energiebereitstellung nutzen. Denn land- und forstwirtschaftliche Flächen sind begrenzt und werden in Zukunft für viele Aufgaben benötigt. Hierzu gehört insbesondere der Anbau von Nahrungsmitteln und nachwachsender Rohstoffe, der Naturschutz, die Wiedervernässung von Moorböden (um CO₂-Freisetzung zu stoppen), sowie die Energieproduktion mittels Wind- und Solaranlagen. Aus diesem Grund sollte der gezielte Anbau von Energiepflanzen in Deutschland auslaufen. Die Nutzung von Biomasse zur Energiebereitstellung sollte sich auf Reststoffe beschränken, die nicht anders verwertbar sind. Flächenkonflikte lassen sich teilweise durch Umstellung von Ernährungsgewohnheiten hin zu einer pflanzenbasierten Ernährung entschärfen. Aus anderen Ländern sollte Biomasse nur dann importiert werden, wenn sie aus kontrolliert nachhaltigem Anbau stammt. Auch die Zerstörung von Waldökosystemen kann zu stark klimarelevanten Kipp-Punkten des Erdsystems beitragen. (Siehe auch III/4)

5. Reduktion des Energiebedarfs: Je mehr Energie wir einsparen, desto leichter ist es, den verbleibenden Energiebedarf rechtzeitig klimaneutral zu decken. Wenn man erneuerbare Energien etwa in Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen direkt nutzt – also in Form von Elektrizität – dann steigt zwar der Strombedarf an, aber der Energiebedarf insgesamt sinkt deutlich, weil wir dadurch den Bedarf an Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel reduzieren. Zur Energieeinsparung gehört auch, dass wir den Gebäudebestand so schnell wie möglich energetisch sanieren, um den Wärmebedarf zu senken. Außerdem können wir durch einen reduzierten Konsum einen Beitrag leisten, ebenso wie durch die Steigerung der Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Wiederverwertbarkeit von Produkten. Insbesondere Verhaltensänderungen spielen hier eine wichtige Rolle. In der Vergangenheit wurden Effizienzgewinne häufig durch

Mehrverbrauch an anderer oder gleicher Stelle wieder zunichtegemacht (Rebound-Effekt). Um dies in Zukunft zu vermeiden, brauchen wir geeignete Rahmenbedingungen und Anreizsysteme. (Siehe auch III/5)

6. Transport- und Mobilitätssektor: Für einen klimaverträglichen Transport- und Mobilitätssektor sind gute Bedingungen für den Fuß- und Radverkehr, ein gut ausgebauter und preiswerter öffentlicher Nahverkehr sowie ein leistungsfähiges Bahnsystem (für Personen und Güter) zentral. Die dafür notwendige regionale, nationale und europäische Infrastruktur ist mit Vorrang auszubauen. Außerdem ist ein schneller Umbau des Verkehrs auf die besonders effiziente direkte Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien sinnvoll. Die wichtigsten aktuell umsetzbaren Anwendungen sind batterieelektrische Pkw und Lkw sowie die Nutzung von Oberleitungen für Bahn und Busse und künftig eventuell an Autobahnen. (Siehe auch III/6)

7. Prozesswärme und prozessbedingte CO₂-Emissionen: Unter Prozesswärme versteht man Wärme, die für technische oder chemische Verfahren benötigt wird. Die Einsparpotenziale hierfür sind in einigen Branchen bereits weitgehend ausgeschöpft, in anderen liegen sie noch brach. Damit die Industrie prozessbedingte Emissionen wie bei Zement- oder Stahlproduktion vermeiden kann, muss sie Produktionsverfahren umstellen und gegebenenfalls andere Ausgangsstoffe nutzen. Darüber hinaus sollten Materialien genutzt werden, bei denen im Lebenszyklus weniger Treibhausgase emittiert werden (z. B. Holz statt Beton). (Siehe auch III/7)

8. Wärmeversorgung: Zusätzlich zur Heizenergieeinsparung (z. B. durch Gebäudesanierung, vgl. II/5) ist in größeren Kommunen eine Wärmeleitplanung notwendig. Hierbei wird u. a. festgelegt, in welchen Quartieren die Wärmeversorgung zentral (durch Wärmenetze) oder dezentral (z. B. durch eine Heizung je Gebäude) erfolgen soll. Ebenso sind Niedertemperatur-Wärmenetze gezielt auszubauen. Mit Wärmenetzen können bisher ungenutzte Wärmequellen (z. B. Industrieabwärme, Tiefengeothermie und Wärme aus großen Solarthermieanlagen) und große Wärmespeicher effizient genutzt werden. Für die dezentrale Wärmebereitstellung sind Wärmepumpen, gegebenenfalls um Solarthermie ergänzt, die bevorzugte Lösung. (Siehe auch III/8)

9. Wasserstoff und Syntheseprodukte: Es werden große Mengen synthetischer Energieträger aus treibhausgasneutraler und umweltverträglicher Herstellung gebraucht, um eine klimaverträgliche Stahl-, Chemie- und Düngemittelindustrie zu ermöglichen. Hierzu zählen vor allem Wasserstoff sowie daraus erzeugte Folgeprodukte wie synthetische Kohlenwasserstoffe und Ammoniak. Außerdem werden diese Energieträger für Bereiche des Flug- und Schiffsverkehrs wie auch als Langfristspeicher für die sichere Stromversorgung benötigt. Die Herstellung von Wasserstoff oder Folgeprodukten benötigt jedoch deutlich mehr erneuerbare Energien als eine direkte Nutzung von Strom. Aus diesem Grund sollte man für die meisten Anwendungen im Straßenverkehr und in der Wärmeversorgung auf effizientere und kostengünstigere Alternativen zurückgreifen. (Siehe auch III/9)

10. Kernenergie: Einem Ausbau der Kernenergie stehen hohe Kosten, erhebliche Sicherheitsbedenken, lange Bauzeiten und das noch immer ungelöste Endlagerproblem entgegen. Daher ist Kernenergie nicht in der Lage, in der verbleibenden Zeit

einen sinnvollen Beitrag zum Umbau zu einer klimaverträglichen Energieversorgung zu leisten. Das gilt auch für die Kernfusion. Aufgrund der vorhandenen Alternativen ist Deutschland nicht auf die Kernenergie angewiesen, um eine klimaverträgliche Energieversorgung bis 2035 zu erreichen. (Siehe auch III/10)

11. Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen: Aus den bisher genannten Gründen sind ambitionierte Ausbauziele für Solar- und Windkraftanlagen wichtig. Unserer Einschätzung nach sind bis 2030 zum einen nur geringe Importe erneuerbarer Energie realistisch, zum anderen ist das Potential für Energieeinsparungen in dieser kurzen Zeit nur zum Teil realisierbar. Wenn die Bereiche Mobilität und Wärmeversorgung ambitioniert elektrifiziert werden (vgl. II/6 und II/8) und wir in die inländische Wasserstoffproduktion einsteigen (vgl. II/9), könnte der Bedarf an elektrischer Energie im Jahr 2030 nach unseren Schätzungen ca. 875 TWh im Jahr betragen (2019 waren es ca. 525 TWh). Ein Großteil dieser Energiemenge kann in Deutschland z. B. mit 350 GW Photovoltaik und 150 GW Windkraft bereitgestellt werden (installierte Nennleistungen). Liegt der Ausbau bis 2030 – z. B. gemäß den derzeitigen Planungen der Bundesregierung – deutlich unter diesen Zahlen, kann eine entsprechende CO₂-Emissionsreduktion nur bei sehr großer Energieeinsparung oder sehr hohen Importmengen erreicht werden. Die meisten Studien für ein Deutschland, das mit nahezu 100% erneuerbaren Energien versorgt wird, kommen zu vergleichbaren Schlüssen. Jedoch wird hier meist vom Zieljahr 2050 und deutlich höheren Emissionen ausgegangen. Die entsprechenden Szenarien sind daher nicht kompatibel mit dem Pariser Klimavertrag. Insbesondere bei der Photovoltaik halten wir deutlich höhere Ausbauraten für möglich, insbesondere unter Einbeziehung von naturverträglichen Freiland-Anlagen und in Kombination mit Landwirtschaft („Agri-Photovoltaik“). (Siehe auch III/11)

12. Bedarf an Speichern im Elektrizitätssystem: In einem klimaverträglichen Elektrizitätssystem kann ein Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage teilweise durch internationale Kooperation und flexible Verbraucher geschehen. Darüber hinaus sind Speichertechnologien notwendig. Diese stehen kurz vor der Marktreife oder werden zum Teil heute schon genutzt: Batterien und andere Technologien dienen als Kurzzeitspeicher. Zusätzlich kann man verstärkt Seen, zum Beispiel in Norwegen, als Energiespeicher nutzen. Für die langfristige Speicherung kann die regenerative Erzeugung von Wasserstoff oder gasförmigen Syntheseprodukte genutzt werden. Diese Gase lassen sich in vorhandenen unterirdischen Kavernen speichern. Hiermit betriebene Kraftwerke können die zur Sicherung der Energieversorgung in Dunkelflauten über mehrere Wochen nötige Reserveleistung bereitstellen. (Siehe auch III/12)

13. Modernisierung von Elektrizitätsinfrastruktur und -Marktregeln: Der Ausbau der Netze, die Integration von Energiespeichern in den Strommarkt und flexible Verbraucher sind von besonderer Bedeutung. Die dafür relevanten Gesetze sollten reformiert werden und sich an einer vollständigen Versorgung aus erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2035 orientieren. Hierzu sollte eine Mischung aus zentralen und dezentralen Strukturen angestrebt werden. Es ist wichtig schnell die heute noch bestehenden Hemmnisse bei der Umgestaltung der Energieversorgung aufzulösen. (Siehe auch III/13)

14. Kosten der Energiewende: Die Kosten einer mit dem Pariser Klimaabkommen kompatiblen Energieversorgung sind mittel- bis langfristig nicht höher als heute. Berücksichtigt man die aktuell nicht eingepreisten Umweltbelastungen (sogenannte „externalisierte“ Kosten), ist ein klimaverträgliches Energiesystem sogar schon heute deutlich günstiger. Geringere Betriebskosten gleichen die im Vergleich zur bisherigen Energieversorgung höheren Investitionskosten aus. (Siehe auch III/14)

15. Arbeitsmarkt: Aufbau, Betrieb und Wartung einer regenerativen Energieversorgung ebenso wie eine beschleunigte energetische Gebäudesanierung schaffen sehr viele Arbeitsplätze in Deutschland. Wenn frühzeitig Planungssicherheit über eine schnelle Energiewende besteht, können neu entstehende Arbeitsplätze den Wegfall von Arbeitsplätzen in anderen Industriesparten vollständig und rechtzeitig ausgleichen. Durch die Entwicklung und Umsetzung neuer Technologien und Dienstleistungen entstehen für die deutsche Wirtschaft gleichzeitig zukunftssträchtige Exportmöglichkeiten auf den Weltmärkten. Fehlt diese Planungssicherheit hingegen, könnte sich ein Fachkräftemangel in den Sektoren Planung, Bau- und Energiewirtschaft als ein wesentliches Hindernis bei der Energiewende herausstellen. (Siehe auch III/15)

16. Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Energiewende: Die rasche Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien setzt fundierte Information und transparente Kommunikation voraus. Es braucht einen breiten gesellschaftlichen Konsens und die Bereitschaft zu hohen Investitionen. Diese Voraussetzungen lassen sich einerseits mit Hilfe von Aufklärung, andererseits durch verstärkte wirtschaftliche Teilhabe aller gesellschaftlichen Gruppen schaffen. Um alle gesellschaftlichen Gruppen zu beteiligen, sind geeignete Förder- und Finanzierungsinstrumente zu schaffen. Zudem sollte sich die Höhe der strom- bzw. energieträgerbezogenen Steuern und Abgaben an den verursachten Umwelt- und Gesundheitsschäden ausrichten. Dabei muss insbesondere der CO₂-Preis so hoch sein, dass er eine lenkende Wirkung entfaltet. Die Energiewende ist ein entscheidender Baustein für den Klimaschutz und indirekt auch für den Erhalt der Artenvielfalt. Sie ist eine große gesellschaftliche Aufgabe und verlangt, alle gesellschaftlichen Akteur:innen einzubinden. (Siehe auch III/16)

III. Ausführliche Betrachtung

1. Zügige Reduktion der CO₂-Emissionen

Im September 2016 haben der Bundestag und der Bundesrat das Pariser Abkommen ratifiziert. Damit hat Deutschland sich verpflichtet, Anstrengungen zu unternehmen, den globalen Temperaturanstieg auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Allerdings kann Deutschland seinen Anteil an der Erreichung dieses Ziels nicht mehr leisten, wenn jede:r Einwohner:in in Deutschland rechnerisch das gleiche Restbudget an CO₂-Emissionen zur Verfügung hätte wie jede:r Weltbürger:in. Dann nämlich müsste Deutschland bereits 2028 CO₂-neutral sein.² Stattdessen gehen wir von dem CO₂-Restbudget aus, das der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) im Umweltgutachten 2020 als Ziel für Deutschland vorgeschlagen hat. Ab 2021 verbleiben davon ca. sechs Gigatonnen (Gt) CO₂.^{3,4} Dies bedeutet aber, dass für andere Staaten weniger Restbudget zur Verfügung steht, um die Erderwärmung global auf 1,5 Grad zu begrenzen. Aus Gründen der Fairness sollte Deutschland diese Staaten unterstützen, um so insgesamt einen fairen Beitrag zu leisten.⁵

Bei gleichmäßiger jährlicher Reduzierung bleibt der Bundesrepublik angesichts dieses Budgets Zeit bis ca. 2037. Eine gleichmäßige Reduzierung ist allerdings keine wahrscheinliche Entwicklung. Da sich einige Maßnahmen zur Emissionsminderung leichter umsetzen lassen als andere, sollten diese in allen Sektoren besonders schnell ergriffen werden. So bleibt mehr Zeit, um besonders schwierig zu vermeidende Restemissionen zu bewältigen.

Im Energiesektor gibt es viele Maßnahmen, die verhältnismäßig leicht umsetzbar sind. Daher ist es möglich, diesen bis 2035 nahezu CO₂-emissionsfrei zu machen. Da Erdgas als Ersatz für Kohle keine ausreichende Reduktion der Treibhausgasemission

² Der Rechnung liegt die Annahme zugrunde, dass das weltweite CO₂-Budget, das verbleibt, wenn die Erderwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 66 % auf 1,5 Grad begrenzt werden soll (IPCC, 2018), gleichmäßig auf alle Menschen verteilt wird und die Emissionen in Deutschland linear sinken.

³ 6,7 Gt ab 2020 (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2020), abzüglich geschätzter deutscher CO₂-Emissionen in 2020.

⁴ Im Pariser Klimaschutzabkommen ist keine Regelung getroffen, wie das weltweite CO₂-Budget auf die Staaten aufgeteilt werden soll. Bei gleichmäßiger Verteilung auf alle Menschen gilt: Nimmt man das Budget für die Erreichung des 1,5-Grad-Ziels mit 66 % Wahrscheinlichkeit ab 2018 (420 Gt, IPCC, 2018), fügt 80 Gt für die weltweiten Emissionen in 2016–2017 hinzu, bleibt für Deutschland (1,1 % der Weltbevölkerung) ab 2016 ein Budget von ca. 5,5 Gt. Zieht man davon die deutschen Emissionen von 2016–2020 ab, verbleiben ab Anfang 2021 lediglich ca. 1,7 Gt (siehe auch Rahmstorf (2019); für Emissionen 2016–2019 UBA (2020d); für 2020 Agora (2021)). Bei Zugrundelegung eines weltweit gleichen Pro-Kopf-Budgets wird auch das oben genannte deutsche Budget von 6,0 Gt ab 2021 um ca. 4,3 Gt überzogen.

⁵ Berechnungen finden sich z. B. bei Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz (2020).

bewirkt⁶, sollten erneuerbare Energien auch diesen Brennstoff bis 2035 nahezu vollständig ersetzen. Dabei gilt es, Brückentechnologien weder aufzubauen noch zu verfestigen, wenn diese den Übergang zur Klimaneutralität behindern.⁷

2. Beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien

Die in verschiedenen Studien vorgeschlagenen Maßnahmen für eine klimaverträgliche Energieversorgung decken sich weitgehend,⁸ lediglich die Gewichtung der Maßnahmen und der Zeitrahmen unterscheiden sich. Entscheidend ist dabei, wie schnell die Umstellung von heute ca. 15 % erneuerbarer Energie am Gesamtenergiebedarf⁹ auf 50%, 80% und 95% gelingt, da hiervon die Gesamtmenge an ausgestoßenen Treibhausgasen abhängt. Angesichts des geringen verbleibenden CO₂-Budgets und im Sinne des Vorsorgeprinzips sollte man sich am Ziel einer nahezu vollständigen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien bis 2035 orientieren. Hieraus lassen sich ambitionierte jährliche Zwischenziele für die Energieversorgung und andere Sektoren ableiten, die mit dem verbleibenden CO₂-Budget konform sind. Studien, die die Entwicklung von Energiebedarf und Technologie berücksichtigen, sollten diesen Prozess in den kommenden Jahren stetig begleiten.¹⁰ Erreicht man die Zwischenziele in einem Sektor nicht, gilt es jeweils unverzüglich nachzusteuern und die künftigen Zwischenziele entsprechend anzupassen, um das Gesamtemissionsbudget einzuhalten.

Kein Land wird die Klimakrise allein aufhalten können. Wenn Deutschland als führende Industrienation Europas den Weg zur klimaverträglichen Energieversorgung bis 2035 zielstrebig verfolgt, kann allerdings eine weltweite Dynamik durch Mitnahmeeffekte entstehen, die nicht zu unterschätzen ist. Der damit verbundene gesell-

⁶Siehe auch Brauers et al. (2021). Bei Erdgas ist zu beachten, dass die Treibhauswirkung von Methan wesentlich höher ist als die von CO₂. Das Treibhauspotenzial („global warming potential“) von Methan wird heute mit 86 für die ersten 20 Jahre nach Emission und 32 für die ersten 100 Jahre nach Emission angegeben (Etminan et al., 2016). Aufgrund fehlender Standards und Messverfahren bestehen hohe Unsicherheiten, was flüchtige Methanemissionen in der Produktion, der Verarbeitung und in Transport und Verteilung angeht. Untersuchungen des US-Energiesystems haben gezeigt, dass die Klima-Vorteile in der thermischen Verwendung von Erdgas gegenüber Kohle verloren gehen, sobald Methan-Lecks mehr als etwa 2,7% der insgesamt verbrannten Gasmenge ausmachen (Cremonese & Gusev, 2016; vergleiche auch Hainsch et al., 2020).

⁷Brauers et al., 2021.

⁸Leopoldina et al., 2020.

⁹AGEB (2020): Tabelle 2.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern.

¹⁰Viele Szenarien verwenden die deutschen Klimaziele (z. B. 2030 –55%; 2040 –70% und 2050 –95% CO₂-Reduktion) als Grundlage. Da dieser Pfad nicht kompatibel mit dem Pariser Klimaschutzabkommen ist, müssen deutlich ambitioniertere Maßnahmen getroffen werden als in den entsprechenden Studien genannt werden (Prognos et al., 2020; SRU, 2020; Wuppertal Institut, 2020). Die vorgeschlagenen Maßnahmen decken sich überwiegend mit anderen Thesenpapieren, z. B. Sauer (2019) und Leopoldina (2019). In Wuppertal Institut (2020) wurde aus Daten der vorhandenen Studien ein Weg für Klimaverträglichkeit bis 2035 skizziert. Eine solche Betrachtung kann Grundlage für Sektorziele und Maßnahmen sein, die bei neuem Erkenntnisstand angepasst werden.

schaftliche Wandel ist Chance und Herausforderung. Die Anstrengungen der heutigen Generation sind wesentlich, um zukünftigen Generationen ein gutes Leben zu ermöglichen.

Dabei müssen künftig alle Sektoren des Energieverbrauchs klimaverträglich werden. Der Status quo ist hierbei sehr unterschiedlich. So war der Anteil erneuerbarer Energie bei der Stromproduktion 2019 in Deutschland mit ca. 46 % relativ hoch. Im Verkehr wurden dagegen nur 6 %, in der Wärmebereitstellung für Gebäude und Industrie nur 15 % erneuerbare Energie eingesetzt.¹¹

In einem 100%-Erneuerbare-Energie-Szenario decken Photovoltaik und Windkraft den größten Teil des Energiebedarfs. Im [Abschnitt III/11](#), „Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen“, werden hierfür konkrete Ausbauziele vorgeschlagen. In geringerem Umfang können solarthermische und geothermische Anlagen sowie die Nutzung von Biomasse aus Reststoffen, Wasserkraft und Abwärme zur Energieversorgung beitragen.

Auch in einem klimaverträglichen Energiesystem kann die Absicherung der Strom- und Wärmeversorgung durch Gaskraftwerke gewährleistet werden. Diese können zunehmend mit „grünem Wasserstoff“ (d.h. über Elektrolyse mit erneuerbarem Strom erzeugtem Wasserstoff) oder daraus synthetisiertem Methan betrieben und durch Brennstoffzellen und Batterien ergänzt werden.¹² In Wärmenetzen kann die in diesen Anlagen entstehende Abwärme genutzt werden.¹³

Die Strom- und Wärmebereitstellung so schnell wie möglich auf erneuerbare Energie umzustellen, ist auch deshalb wichtig, weil dadurch der Kohle-, Erdöl- und Erdgasbedarf unmittelbar sinkt.

Um bis 2035 Strom und Wärme erneuerbar bereitzustellen, benötigt Deutschland einen rapiden Ausbau der erneuerbaren Energietechnologien. Technisch kann der Energiebedarf Deutschlands über Wind-, Solarenergie- und Biomassenutzung sowie durch Geothermie und Umweltwärme vollständig gedeckt werden.¹⁴ Dafür ist weni-

¹¹ Siehe Burger (2020) und AGE (2020). Bezüglich des Verhältnisses von Photovoltaik zu Wind ist zu berücksichtigen, dass Strom im Winter für die Raumwärme-Bereitstellung in Deutschland im Wesentlichen aus Windkraft kommen muss (vgl. Kaspar et al., 2019). Der Endenergiebedarf 2019 betrug insgesamt 2515 TWh und gliedert sich in: Bergbau, Verarbeitendes Gewerbe 704 TWh (28 %), Verkehr 770 TWh (31 %) (insgesamt wird ca. die Hälfte des Verkehrs durch private Haushalte verursacht, siehe auch Hüttl and Ossing, 2011), private Haushalte (ohne Verkehr) 669 TWh (27 %), Gewerbe, Handel, Dienstleistungen 373 TWh (15 %). Bezogen auf die Anwendungen sind dies: Raumwärme 662 TWh (26 %), Warmwasser 130 TWh (5 %), Prozesswärme 541 TWh (22 %), Mechanische Energie 986 TWh (39 %), Kälte, Beleuchtung, IT, Sonstige 194 TWh (8 %).

¹² Zur Absicherung der Strom- und Wärmeversorgung für Zeiten, in denen das direkte Angebot aus Wind- und Solarenergie nicht den Bedarf decken kann, siehe [Abschnitt III/12](#), „Bedarf an Speichern im Elektrizitätssystem“.

¹³ Vgl. [Abschnitt III/8](#), „Wärmeversorgung“.

¹⁴ Walter & Wiehe, 2018; BMVI, 2015; Klaus et al., 2010; Lütkehus et al., 2013; Purr et al., 2019; Wirth, 2020a; Wirth, 2020b. Das Erzeugungspotenzial für Windenergie wird in Lütkehus et al. (2013) auf über

ger Fläche nötig, als heute für den Anbau von Energiepflanzen in Deutschland genutzt wird.¹⁵ Der Ausbau erneuerbarer Energie muss somit nicht zu Lasten der Natur erfolgen.

Die heutigen rechtlichen Rahmenbedingungen schränken allerdings die technischen Erzeugungspotenziale signifikant ein und müssen daher schnellstmöglich mit Priorität angepasst werden.¹⁶

3. Energieimporte

In vielen Studien zur erneuerbaren Energieversorgung für Deutschland wird ein Import von Energie in Form von Strom, Wasserstoff oder Syntheseprodukten¹⁷ in großen Mengen angenommen.¹⁸ Hierdurch kann der Ausbau von Erzeugungsanlagen in Deutschland geringer ausfallen.

Stromimport und -export ist bereits heute im europäischen Verbundnetz eine gängige Praxis. Durch eine Ausweitung können der Speicherbedarf verringert und die Kosten gesenkt werden.¹⁹ Dabei ist es wichtig, dass der importierte Strom aus erneuerbaren Quellen stammt.

Ein höheres Solar- oder Wind-Angebot in anderen Ländern führt zu niedrigeren Gestehungskosten²⁰ von grünem Wasserstoff und somit von synthetischen chemischen Energieträgern. Daher könnten Importe von Wasserstoff und Syntheseprodukten teilweise kostengünstiger als die Produktion in Deutschland sein.²¹ Jedoch ist auch der Transportaufwand zu berücksichtigen.^{22, 23} Eine größere Flächenverfügbarkeit

2500 TWh/Jahr berechnet, das Potenzial der Photovoltaik insbesondere unter Berücksichtigung der integrierten Photovoltaik auf landwirtschaftlichen Flächen (Agrar-PV) und Gebäuden beträgt laut Fath (2018) ebenfalls deutlich über 2500 TWh/Jahr.

¹⁵Nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2020) werden 2,37 Mio. ha (6,6 % der Fläche Deutschlands) für Bioenergie genutzt. Auf 1,3 Mio. ha kann mit Photovoltaik ca. 950 TWh elektrische Energie erzeugt werden, auf 1 Mio. ha ca. 800 TWh Windstrom. Zusätzlich stehen mindestens 50 % der Flächen zwischen den Windkraftanlagen (0,5 Mio. ha) zur Photovoltaik-Nutzung für 365 TWh zur Verfügung, offshore mind. 54 GW / 227 TWh, auf Dachflächen und Gebäuden ein Potenzial von mind. 200 GW / 170 TWh, insgesamt ca. 2500 TWh. Damit könnte z. B. der Bedarf von 2400 TWh aus dem LUT-Szenario aus Ram et al. (2019) gedeckt werden. Siehe auch Abschnitt III/11 für weitere Details zum Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung.

¹⁶Beispiele sind z. B. Freiflächennutzung für Solarenergie oder Abstandsregelungen für Windkraft. Für Hemmnisse und Hürden für die Photovoltaik siehe insbesondere Bergner et al. (2020).

¹⁷Synthetisch hergestellte Produkte wie Methanol und Ammoniak sowie ähnliche Stoffe sind hier eingeschlossen. Diese lassen sich sowohl als Chemikalie als auch als Treibstoffe verwenden (Kätelhön et al., 2019).

¹⁸Bründlinger et al., 2018; Sterchele et al., 2020; Purr et al., 2019; Robinius et al., 2019; Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz, 2020; Sterner et al., 2021.

¹⁹Im Vergleich zu Ram et al. (2019) wird in SolarPower Europe & LUT (2020) Deutschland nicht isoliert betrachtet, sondern als in engem kooperativen Austausch mit den europäischen Nachbarländern stehend. Siehe auch Pape et al. (2014) und Connect Energy Economics (2014). Um den Stromhandel über Grenzen signifikant zu erhöhen, ist allerdings ein Ausbau des europäischen Stromnetzes erforderlich.

²⁰Eine Weltkarte mit prognostizierten Kosten zur Wasserstoffherzeugung über erneuerbare Energie ist in International Energy Agency (2019) dargestellt.

²¹Ram et al., 2020a.

²²Liebich et al., 2020; Merten & Scholz 2021.

²³Nach Brändle et al. (2020) kann eine heimische Erzeugung von Wasserstoff günstiger sein als ein Import über Schiff, aber teurer sein als ein Import über Pipeline; die Infrastruktur spielt also eine entscheidende Rolle.

und eine möglicherweise höhere gesellschaftliche Innovationsdynamik in den Exportländern können so einen schnelleren Umbau der deutschen und europäischen Energieversorgung ermöglichen.

Genau wie beim Import fossiler Energieträger entstehen auch beim Import erneuerbarer Energieträger je nach Region technische, wirtschaftliche, umwelt- und sozialpolitische sowie sicherheits- und geopolitische Herausforderungen. Diese sind in ihrer Komplexität noch wenig verstanden und werden deshalb teilweise unterschätzt.^{24,25} Importe erfordern hohe Investitionen für die Erzeugungs-²⁶ und Transportinfrastruktur in den Exportländern, und es besteht das Risiko einer kostentreibenden internationalen Konkurrenz um importierbare Energie.

Die Frage der Importe ist auch von großer sicherheitspolitischer Bedeutung, denn eine hohe Energie-Importquote führt zu einer Abhängigkeit von den Exportländern und deren politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen.²⁷ Dieses Risiko wird erhöht, wenn die Energieproduktion und die Transportinfrastruktur aufgrund eines hohen Zentralisierungsgrads und geringer Redundanzen leicht zu stören sind. Auslöser solcher Störungen können z. B. Naturkatastrophen, politische Entscheidungen sowie militärische oder terroristische Angriffe sein. In diesem Sinne kann eine dezentrale Energiewende Chancen für eine resiliente und sichere Energieversorgung bieten.²⁸

Ein hoher Grad an Energieautonomie der Europäischen Union kann zudem auch ein sinnvoller Beitrag zur Friedenssicherung sein.²⁹ Hohe regionale Autonomiegrade, in Europa z. B. auf nationalstaatlicher Ebene erreichbar, führen zudem zu einer erhöhten Resilienz und Versorgungssicherheit.³⁰

Es kann daher sinnvoll sein, Energie primär über synthetische Energieträger zu importieren (siehe auch Ram et al., 2020a).

²⁴ So ist u. a. die Technik für einen interkontinentalen Wasserstofftransport nicht im großen Maßstab erprobt. Für die Entwicklungszeit der Technik und den nachfolgenden Aufbau einer Transportinfrastruktur sollte ein Zeitraum von deutlich mehr als zehn Jahren veranschlagt werden. Wann importierter Wasserstoff verfügbar sein wird und zu welchem Preis, ist daher unsicher; siehe Gerhardt et al. (2020, S. 24ff). Gegebenenfalls wird dieser höher sein als eine Erzeugung in Deutschland. Die Probleme mit dem Wasserstofftransport können umgangen werden, wenn in den Exportländern aus Wasserstoff Stoffe wie Methanol oder Ammoniak hergestellt werden, da hierfür die Transporttechnologie vorhanden ist (Ram et al., 2020a).

²⁵ Wietschel et al., 2020; Paravantis & Kontoulis, 2020; Cherp & Jewell, 2014; ein umfassender Literaturüberblick findet sich bei Vakulchuk et al., 2020.

²⁶ Dies betrifft nicht nur Wind- und Solarkraftwerke, sondern je nachdem, was exportiert werden soll, auch Elektrolyseure, CO₂-Abscheideanlagen (Direct Air Capture, DAC) und sonstige Produktionsanlagen für die Synthese von Methan, Methanol, Ammoniak etc.

²⁷ Crikemans, 2018; O'Sullivan et al., 2017; Escribano Francés et al., 2013.

²⁸ ACORE, 2018.

²⁹ Historisch führten asymmetrische Machtverhältnisse zwischen Energieexport- und Energieimportländern häufig zu Konflikten bis hin zu kriegerischen Auseinandersetzungen (Yergin, 1991; Samaras et al., 2019; Toprani, 2019). Zudem tendieren solche Ungleichgewichte zu neokolonialen Strukturen, vor allem wenn Importländer militärisch und wirtschaftlich stark, Exportländer jedoch militärisch und wirtschaftlich schwach sind.

³⁰ Sicherheitspolitisch kommt es vor allem darauf an, ausreichende Resilienz und Backup-Systeme auf möglichst niedriger Ebene aufzubauen, um im Krisenfall die Energieversorgung gewährleisten zu können (v. a. die Stromversorgung, nötig z. B. für Kommunikation und Trinkwasserversorgung).

Auf der anderen Seite könnte Handel (mit regenerativen Energieträgern) durch die wechselseitige wirtschaftliche Abhängigkeit von Staaten auch geopolitisch stabilisierend wirken.³¹ Verstärkt werden könnte dieser Effekt dadurch, dass Demokratisierungsprozesse womöglich strukturell von der Umstellung auf (dezentrale) erneuerbare Energien profitieren.³²

Wenn man sich in Abwägung der Chancen und Risiken für Importe in großen Mengen entscheidet, ist es wesentlich, rasch mit dem Aufbau der Erzeugungs- und Transportinfrastrukturen zu beginnen und ihn konsequent voranzutreiben. Dies kann nur gelingen, wenn von deutscher Seite die Abnahme geeigneter Mengen schon bald vertraglich zugesichert wird.^{33, 34} So werden Lerneffekte bei Produktion, Transport und Speicherung frühzeitig angestoßen, die dann zu Kostenreduktionen führen. Zudem werden eventuelle technisch oder wirtschaftlich nicht überwindbare Umsetzungsprobleme ausreichend schnell erkannt, damit die inländischen Produktionsziele rechtzeitig erhöht werden können. Auch können so Energiepreise langfristig abgesichert werden. Als Exportländer kommen grundsätzlich viele Lieferländer infrage, vor allem diejenigen, die über hohe solare Einstrahlung bzw. gute Windbedingungen verfügen.

In diesem Zusammenhang ist sicherzustellen, dass am Ort der Erzeugung die globalen Nachhaltigkeitsziele³⁵ umgesetzt werden – insbesondere, dass bereits ein nachhaltiges Energiesystem für den lokalen Bedarf existiert.

4. Biomasse und ökologische Zielkonflikte

Wie jede Form der Energiebereitstellung bringen auch der Aufbau und Betrieb von Wind- und Solarkraftwerken Eingriffe in die Natur mit sich. Um den Ausbau von Wind- und Solaranlagen mit Natur- und Artenschutzzielen³⁶ in Einklang zu bringen, ist eine neue regionale Flächenplanung notwendig. Hierdurch können die für Energiebereitstellung, Land- und Forstwirtschaft sowie Naturschutz nötigen Flächen gesichert werden. Darüber hinaus können Auflagen beim Bau und Betrieb von Anlagen Konflikte mit dem Naturschutz entschärfen (wie Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung mit Vögeln oder Fledermäusen bei Windkraftanlagen). Eingriffe in das ökologische Wirkungsgefüge sollten minimiert und die nicht zu vermeidenden durch Kom-

³¹ Guler, 2018; Scholten & Bosman, 2016.

³² Burke & Stephens, 2018.

³³ Analog zu den etablierten Stromlieferverträgen („Power Purchase Agreements“, PPA) könnten auch Treibstoff-Lieferverträge abgeschlossen werden („Fuel Purchase Agreements“).

³⁴ Ein Modell hierfür kann z.B. H2Global sein, welches von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit entwickelt wurde. Es sichert über Auktionsverfahren sowohl die faire Abnahme von grünen Energieträgern auf Basis von Wind- und Solarenergie in den Partnerländern, als auch die verlässliche Verwendung in schwer zu defossilisierenden Bereichen der Industrie wie Stahl, Chemie oder dem internationalen Verkehr (Sternier et al., 2021).

³⁵ „Sustainable Development Goals“, SDGs (United Nations, 2021).

³⁶ Convention for Biological Diversity, 2020.

pensationsmaßnahmen³⁷ ausgeglichen werden.³⁸ Dies gilt nicht nur innerhalb Deutschlands, sondern beim Import von erneuerbaren Energieträgern auch in Bezug auf die Herkunftsländer.

Bei den verbleibenden Zielkonflikten ist zwischen derzeitigen und künftigen Interessen abzuwägen. Vor dem Hintergrund drohender Kipp-Punkte im Klimasystem der Erde muss bei dieser Abwägung die Vermeidung irreversibler Folgen eine hohe Priorität erhalten.³⁹ Biodiversitäts- und Klimaschutzziele müssen künftig besser in Einklang gebracht werden.⁴⁰

Eine fortschreitende globale Erwärmung hätte ein Artensterben in bislang unvorstellbarer Dimension⁴¹ sowie die Zerstörung der Lebensgrundlage für große Teile der Weltbevölkerung zur Folge. Daher sind eine deutliche Reduktion von hemmenden Rahmenbedingungen und der beschleunigte Ausbau von Wind- und Solarkraftwerken ökologisch nötig und ökonomisch sinnvoll. Dies gilt auch für andere erneuerbare Energieformen wie Wasserkraft und Geothermie.

Die Nutzung von Biomasse zur Energiebereitstellung ist nur in geringem Umfang sinnvoll. Land- und forstwirtschaftliche Flächen sind begrenzt und werden in Zukunft zuerst für den naturverträglichen⁴² Anbau von Nahrungsmitteln und Baustoffen, den Anbau nachwachsender Rohstoffe für die chemische Industrie, die Wiedervernässung von derzeit noch CO₂-emittierenden Moorböden⁴³, für Wind- und Solarenergie, naturnahe Aufforstungen⁴⁴ und den Naturschutz benötigt. Zugunsten dieser Nutzungen sollte man den gezielte Anbau von ackerbaulichen Energiepflanzen⁴⁵ auslaufen lassen. Die energetische Nutzung von Biomasse sollte auf anderweitig nicht mehr verwertbare Reststoffe beschränkt werden. Energetisch genutzte Biomasse kann voraussichtlich nur in geringem Ausmaß zur klimaverträglichen Deckung des

³⁷ Ein Beispiel sind populationsstützende Artenhilfsprogramme. Diese sollten auch in der umgebenden Land- und Forstwirtschaft oder regional in den – parallel zu den Windenergie-Vorranggebieten ausgewiesenen – Artenschutz-Vorranggebieten verwirklicht werden.

³⁸ Blew et al., 2019; Deutscher Naturschutzring et al., 2020.

³⁹ Entsprechend hätten Naturschutzbelange etwa dann gegenüber dem Ausbau erneuerbarer Energie Vorrang, wenn ein konkretes Projekt das irreversible überregionale Verschwinden von Biodiversität zur Folge hätte.

⁴⁰ Arneth et al., 2020; Creutzig et al., 2021.

⁴¹ IPCC, 2018; Román-Palacios & Wiens, 2020.

⁴² Die heimische Artenvielfalt z. B. von Insekten geht einher mit kleinteiliger Naturlandpflege und traditionellem Anbau von Kulturpflanzen (Segerer & Rosenkranz, 2018).

⁴³ Entwässerte organische Böden sind mit 47 Mt pro Jahr CO₂-Äquivalenten gesamt (davon 37,5 Mt pro Jahr aus Acker- und Grünland) auch in Deutschland Hotspots für Treibhausgasemissionen. Das sind fast 6 % aller deutschen Emissionen. Durch Wiedervernässung können sie in effektive CO₂-Senken verwandelt werden (UBA, 2020a).

⁴⁴ Repenning et al. (2015) schreiben beispielsweise: „Damit zeigt sich deutlich, dass mit einer Umwandlung von Ackerflächen auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen eine zwei- bis dreifach höhere THG-Reduktion erreicht werden kann als mit dem Anbau von Bioenergie.“

⁴⁵ 2019 wurden in Deutschland 21 % der Ackerfläche bzw. 15 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche für Energiegewinnung und zum Anbau nachwachsender Rohstoffe genutzt (Deutscher Bauernverband, 2020).

globalen Energiebedarfs beitragen.⁴⁶ Weltweit besteht nur dann Potenzial für den Anbau von Energiepflanzen in nennenswertem Umfang, wenn der Flächenbedarf für die Produktion tierischer Nahrungsmittel durch die weitgehende Umstellung auf pflanzliche Ernährung drastisch zurückgeht.⁴⁷ Die Subventionierung von Biotreibstoffen und deren Bewertung als klimaneutral sind umgehend einzustellen.⁴⁸ Aus dem Ausland sollte Biomasse für Energiegewinnung und Baustoffe nur dann importiert werden, wenn diese aus kontrolliert nachhaltigem Anbau stammt. Beides ist notwendig, um den Verlust von Regenwäldern als Lebensraum und CO₂-Senke zu stoppen.^{49,50}

Die verbleibende Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung sollte zeitlich flexibilisiert werden, damit der Einsatz in den Stunden stattfindet, in denen der Bedarf nicht direkt durch Wind und Solarenergie gedeckt werden kann⁵¹. Mittel- bis langfristig sollte Biomasse hauptsächlich in Bereichen eingesetzt werden, in denen sie langfristig stofflich genutzt wird, z. B. in der Baubranche oder als Grundstoff für die chemische Industrie. Durch eine Umstellung auf pflanzenbasierte Ernährung kann die Flächenkonkurrenz global reduziert werden, so dass dann trotz wachsender Weltbevölkerung auch bedeutende Anteile an biobasierten Produkten bei gleichzeitig nachhaltiger Landwirtschaft möglich werden.⁵²

Aufgrund der wesentlich höheren Flächennutzungseffizienz im Vergleich zu Energiepflanzen⁵³ ist es sinnvoll, den Betrieb von großen Solaranlagen auch auf einem Teil

⁴⁶ Generell werden Lebenszyklusanalysen von Energieträgern auf Basis von Biomasse kontrovers diskutiert, und es werden unterschiedliche Ergebnisse publiziert, je nachdem, welche Umwelteffekte berücksichtigt werden und welche Biomasse betrachtet wird. Weiterhin spielt auch die geographische Lage eine große Rolle (Hanaki et al., 2018). In Hanssen et al. (2020) wird Biomasse-Nutzung bei Anwendung von carbon capture and storage (BECCS) global bis zu einer maximalen Gesamtmenge von 7800TWh pro Jahr (30-Jahre-Horizont) bzw. 61000TWh pro Jahr (80-Jahre-Horizont) als Netto-Negativ-Emissions-Technologie angesehen, wobei letztere Zahl schon bedeutet, dass ca. 5–16% der gesamten Landfläche der Erde hierfür genutzt werden. (Zum Vergleich: globaler Energiebedarf: 125000TWh pro Jahr in 2020) Bei höherer Nutzung geht energetische Biomasse-Nutzung mit Netto-Emissionen an Treibhausgasen einher, auch wenn diese gegebenenfalls geringer sind als bei fossilen Energieträgern.

⁴⁷ Pfennig, 2019. Eine detaillierte Beschreibung sowie Politik-Strategien zur Adressierung der Flächenkonflikte finden sich zudem im aktuellen Gutachten „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“ (WBGU 2020).

⁴⁸ Raven, 2021.

⁴⁹ Covey et. al., 2021.

⁵⁰ Biotreibstoffbeimischungen (z. B. für B5 oder E10) werden überwiegend aus Palmöl, Raps, Weizen, Soja, Zuckerrohr oder Zuckerrüben hergestellt. Deren Anbau führt vor allem in Argentinien, Brasilien, Malaysia und Indonesien zu Regenwaldzerstörung, Landraub, Vertreibung, Boden- und Lebensraumvernichtung (Bowyer, 2010). Die Zerstörung von Regenwaldgebieten im Amazonas kann zudem zu einem Kipp-Punkt beitragen, durch den große Teile des restlichen Amazonasgebietes abbrennen können.

⁵¹ Heute laufen z. B. Biogasanlagen häufig kontinuierlich das ganze Jahr durch. Durch einen zeitlich flexiblen Betrieb kann energetische Biomassenutzung Wind- und Solarenergie gut ergänzen.

⁵² Pfennig 2019.

⁵³ Die Flächennutzungseffizienz von Photovoltaik ist ca. 15-mal so hoch wie die von Energiepflanzen. Der Flächenertrag einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Deutschland beträgt ca. 750MWh/ha (bei 980kWh/(kW_p·a), wogegen z. B. Maisanbau Biogas mit einem Primärenergiegehalt von ca. 40–60MWh/ha liefert. Bezogen auf die elektrische Leistung (mit Biogas aus Maisanbau können ca. 15–22MWh_{el}/ha gewonnen werden) ist die Flächennutzungseffizienz von Photovoltaik sogar um das 30- bis 45-fache höher (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2021; Kelm et al., 2019).

der landwirtschaftlichen Flächen zuzulassen.⁵⁴ Die gesamte energetisch genutzte Landwirtschaftsfläche müsste hierdurch nicht steigen. Es ist dabei sinnvoll, solche Solaranlagen besonders zu fördern, die z. B. mit dem Anbau von Nahrungsmitteln auf gleicher Fläche (Agri-Photovoltaik)⁵⁵ oder mit Naturschutzzwecken⁵⁶ kombiniert werden. In Windparks kann der Platz zwischen den Anlagen für Landwirtschaft oder andere Zwecke genutzt werden.⁵⁷

5. Reduktion des Energiebedarfs

Je mehr Energie eingespart wird, desto einfacher wird es sein, bis 2035 eine klimaverträgliche Energieversorgung aufzubauen. Durch Energieeinsparung sinkt der Gesamt-Zubaubedarf an Speichern und regenerativer Erzeugungskapazität. Gleichzeitig nimmt der Anteil fossiler Erzeugung schneller ab. Einsparungen lassen sich durch technische Maßnahmen (Effizienzverbesserungen) oder soziale und individuelle Maßnahmen (Verhaltensänderungen) erreichen.

Große Einsparmöglichkeiten gibt es beim Heizenergiebedarf durch Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung aus Abluft und Abwasser (siehe [Abschnitt III/8, „Wärmeversorgung“](#)).

Auch der Mobilitätssektor bietet großes Potenzial, Energie einzusparen. Dies kann durch Vermeidung⁵⁸ und Veränderung geschehen. Neben der im nächsten Abschnitt beschriebenen Elektrifizierung des Verkehrs sind regional die Förderung des Umstiegs vom Auto- auf Fuß- und Radverkehr sowie ÖPNV und die Etablierung von Städten der kurzen Wege wichtig. Überregional sind veränderte Rahmenbedingungen nötig, um Personen- und Güterverkehr vom Straßen- und Flugverkehr auf den Schienenverkehr zu verlagern. Dazu ist ein gut ausgebautes Bahnnetz mit optimierter Taktung sowie der Aufbau eines umfangreichen Nachtzugsystems notwendig.

Auch im Prozesswärmebereich gibt es hohe Einsparpotenziale (siehe [Abschnitt III/7, „Prozesswärme“](#)). Weitere nachfrageseitige Lösungen wie eine höhere Lebensdauer von Produkten, ein effizienteres Materialdesign, hohe Effizienzstandards in der Industrie, die Verringerung des Ressourceneinsatzes oder die Wiedernutzung von Ressourcen (Recycling, Kreislaufwirtschaft) können einen erheblichen Teil der Nachfrage nach Energie vermeiden⁵⁹ und die Qualität der Dienstleistungen für Endnutzer aufrechterhalten oder sogar verbessern.

⁵⁴ „Benachteiligte Flächen“ an Hanglagen oder mit geringem Ertrag oder Flächen in Trinkwasserschutzgebieten könnten bevorzugt werden.

⁵⁵ Trommsdorff et al., 2020.

⁵⁶ Freiflächen-Solaranlagen können bei entsprechender Planung zu einem deutlich positiven Effekt auf die Artenvielfalt führen (vgl. Peschel et al., 2019; Dialogforum Erneuerbare Energien und Naturschutz, 2020).

⁵⁷ Hau, 2016; Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2020.

⁵⁸ Ansätze zu Vermeidung von Verkehr und den daraus resultierenden Einsparpotenzialen finden sich z. B. in Profijt, 2018.

⁵⁹ Purr et al., 2019.

Private Haushalte sind der größte Einzelposten unter den Energieverbrauchern⁶⁰; die Lebensweise unserer Gesellschaft⁶¹ ist dabei ein bestimmender Faktor. Daher können Einsparungen durch Verhaltensänderungen einen wichtigen Beitrag leisten.

Im Bereich der öffentlichen Einrichtungen und Unternehmen sind Klima- und Lüftungsanlagen teilweise für bis zu 50% der Energiekosten verantwortlich.⁶² Alleine die Kältetechnik ist für ca. 14% des Stromverbrauchs in Deutschland verantwortlich.⁶³ Es ist zu erwarten, dass die Anpassung an die Erderwärmung eine Erhöhung des Energiebedarfs für Lüftung und Kältetechnik mit sich bringt. Hier sind effiziente und suffiziente Lösungen geboten. Auch im privaten Bereich ist mit einem Mehrbedarf an Energie zu rechnen.

Die notwendige Reduzierung der Treibhausgase im Energiesektor auf Null kann aber nicht durch freiwillige Verhaltensänderungen herbeigeführt werden. Staatliches Handeln erreicht eine höhere Wirksamkeit und ist daher unabdingbar.⁶⁴ Dies umfasst unter anderem Rahmenbedingungen, Infrastrukturen und Anreizsysteme, z. B. höhere und konsistente CO₂-Preise, die Rebound-Effekte vermeiden, welche in der Vergangenheit Einsparungen durch Effizienzgewinne und Verhaltensänderungen häufig zunichtegemacht haben.⁶⁵

6. Transport- und Mobilitätssektor

Im Zentrum eines CO₂-neutralen Mobilitätssektors stehen gute Bedingungen für den Fuß- und Radverkehr, ein gut ausgebauter öffentlicher Nahverkehr sowie ein leistungsfähiges Bahnsystem im Personen- und Güterverkehr. Dem Ausbau der dafür notwendigen lokalen, nationalen und europäischen Infrastruktur ist Vorrang einzuräumen. Ein effektiver Personennahverkehr braucht insbesondere im ländlichen Raum Innovationen, die jedoch in Form von Rufbussen, autonom fahrenden Fahrzeugen, Ridesharing und Carsharing bereits absehbar sind.

⁶⁰ Dies trifft zu bei Berücksichtigung der privaten Mobilität in Ergänzung zum Wärme- und Elektrizitätsbedarf.

⁶¹ Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, 2011.

⁶² BMWi, 2017.

⁶³ Richter et al., 2014.

⁶⁴ Zu tiefgreifendem „freiwilligem Verzicht“ ist vermutlich nur eine Minderheit motiviert. Eine Strategie, die überwiegend auf freiwilligen Verzicht setzt, hat außerdem intrinsische Schwächen: (i) sie überfordert den einzelnen, (ii) systemische Effekte können die positiven individuellen Effekte konterkarieren und (iii) sie stellt privates Handeln unter einen Erwartungsdruck, der mit einem freiheitlichen Gesellschaftsbild schwer vereinbar ist (Grunwald 2010). Eine höhere Akzeptanz bei höherer Wirksamkeit können Politikmaßnahmen eines „gestaltenden Staates“ haben durch Ermöglichen und Fördern von energiesparendem und ressourcenschonendem Verhalten (Linz, 2015). Gleichzeitig können durch Abschaffung von Subventionen oder durch Belastungen wie Steuern und Abgaben bzw. durch Setzung von Standards hohe Energie- und Ressourcenverbräuche entmutigt werden. Beispiele für solche und weitere Politikmaßnahmen finden sich in Linz (2015) und Fischer et al. (2020). In Petschow et al. (2018) werden weitergehende Reformvorschläge diskutiert, wie die Wachstumsabhängigkeit verringert werden kann, um gesellschaftliches Wohlergehen innerhalb planetarer Grenzen zu ermöglichen.

⁶⁵ In Deutschland liegt der Endenergieverbrauch trotz vielfältiger Effizienzmaßnahmen in den Jahren 1990–2018 relativ konstant bei 2500 ± 100 TWh/Jahr (UBA, 2020b). Zur Ausgestaltung von Politikmaßnahmen, die unerwünschte Rebound-Effekte vermeiden, siehe z. B. Haan et al. (2015).

Neben der Verlagerung und Einsparung von Verkehr (siehe auch [Abschnitt III/5](#), „Reduktion des Energiebedarfs“) kann durch die direkte Nutzung regenerativer elektrischer Energie eine deutliche höhere Energieeffizienz erreicht werden. Zur kosteneffizienten Transformation des Energiesystems in Richtung 100% erneuerbare Energien ist daher im Mobilitätssektor eine weitgehende Umstellung auf die Nutzung elektrischer Energie sinnvoll.⁶⁶ Die folgenden Maßnahmen bilden wichtige Bausteine.

- Im Bahnverkehr sollten möglichst viele Strecken elektrifiziert werden. Auch im Nahverkehr sollte elektrischen Lösungen (Straßenbahn, Busse mit Oberleitung oder Batterie) Vorrang eingeräumt werden.
- Eine weitgehende Elektrifizierung des Mobilitätssektors ist jetzt schon für Pkw und leichte Lkw über batterieelektrische Fahrzeuge möglich und hocheffizient. Dies ermöglicht außerdem eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie⁶⁷.
- Ein gut ausgebautes Netz von Ladestationen sowie Oberleitungen⁶⁸ für Lkw kann die Elektrifizierung beschleunigen.
- Aufgrund der langen Nutzungszeit sollte bei Neuanschaffungen auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor möglichst verzichtet werden. Um Fehlinvestitionen zu vermeiden, ist daher ein sehr schneller Hochlauf der E-Fahrzeug-Produktion notwendig.

Der Energiebedarf pro Strecke dieser Bereiche des Mobilitätssektors sinkt durch Elektrifizierung um ca. den Faktor drei bis vier.⁶⁹ Bei einer Lebenszyklusbetrachtung, d.h. einschließlich Herstellung und Entsorgung, wird dieser Vorteil geringer.⁷⁰

⁶⁶Die direkte Nutzung von hier erzeugtem Strom ist nicht nur effizienter, sondern auch preisgünstiger: Die Kosten für synthetische Kraftstoffe wie Methan oder Methanol liegen laut Ram et al. (2020a) voraussichtlich 2030 bei 120–140€/MWh und können bis 2050 auf 45–75€/MWh sinken. Damit sind sie höher als die Stromerzeugungskosten in Deutschland.

⁶⁷Ausreichende Ressourcen sind für einen solchen Weg vorhanden. Über eine Kopplung der Fahrzeugbatterien an das Stromnetz kann nicht nur netzdienlich geladen werden, sondern bei Bedarf das Netz auch durch Einspeisung stabilisiert werden („vehicle2grid“, V2G).

⁶⁸Eine Alternative zu Oberleitungen ist das induktive Laden während der Fahrt. Eine großflächige Anwendung in den nächsten 10–15 Jahren ist jedoch unwahrscheinlich, da Oberleitungssysteme einfacher nachrüstbar sind und einen höheren technologischen Reifegrad aufweisen.

⁶⁹Bezogen auf Rohstoff zur Straße („well-to-wheel“, WTW) ohne Berücksichtigung der Fahrzeug- und Batterieproduktion oder Rohölförderung (Bergk et al., 2016; Hoekstra & Steinbuch, 2020). In Haendchke & Deutsche Energie-Agentur (2011) wird der Prozess in der Raffinerie beschrieben. WTW E-Auto beträgt ca. 80%, Verbrenner unter 26%, signifikante Abweichungen entstehen insbesondere durch die Fahrweise.

⁷⁰In Hoekstra & Steinbuch (2020) wird der CO₂-Ausstoß z. B. für die Batterieproduktion und den Betrieb des Fahrzeuges betrachtet. Für Pkw in der eGolf- bzw. Tesla-Klasse reduziert sich der Vorteil der Elektrifizierung z. B. auf einen Faktor 2–3. Dies bedeutet, dass auch für batterieelektrische Fahrzeuge Netto-Treibhausgas-Emissionen für Produktion und für die Elektrizitätsbereitstellung anfallen, auch wenn diese perspektivisch sinken. Zusätzlich zur CO₂-Bilanz sind u. a. auch Verbräuche an Rohstoffen und deren zunehmende Verknappung sowie Feinstaub-Emissionen zu berücksichtigen. Daher spricht viel dafür, Pkw-Besitz und -nutzung insgesamt zu reduzieren (Helms et al., 2016; Cox et al., 2020).

Für absehbar nicht elektrifizierbare Bereiche wie den interkontinentalen Schiffs- und Flugverkehr⁷¹ ist der Einsatz synthetischer Energieträger notwendig. Der Flugverkehr verursacht insbesondere durch verstärkte Wolkenbildung einen deutlich höheren Treibhausgaseffekt als durch die reinen CO₂-Emissionen.⁷² Aus diesem Grund kann eine Reduktion des Flugverkehrs durch gute Alternativangebote überproportional zum Klimaschutz beitragen. Eine rein CO₂-neutrale Herstellung von synthetischem Kerosin führt nicht zur Klimaneutralität.

7. Prozesswärme und prozessbedingte CO₂-Emissionen

Die Einsparpotenziale im Bereich der Prozesswärme sind sehr heterogen. Während einige Sparten diese Potenziale bereits weitgehend ausgeschöpft haben, bestehen in anderen noch hohe, bedeutende Verbesserungsmöglichkeiten, die genutzt werden sollten.⁷³

Soweit möglich sollte die Prozesswärme, die nicht solar- oder geothermisch bereitgestellt werden kann,⁷⁴ auf regenerativ erzeugte elektrische Energie umgestellt werden. Die Elektrifizierung dieses Sektors kann aufgrund der benötigten, meist hohen Temperaturen in industriellen Prozessen allerdings nur zum Teil mittels (Hochtemperatur-)Wärmepumpen erfolgen. Über den direkten Einsatz von Elektrizität können alle notwendigen Temperaturen erreicht werden. Darüber hinaus können feste Biomasse (aus Reststoffen), Biogas aus Abfällen und nicht zuletzt Wasserstoff genutzt werden⁷⁵ (siehe hierzu die Abschnitte III/9, „Wasserstoff und Syntheseprodukte“ sowie III/4, „Biomasse und ökologische Zielkonflikte“).

Neben den Emissionen durch Strom- und Wärmebereitstellung entstehen in manchen Industriesektoren prozessbedingte CO₂-Emissionen durch chemische Reaktionen (z. B. in der Zement- oder Eisen- und Stahlerzeugung).⁷⁶ Außerdem werden Erdgas und Erdöl-Produkte als zentrale Grundstoffe in der chemischen Industrie eingesetzt. Um diese Emissionen zu vermeiden oder zumindest weitgehend zu reduzieren, müssen viele Prozesse auf andere Produktionsverfahren und Ausgangsstoffe, v. a. in der Grundstoffindustrie, umgestellt werden. Zusätzlich sollten möglichst CO₂-neutrale oder – falls nicht möglich – CO₂-reduzierte Alternativmaterialien genutzt werden. Im Beispielfall von Zement können je nach Anwendung u. a. Holz, kalzinierte Tone oder Gradientenbeton eingesetzt werden. Eine Umstellung der Energiequellen

⁷¹ Vgl. Gössling et al., 2021.

⁷² Lee et al., 2021.

⁷³ Beispiele sind Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung energieeffizienter Technik, Optimierung von Verfahren und Prozessen, Wärmedämmung sowie Abwärmenutzung.

⁷⁴ Zum Potenzial der Bereitstellung von Solarwärme in industrielle Prozesse in Deutschland siehe z. B. Lauterbach et al. (2014).

⁷⁵ Prognos et al., 2020: „Klimaneutrales Deutschland“.

⁷⁶ Auch die Emissionen weiterer Treibhausgase wie z. B. N₂O, Methan und F-Gase (= (teil-)fluorierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid) sind zu reduzieren (vgl. UBA, 2021).

und Erhöhung der Energieeffizienz reichen in diesem Bereich also nicht aus⁷⁷, sondern es werden zudem neue industrielle Produktionsprozesse benötigt.⁷⁸

8. Wärmeversorgung

Der Wärmeverbrauch in privaten Haushalten, Gewerbe und Industrie macht heute etwas mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs in Deutschland aus.⁷⁹ Dieser verteilt sich auf ca. 50% Raumwärme, 10% Warmwasser und 40% Prozesswärme.⁸⁰ Der Wärmebedarf von Wohngebäuden ist im Winter je nach Wärmedämmstandard etwa um einen Faktor zwei (Passivhaus) bis zehn (Bestandsgebäude) höher als im Sommer. Dies ist beim Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung für eine elektrifizierte Wärmeversorgung durch einen entsprechenden Anteil von Windkraft – welche eine höhere Energiemenge im Winter liefert – zu berücksichtigen.⁸¹

Die am besten geeigneten Möglichkeiten zur klimaverträglichen Deckung des Wärmebedarfs sind:

- Alle größeren Kommunen benötigen eine Wärmeleitplanung⁸², in der festgelegt wird, in welchen Quartieren die Wärmeversorgung zentral oder dezentral erfolgen soll. Dabei sind Gebäude und Siedlungsstruktur sowie mögliche Wärme- und Abwärmequellen zu berücksichtigen. Es ist sinnvoll, Wärmenetze insbesondere in dicht bebauten Gebieten und in der Nähe geeigneter Wärmequellen zu verdichten oder auszubauen.
- Im privaten und gewerblichen Gebäudebestand sind Wärmedämmung, Wärmerückgewinnung aus Abluft und Abwasser und andere effizienzsteigernde Maßnahmen⁸³ notwendig, um den Heizenergiebedarf deutlich zu reduzieren.
- Einsparungen durch Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle sind normalerweise größer als jene durch Heizungstausch.⁸⁴ Auch werden dadurch

⁷⁷ Nicht für alle Anwendungen ist absehbar, wann die Prozesse umgestellt oder die entsprechenden Materialien ersetzt werden können und so eine Industrie- (Joas et al., 2019) oder auch Nahrungsmittelproduktion mit minimalen Treibhausgasemissionen erreicht werden kann. Um unvermeidbare Emissionen auszugleichen, sind Negativ-Emissionen erforderlich.

⁷⁸ Joas et al., 2019 (für Stahl, Chemie und Zement, die Quelle bezieht sich auf den gesamten Absatz).

⁷⁹ AGE, 2020.

⁸⁰ AGE, 2020.

⁸¹ Windkraft erzeugt in Deutschland in den vier kältesten Monaten ca. doppelt so viel Energie wie in den vier wärmsten Monaten. Die Erzeugung durch Photovoltaik geht hingegen in den vier kältesten Monaten stark zurück, in diesen Monaten wird nur ein Fünftel der Energie erzeugt, die in den vier wärmsten Monaten erzeugt wird (Burger, 2021). Details werden beschrieben in Ruhnau et al., 2020 und Kaspar et al., 2019.

⁸² Die Wärmeleitplanung führt nicht nur zu einem effizienten Betrieb, sondern auch zu optimierten Kosten (Chittum & Østergaard, 2014, Clausen et al., 2021). Zur kommunalen Wärmeleitplanung in Deutschland siehe z. B. Maier (2016), zu Wärmegestehungskosten europaweit z. B. Persson et al. (2019).

⁸³ Beispiele sind hocheffiziente Pumpen, hydraulischer Abgleich, verbesserte Steuerung und Regelung, Absenkung der Vorlauftemperatur oder Dämmung der Heizungsrohre.

⁸⁴ So kann bei der Sanierung der Gebäudehülle und Lüftung mit Wärmerückgewinnung der Wärmebedarf und damit die CO₂-Emissionen eines Gebäudes je nach Ausgangssituation um 30% bis 80% gesenkt werden, während beim Tausch einer Gasheizung gegen eine Wärmepumpenheizung die CO₂-Emissionen mit heutigem Strommix um etwa 30% gesenkt werden (Annahmen: Gasbrennwert, Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl ca. 3, Strommix 400g CO₂/kWh [= Ist-Wert 2019]). Die CO₂-Emissionen der Wärmepumpenvariante verbessern

niedrigere Heizungs-Systemtemperaturen ermöglicht, die für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe ein wichtiger Faktor sind. Eine Kombination aus Gebäudeenergieeffizienz und Deckung des Restbedarfs aus erneuerbaren Energien erweist sich sowohl volkswirtschaftlich⁸⁵ als auch für das einzelne Gebäude als robuste Strategie.⁸⁶

- Bei Sanierungen sollten Dämmrestriktionen (beispielsweise erhaltenswerte Fassaden) gebäudespezifisch analysiert werden. Innendämmung und andere Ansätze⁸⁷ ermöglichen auch in diesen Gebäuden eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz.
- Auch die Frage, inwieweit solarenergetische Anlagen den Charakter denkmalgeschützter Gebäuden oder Ensembles beeinträchtigen, kann und sollte neu bewertet werden. So werden z. B. Parkplätze, obwohl sie den historischen Charakter stark beeinträchtigen, traditionell als denkmalschutzkonform bewertet.
- Um eine klimaverträgliche Wärmeversorgung möglichst kostensparend zu gewährleisten, sollte jede Sanierungsmöglichkeit bestmöglich genutzt werden. Schrittweise Sanierungen sollten beispielsweise im Rahmen eines Sanierungsfahrplans von Gebäudeenergieexpert:innen in der Regel verpflichtend begleitet werden, damit die Einzelmaßnahmen mit dem Klimaschutzziel kompatibel ausgestaltet und Fehlinvestitionen vermieden werden.
- Neubauten sollten schon heute so ausgestaltet werden, dass sie die Anforderungen eines nahezu klimaneutralen Gebäudes erfüllen. Hierzu gehören insbesondere ein maximaler Einsatz von erneuerbaren Energien inklusive Solarenergienutzung und eine hocheffiziente Gebäudehülle. Auch eine optimierte Gebäudegeometrie, eine flächensparende Ausgestaltung des Gebäudekonzeptes und die Verwendung von klimaschonenden Baumaterialien gehören zu einer zukunftsorientierten Gebäudeplanung.
- Für die dezentrale Wärmebereitstellung sind mit erneuerbarem Strom betriebene Wärmepumpen⁸⁸, gegebenenfalls ergänzt durch Solarthermie, oft die beste Lösung.
- Vorhandene Wärmenetze (Fern- und Nahwärme) und Wärmeverteilssysteme auf der Verbraucherseite (Gebäude, Heizungsanlage) sollten sukzessive auf niedrigere Temperaturen umgestellt und optimiert werden. Neue Netze sollten bereits als Niedertemperaturnetze gebaut werden.

sich bei einem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien weiter, bis hin zu einer fast emissionsfreien Wärmeversorgung sobald die Stromproduktion CO₂-frei ist.

⁸⁵ ifeu et al., 2018.

⁸⁶ Thamling et al., 2015.

⁸⁷ Zum Beispiel durch Zonierung und Ausrichtung, d. h. Räume mit höherem Wärmebedarf (aufgrund bevorzugter Aufenthaltszeiten) werden in gemeinsamen Zonen zusammengefasst, die so ausgerichtet sind, dass solare Wärme (Einstrahlung durch Fenster) optimal genutzt wird.

⁸⁸ In bisher diskutierten Szenarien werden häufig Installationszahlen für Wärmepumpen genannt (Fokus auf Neubau), die nicht für eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien ausreichen (Fraunhofer IWES & IBP, 2017). Laborwerte für Wärmepumpen sind in BAFA (2020) zu finden. Auswertungen von Feldtest sind in Günther et al. (2020) beschrieben. Dabei erreichten in der Messperiode 2018/2019 Luft-Wärmepumpen eine mittlere Jahresarbeitszahl von 3,1 und Erdreich-Wärmepumpen eine mittlere Jahresarbeitszahl von 4.

- Bei der Planung neuer und der Modernisierung vorhandener Wärmenetze ist zu berücksichtigen, dass die zur Verfügung stehenden Mengen an Abfall und nachhaltiger Biomasse zukünftig abnehmen werden.
- In Zeiten, in denen das Stromangebot den Bedarf (inklusive des Betriebs von Wärmepumpen) übersteigt, kann elektrische Energie zur Wärmezeugung auch über preiswerte, allerdings ineffiziente elektrische Heizstäbe in Wärmespeichern genutzt werden. So können Überschüsse, die an wenigen hundert Stunden im Jahr auftreten und ansonsten abgeregelt werden müssten, sinnvoll und preiswert genutzt werden.
- Besonders in dicht besiedelten Gebieten müssen Wärmenetze deutlich ausgebaut werden.

Kommunale Planer könnten von Fortbildungen und fachlicher Unterstützung zu nachhaltigem Bauen und Planen profitieren, um vorhandene Lenkungsmöglichkeiten für klimafreundliches Bauen und Wärmeversorgung besser einsetzen zu können. Durch Wärmeverbände als Quartierslösungen oder durch Fernwärmenetze lassen sich verschiedene Wärmequellen, Speicher und Verbraucher miteinander koppeln. Nahezu 40% des Wärmebedarfs im Gebäudesektor lassen sich durch Wärmenetze decken.⁸⁹ So kann ein Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage geschaffen werden. Wärmeverbände eröffnen den Zugang zu Wärmepotenzialen, die in Versorgungsanlagen für Einzelgebäude nicht genutzt werden können, wie z. B. Großwärmepumpen⁹⁰ zur Nutzung von Umweltwärme oder Abwärme aus Industrie und Gewerbe, Abwasser, Solarthermie⁹¹ und tiefengeothermische Wärme, Klärschlamm⁹² sowie (in zukünftig abnehmender Menge) Biomasse und Abfall.⁹³ Diese Wärmequellen lassen sich in der Regel durch größere zentrale Wärmeversorgungs-Technologien sinnvoller und umweltschonender als durch dezentrale Anlagen bereitstellen.⁹⁴ Gründe dafür sind insbesondere die professionelle Anlagenüberwachung und der Einsatz von Filteranlagen. Außerdem können sehr große Wärmespeicher eingesetzt werden, um saisonale Schwankungen auszugleichen.⁹⁵

Bestandsnetze sollten möglichst schnell auf eine vollständig regenerative Versorgung mit möglichst geringem Anteil an Biomasse umgestellt werden.

Um Fehlentwicklungen zu verhindern, sollten die bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) entstehenden CO₂-Emissionen realistisch auf die Produkte Wärme und Strom aufgeteilt werden. Nach den derzeitigen Regeln werden Strom und Wärme nach unterschiedlichen Methoden bewertet, so dass die rechnerische

⁸⁹ Sterchele et al., 2020.

⁹⁰ Primärwärmequellen können Gewässer sein. Um Kontamination zu verhindern, kann z. B. das Flüssigeis-Verfahren verwendet werden (ILK Dresden, 2017).

⁹¹ Trier et al., 2018; Danish District Heating Association & PlanEnergi, 2018.

⁹² Mathisen et al., 2019.

⁹³ Grosse et al., 2017.

⁹⁴ Hintemann & Clausen, 2018.

⁹⁵ Ein Überblick über saisonale Warmwasserspeicher findet sich z. B. in Mangold & Deschaintre (2015), neuere dänische Saisonspeicher sind z. B. in Sørensen & Schmidt (2018) beschrieben.

Summe der CO₂-Emissionen deutlich niedriger ist als die realen Emissionen.⁹⁶ Auch durch die Subventionen im KWK-Gesetz werden mit fossilen Brennstoffen betriebene KWK-Anlagen bevorteilt.

Insgesamt bewirken die gesetzlichen Regelungen eine Marktverzerrung, welche klimafreundliche, erneuerbare Lösungen gegenüber mit fossilen Brennstoffen betriebenen KWK-Anlagen benachteiligen können. Die Regelungen sollten daher zugunsten einer konsequenten Steuerung im Hinblick auf Klimaneutralität umgestaltet werden⁹⁷.

Wärmepumpen können sowohl in der dezentralen Wärmebereitstellung als auch in Quartierskonzepten verwendet werden. Sie können je nach Einsatzbedingungen das 1,5- bis 5,4-fache der aufgewandten elektrischen Energie als Wärme bereitstellen.⁹⁸ Anders als bei herkömmlichen Heizungsanlagen hat die Systemauslegung einen sehr hohen Einfluss auf die Effizienz der Gesamtanlage. Die wichtigsten Punkte für einen effizienten Einsatz von Wärmepumpen sind:

- Es sollten möglichst Wärmequellen verwendet werden, die in der Heizperiode die notwendige Wärmemenge bei Temperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur bereitstellen, z. B. Erdreich, Grundwasser, Gewässer oder Abwärme.⁹⁹
- Die verwendeten Wärmepumpen sollten eine möglichst hohe Geräteeffizienz aufweisen.
- Die Hydraulik und die Regelung müssen an die jeweilige Anlage angepasst werden, um eine möglichst niedrige Heizungs-Systemtemperatur zu erreichen. Für dieses komplexe Thema sind Schulungen für Heizungsinstallateure wichtig.

Mittels lokaler Wärmespeicherung¹⁰⁰ kann eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch erfolgen. Dies ermöglicht, Wärmepumpen als flexible Verbraucher einzusetzen, und kann die Effizienz der gesamten Energieversorgung deutlich

⁹⁶Die Anteile der Fernwärme bei der Brennstoffaufteilung schwanken je nach Methode zwischen 62% und 10% (Mauch et al., 2010). Die CO₂-Emissionen der Wärme werden nach dem GEG mit der Stromgutschriftmethode berechnet. Dabei können sich rechnerisch für die Wärme sogar negative Emissionen ergeben, während dem Strom die Emissionen eines Kohlekraftwerks zugeschrieben werden. ETS-Zertifikate für den Strom werden aber mit einer Wirkungsgradmethode berechnet, bei der die Emissionen gleichmäßiger verteilt werden. Prinzipiell sind beide Methoden anwendbar, aber es muss dieselbe Methode auf beide Produkte angewandt werden, damit die Gesamtbilanz stimmt. Laut Sandrock et al. (2020) S.58 ergibt sich im Mittel für die Fernwärme in Deutschland ein Emissionswert von 317 g CO₂ je kWh Fernwärme. Der Wert ist höher als der Emissionswert einer modernen Gasheizung.

⁹⁷Einen Überblick über ein mögliches politisches Instrumentarium zur Förderung der Wärmewende bieten Clausen & Fichter (2020) sowie, mit speziellem Fokus auf Wärmenetze, auch Agora Energiewende (2019, S.21ff).

⁹⁸Jahresarbeitszahlen liegen im Bereich 1,5–5,4. Die mittlere Jahresarbeitszahl von 2018–2019 im Projekt „WP smart im Bestand“ untersuchten Luftwärmepumpen lag bei 3,1 und von Erdreich-Wärmepumpen lag sie bei 4,1 (2020).

⁹⁹Bei begrenzten Finanzmitteln sind allerdings ein höherer Gebäude-Energieeffizienzstandard und eine effizientere Wärmequelle gegeneinander abzuwägen. So hat ein nach GEG-Mindestanforderungen gebautes Einfamilienhaus (Wärmebedarf ca. 100 kWh/(m²·a)) mit einer Erdwärmepumpe (Jahresarbeitszahl ca. 4,5) einen ca. doppelt so hohen Heizstrombedarf wie ein Passivhaus (ca. 15 kWh/(m²·a)) mit einer Luftwärmepumpe (Jahresarbeitszahl ca. 3,5).

¹⁰⁰Zur Wärmespeicherung kann auch die Speichermasse des Gebäudes genutzt werden.

steigern. Außerdem sollten Wärmepumpen schnellstmöglich auf Kältemittel mit vernachlässigbarem Treibhauspotenzial umgestellt werden.

9. Wasserstoff und Syntheseprodukte

Die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom wird in der zukünftigen klimaverträglichen Energieversorgung und Industrie eine bedeutende Rolle spielen, und zwar dann, wenn die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom nicht möglich sein wird.¹⁰¹ Wasserstoff in direkter oder indirekter Form (d. h. in Form von aus Wasserstoff abgeleiteten Syntheseprodukten wie z. B. Methanol oder Ammoniak) wird insbesondere in den folgenden Bereichen benötigt:

- zur Bereitstellung von Kraftstoffen für Verkehrsmittel, die vorerst nicht direkt über Leitungen oder Batterien elektrisch betrieben werden können (z. B. Flugzeuge, Schiffe, Regionalzüge¹⁰², etc.),
- in der Industrie als Basismaterial (z. B. zur Herstellung von bisher auf fossiler Basis hergestellten Grundstoffen) oder Reduktionsmittel (z. B. Stahlindustrie),
- für Prozesswärme welche nicht durch direkte Nutzung von Strom erzeugt werden kann, sowie
- als Energiespeicher für die Stromerzeugung als Möglichkeit zum Ausgleich der variierenden erneuerbaren Energie.

Insgesamt ist die Nutzung von Wasserstoff nur zielführend, wenn dieser klimaneutral und umweltfreundlich hergestellt wird. Bei Wasserstoffherstellung aus Erdgas („blauer“ oder „türkiser“ Wasserstoff)¹⁰³ ist insbesondere die Methanemission bei der Erdgasförderung und beim Transport sowie der langfristigen klimaneutralen Lagerung von CO₂ bzw. Kohlenstoff zu berücksichtigen.¹⁰⁴ Dabei ist insbesondere „blauer“ Wasserstoff (Herstellung aus Erdgas unter Abscheidung und Einlagerung des entstehenden CO₂, d. h. durch „carbon capture and storage“, CCS) als kritisch einzuschätzen. CCS ist teuer und risikoreich¹⁰⁵, und man sollte es daher nur in solchen Fällen nutzen, für die eine andere Form der Dekarbonisierung nicht möglich ist. Auch

¹⁰¹ Purr et al., 2019; Die Kosten für synthetische Kraftstoffe wie Methan oder Methanol liegen laut Ram et al. (2020a) voraussichtlich 2030 bei 120–140€/MWh und können bis 2050 auf 45–75€/MWh sinken. Damit sind sie höher als die Stromerzeugungskosten in Deutschland. Wenn Strom direkt genutzt werden kann, ist dies günstiger; wird ein synthetischer Kraftstoff benötigt, kann ein Import sinnvoll sein.

¹⁰² Mit fortschreitender Batterie-Technologie können zunehmend Bereiche, in denen nach heutigem Stand der Technik synthetische Kraftstoffe nötig sind, elektrifiziert werden. Zu nennen ist z. B. der Einsatz batteriebetriebener Züge auf Strecken ohne Oberleitung (Klebsch et al., 2020).

¹⁰³ Als „blauen“ Wasserstoff bezeichnet man aus Erdgas produzierten Wasserstoff, bei dem das entstehende CO₂ abgeschieden und gespeichert („sequestriert“) wird. Bei „türkischem“ Wasserstoff wird Methan in einem Pyrolyseprozess in Wasserstoff und Kohlenstoff zerlegt. Letzterer kann leichter dauerhaft festgelegt werden. „Grüner“ Wasserstoff wird über Elektrolyse mit erneuerbarem Strom hergestellt (BMBF, 2020).

¹⁰⁴ Zur Ökobilanz von synthetischem Wasserstoff, Methan, Methanol und Treibstoff in Abhängigkeit vom Strommix bis 2050 siehe Liebich (2019), für Kraftstoffe auch Helms et al. (2019).

¹⁰⁵ Das Risiko besteht darin, dass auf längere Zeit nicht mit hoher Sicherheit vorausgesagt werden kann, ob CO₂ entweicht und welche Folgen das hat. Um dieses Risiko zu adressieren könnte man zumindest eine Versicherung fordern. Dieses Risiko kann umgangen werden, wenn CO₂ nicht gasförmig, sondern weiterverarbeitet als reaktionsträger Feststoff gelagert wird (Breyer et al., 2020). Dieser weitere Prozessschritt erhöht den Kosten- und Energieaufwand.

ist Kernenergie zur Wasserstoffherstellung („pinker Wasserstoff“) nicht sinnvoll (siehe [Abschnitt III/10](#), „Kernenergie“).

Der derzeit geplante Ausbau regenerativer Stromerzeugung in Deutschland und die geplanten Importmengen von Wasserstoff reichen bei weitem nicht aus, um alle oben genannten Anwendungen vollständig mit elektrolytisch hergestelltem grünen Wasserstoff zu versorgen.

Deshalb ist die Verwendung von grünem Wasserstoff und daraus erzeugten synthetischen Energieträgern nicht in allen Bereichen sinnvoll, in denen es technisch möglich ist. Insbesondere für den Einsatz bei der Raumwärme und im Individualverkehr sind Lösungen mit Wärmepumpe und Wärmespeicherung sowie batterieelektrische Fahrzeuge in der Regel sinnvoller (und günstiger) als die Nutzung von Wasserstoff oder daraus erzeugten Brenn- bzw. Kraftstoffen, da diese aufgrund höherer Umwandlungsverluste ineffizienter bleiben.

Um die Deckung des unvermeidbaren Bedarfs sicherzustellen und die Technologieentwicklung sowie Marktintegration voranzutreiben, ist der beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energie mit höchster Priorität zu forcieren. Elektrolyseanlagen sind als flexible Verbraucher gut integrierbar.

Für die klimaverträgliche Produktion von z. B. Kunststoffen oder Flugkerosin werden kohlenstoffbasierte Grundstoffe wie Methanol oder Methan¹⁰⁶ benötigt. Für deren Synthese aus grünem Wasserstoff wird eine geeignete Kohlenstoffquelle wie Biomasse oder CO₂ benötigt. In einer klimaverträglichen Wirtschaft entfallen ertragreiche CO₂-Punktquellen¹⁰⁷ zunehmend, so dass für CO₂ perspektivisch auf die Gewinnung aus der Luft (Direct-Air-Capture, DAC) zurückgegriffen werden muss. Der DAC-Prozess ist kosten- und energieintensiv, es wird aber mit einer deutlichen Kostenreduktion gerechnet.¹⁰⁸ Der auf Biomasse basierende Pfad ist heute kostengünstiger, führt jedoch zu einem deutlich höheren Flächenbedarf, der nur durch drastische Umstellung der Ernährungsgewohnheiten befriedigt werden kann.¹⁰⁹ Die künftige Bedeutung der beiden Pfade (Biomasse/DAC) ist schwer abzuschätzen und hängt von der realisierten Nutzung, den benötigten Mengen, der Entwicklung von Technologien, der Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit sowie den daraus resultierenden Kosten der jeweiligen Produkte ab.¹¹⁰

¹⁰⁶ Schmidt et al., 2018.

¹⁰⁷ Die Zementindustrie könnte – in deutlich verringertem Umfang – eine Punktquelle bleiben.

¹⁰⁸ Ram et al., 2020a.

¹⁰⁹ Creutzig et al., 2015; Creutzig et al., 2019; Pfennig, 2019. Je höher der Flächenbedarf für energetisch oder stofflich genutzte Biomasse wird, desto ungünstiger fällt die Emissionsbilanz aus (Hanssen et al., 2020).

¹¹⁰ Für die Produktion von Bioethanol werden Flächen benötigt, die mit der Erzeugung von Nahrungsmitteln im Konflikt stehen, sofern sich nicht ein großer Teil der Menschen überwiegend vegan bzw. zumindest vegetarisch ernährt (siehe auch [Abschnitt III/4](#), „Biomasse und ökologische Zielkonflikte“). Nach Pfennig (2019) betragen die Kosten für Bioethanol heute ca. 50€/MWh, die für synthetisches Methanol liegen bei ca. 150€/MWh. Nach Ram et al. (2020a) besteht ein Kostenreduktionspotenzial für synthetisches Methanol bis 2050 auf unter 60€/MWh, wenn die Kosten aufgrund steigender Produktion entsprechend sinken. Siehe auch Creutzig et al. (2015).

10. Kernenergie

Die Diskussion um Kernenergie beinhaltet drei wesentliche Aspekte: die Laufzeitverlängerung bestehender Kernkraftwerke, den Neubau von Kernkraftwerken und die Hoffnung auf die Nutzung der Kernfusion.¹¹¹

Eine Laufzeitverlängerung der in Deutschland noch aktiven sechs Reaktoren ist nur theoretisch denkbar. Sie ist derzeit für die Betreiber der bestehenden Kraftwerke keine realistische Option, da die Planungen zum Ausstieg weit fortgeschritten sind, die rechtlichen Rahmenbedingungen neu verhandelt werden müssten und es für einen Weiterbetrieb nur eine geringe gesellschaftliche Akzeptanz gibt.¹¹²

Sollte es dennoch dazu kommen, würde zusätzlicher radioaktiver Abfall entstehen, dessen Entsorgung und dadurch entstehenden Kosten nicht geklärt sind. Zudem sind die laufenden Reaktoren im Durchschnitt über 30 Jahre alt; Störanfälligkeit und damit verbundenes Unfallrisiko sind somit nur sehr schwer zu beurteilen und nicht versicherbar.¹¹³ Auch bei einem Weiterbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke würde sich der nötige Ausbaupfad für erneuerbare Energien nicht signifikant verändern, da dieser sich am Gesamtenergiebedarf ausrichten muss.

Die jährliche Betriebsdauer der bestehenden oder neu zu errichtenden Kernkraftwerke würde sich mit wachsender regenerativer Erzeugung deutlich verringern, so dass die hohen Fixkosten, die für Ertüchtigungen für den Weiterbetrieb oder den Neubau notwendig wären, einen wirtschaftlichen Betrieb verhindern.

Einem Neubau stehen weitere wirtschaftliche Gesichtspunkte entgegen. Die Kosten von Strom aus Kernenergie sind bei Berücksichtigung aller Investitionen und Folgekosten über die gesamte Lebensdauer der Kraftwerke und Brennstoff-Endlager weit höher als Kosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen.¹¹⁴ Zudem gibt es bei den derzeit laufenden Neubauprojekten im Ausland erhebliche Kostensteigerungen und Bauzeitverzögerungen.¹¹⁵ Ein Neubau von Kernkraftwerken ist weder profitabel¹¹⁶, noch kann er schnell genug realisiert werden, um in den 2020er und 2030er Jahren die mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerke zu ersetzen und den oben beschriebenen weiteren Energiebedarf decken zu können. Dies gilt auch für

¹¹¹ Zu diesem Thema ist von Scientists for Future eine detailliertere Stellungnahme geplant.

¹¹² Siehe z. B. Flauger & Witsch (2020). Auch die Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung stellte bereits 2011 klar: „Der Ausstieg ist nötig und wird empfohlen, um die Risiken, die von der Kernkraft in Deutschland ausgehen, in Zukunft auszuschließen. Er ist möglich, weil es risikoärmere Alternativen gibt.“ (Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, 2011).

¹¹³ Nach Günther et al. (2011) würden Kosten für eine Versicherung zwischen 4 und 67 €/kWh liegen.

¹¹⁴ D'haeseleer, 2013; Energate Messenger, 2013; Ram et al., 2018; Leopoldina et al., 2019; Bogdanov et al., 2021.

¹¹⁵ Beispiele sind: Flamanville 3 (Frankreich), Olkiluoto 3 (Finnland) und Hinkley Point C (England). Im Jahr 2019 wurden in England nach Presseberichten die Planungen für zwei von drei Kraftwerksprojekten fallen gelassen, obwohl ein Strompreis deutlich über dem der erneuerbaren Stromerzeugung geboten wurde (Sotschek, 2019).

¹¹⁶ Wealer et al., 2019b; Wealer et al., 2021.

neue Technik-Generationen.¹¹⁷ Je nach eingesetzter Technologie würden zudem weiterhin auch Technologie und Material zur Herstellung von Atomwaffen entwickelt und verbreitet.¹¹⁸

Auch die Kernfusion steht nicht ausreichend schnell zur Verfügung. Innerhalb der verbleibenden Zeit für die Erreichung von Klimaverträglichkeit ist allenfalls ein erster Pilot-Reaktor zu erwarten.¹¹⁹

Weder Kernspaltung noch Kernfusion sind daher Optionen für eine klimaverträgliche Energieversorgung Deutschlands, die bis 2035 aufzubauen ist, um die Klimaschutzziele von Paris einhalten zu können.¹²⁰ Kernkraft und Kernfusion sind auch verzichtbar, da die übrigen Orientierungspunkte zeigen, mit welchen Technologien eine klimaverträgliche Energieversorgung gelingen kann. Im folgenden [Abschnitt III/11](#) wird hierzu ein Pfad skizziert.

11. Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen

Der notwendige Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen in Deutschland für eine klimaverträgliche Energieversorgung ist abhängig von dem Grad der Elektrifizierung, der erreichbaren Reduktion des Energiebedarfs, sowie den angestrebten Importmengen.¹²¹ Die in der Literatur zu findenden Energiewende-Szenarien für eine klimaverträgliche Energieversorgung (hier werden nur Szenarien mit $\geq 95\%$ erneuerbarer Energie betrachtet) unterscheiden sich hauptsächlich in unterschiedlichen Annahmen zu diesen Faktoren sowie mit Blick auf das Zieljahr, ab welchem der Umbau abgeschlossen sein wird (meist 2050, seltener 2035, siehe [Abbildung 1](#) und [Tabelle 1](#), S. 54). Zur Einhaltung des oben genannten CO₂-Budgets ist die Entwicklung der Energiewende in den nächsten zehn Jahren entscheidend. Es ist deshalb wichtig, für 2030 ein ambitioniertes Zwischenziel zu setzen.

- *Importmengen:* Die angegebenen Importmengen erneuerbarer Energieträger variieren in den Szenarien erheblich zwischen ca. 60 TWh und ca. 750 TWh pro Jahr.
- *Energiebedarf:* Der Energiebedarf ist abhängig vom Elektrifizierungsgrad für Mobilität und Wärme sowie den realisierten Energieeinsparungen z. B. durch Gebäudesanierungen oder Verhaltensänderungen (u. a. sogenannte „Suffizienz“). Die Szenariorechnungen für den Energiebedarf im Jahr 2050 reichen von ca. 1 100 TWh bis zu ca. 2 500 TWh.¹²² Wenn Zwischenwerte für 2030 angegeben

¹¹⁷In verschiedenen Ländern gibt es Entwicklungsaktivitäten, die sich unter dem Stichwort „small modular reactors“ zusammenfassen lassen. Insgesamt gibt es aber kaum Anzeichen, die auf einen Durchbruch für diese Technologien oder deren zeitnahe Kommerzialisierung hindeuten würden (Schneider et al., 2020).

¹¹⁸Wealer et al., 2019a.

¹¹⁹Siehe EUROfusion (2018). Die derzeit erwarteten Kosten für Strom aus Kernfusion sind zudem höher als die aus erneuerbarer Energie (Entler et al., 2018).

¹²⁰Entler et al., 2018; Wealer et al., 2019.

¹²¹Andere Energiequellen wie Geothermie, Wasserkraft und Biomasse werden keine nennenswerten zusätzlichen Beiträge leisten.

¹²²Diese hier angegebene Spanne bezieht sich auf Berechnungen zum Endenergiebedarf, der durch Elektrizität inklusive der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe gedeckt wird. Eine wesentliche Reduktion im Vergleich

sind, liegen diese durchweg höher als jene für 2050, da die Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs bis 2030 nur zum Teil umgesetzt werden können. Ein Energiebedarf von ca. 1 100 TWh¹²³ für 2050 ist nur bei sehr ambitionierten Einsparmaßnahmen erreichbar.

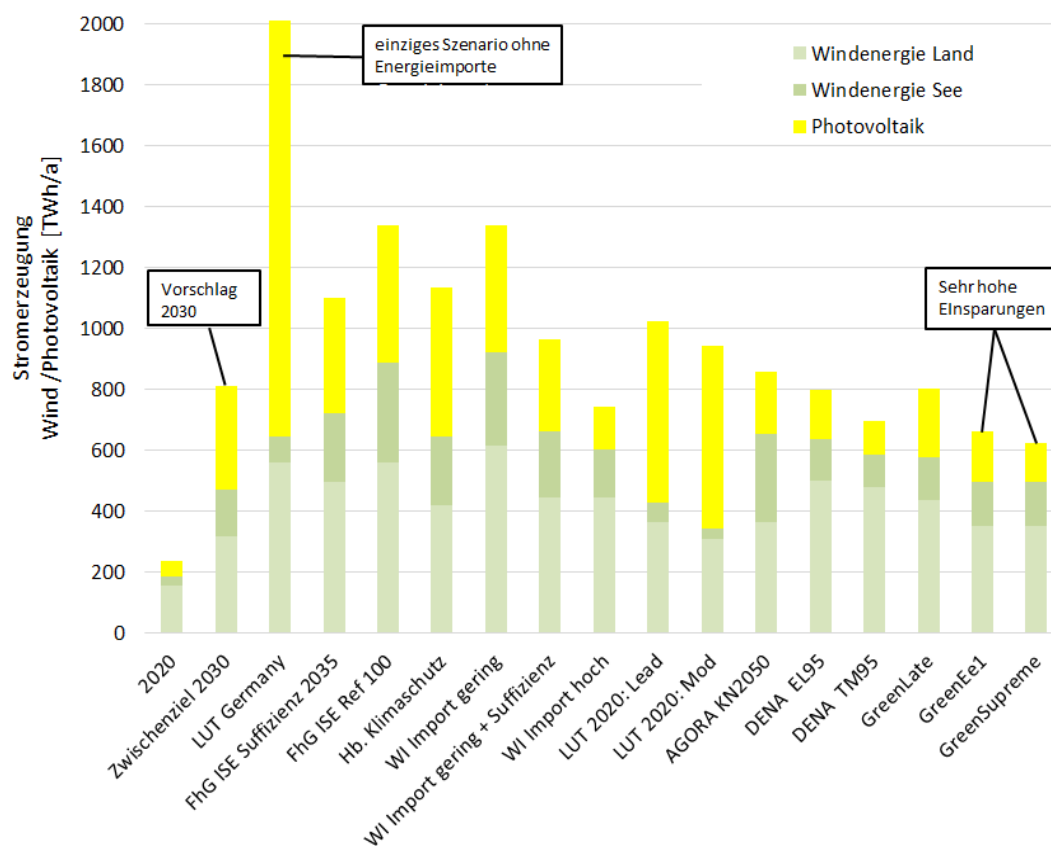


Abbildung 1. Jährliche Stromerzeugung, die sich aus den in verschiedenen Studien angegebenen Kapazitäten der Photovoltaik- und Windkraftwerken ergibt (siehe Tabelle 1). Für alle Studien wurden einheitlich 2 800 kWh/(kW·Jahr) Windenergie an Land, 4 100 kWh/(kW·Jahr) Windenergie auf See und 980 kWh/(kW·Jahr) Photovoltaik angenommen. Da in den Studien davon abweichende Annahmen zu den Vollaststunden gemacht wurden, können die dortigen Werte abweichen. Stromerzeugung aus Biomasse und Wasserkraft sowie Import und Export von Strom sind in einigen Studien berücksichtigt, wurden hier aber nicht aufgenommen.

zum heutigen Primärenergiebedarf (ca. 3 600 TWh/Jahr) wird durch den Wegfall der Verluste in Kraftwerken und die Verwendung von Wärmepumpen erreicht. Große Unsicherheiten bestehen bezüglich der Reduktion des Bedarfs z. B. durch Gebäudesanierung und Verhaltensänderung. Der Minimalwert basiert auf dem Green Supreme Szenario aus Umweltbundesamt (Purr et al., 2019) für das Jahr 2050. Der Maximalwert ist gerundet aus Ram et al. (2019) für die 100%-Versorgung mit erneuerbarer Energie (Zahlen für Deutschland in Figure 3.2-25). Der Photovoltaik-Anteil in Ram et al. (2019) bzw. Bogdanov et al., 2021 ist im Vergleich zu anderen Studien hoch. Das LUT-Modell basiert ausschließlich auf ökonomischen Annahmen. Viele andere Studien liegen in diesem Bereich. 2019 betrug der reine Elektrizitätsbedarf in Deutschland ca. 515 TWh aus öffentlicher Erzeugung und ca. 560 TWh inklusive industrielle Arealnetze (Burger, 2021).

¹²³ UBA RESCUE „Green Supreme“ in Purr et al. (2019).

Bisher existieren keine detaillierten Szenarien ohne sehr hohe Energieimporte zur 100% erneuerbaren Energieversorgung für 2035, aus denen man einen Ausbaubedarf für Photovoltaik und Windenergie entnehmen könnte. Durch ambitionierte Elektrifizierung im Mobilitäts- und Wärmebereich könnte sich bei diesem Gesamtenergiebedarf der Elektrizitätsbedarf 2030 in Deutschland auf ca. 875 TWh/Jahr belaufen und wie folgt zusammensetzen:

- 525 TWh heutiger Elektrizitätsbedarf,¹²⁴
- 70 TWh zusätzlicher Bedarf für Elektromobilität,¹²⁵
- 160 TWh zusätzlich für Raum- und Prozesswärme,¹²⁶
- 120 TWh zusätzlich für die Produktion von Wasserstoff und Syntheseprodukten.¹²⁷

Zur Deckung dieses elektrischen Bedarfs ist ein entsprechender Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland nötig, z. B. auf eine Gesamtkapazität der installierten Leistung von

- ca. 350 GW Photovoltaik,
- ca. 150 GW Windkraft
- sowie sonstige Erzeuger.¹²⁸

Dies ist ca. das 7-fache der derzeitigen Photovoltaik- und das 2½-fache der derzeit vorhandenen Windkraft-Kapazitäten (Stand 2020). In einer Studie des Fraunhofer-Institut ISE, die einen Pfad zur Klimaneutralität in 2035 betrachtet,¹²⁹ wird für 2030 mit 144 GW Wind und 181 GW Photovoltaik gerechnet. Für 2030 werden in diesem

¹²⁴ 480 TWh öffentlicher Nettobedarf + 45 TWh nichtöffentlicher Nettobedarf (Burger, 2021) für 2019.

¹²⁵ Dies entspricht einer Elektrifizierung von ca. 35% des Benzin- und Dieselverbrauchs (insgesamt 585 TWh) von 2018 (UBA, 2020c).

¹²⁶ Heutiger Endenergieverbrauch der Öl-, Gas- und Kohleheizungen: zusammen ca. 565 TWh inklusive Warmwasser. Vom heutigen Prozesswärmebedarf werden ca. 365 TWh/Jahr durch fossile Energieträger gedeckt. Insgesamt liegt die fossile Wärme also bei ca. 930 TWh/Jahr, die nur zum Teil durch Wärmepumpen elektrifiziert werden kann.

¹²⁷ Der heutige Wasserstoffbedarf liegt bei ca. 55 TWh/Jahr (BMW, 2020b); die nationale Wasserstoffstrategie sieht einen Bedarf von 90–110 TWh in 2030 (BMW, 2020b). In den Szenarien TM95/EL95 von Bründlinger et al., 2018, werden z. B. PtX-Energieträger von 500–900 TWh pro Jahr angesetzt; Prognos et al., 2020, rechnet in einem weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem mit einem Bedarf an grünem Wasserstoff von ca. 270 TWh pro Jahr + 160 TWh Syntheseprodukten (power to liquid).

¹²⁸ Angenommen werden hierbei z. T. nicht optimale Standorte für Photovoltaik und Wind aufgrund hoher Ausbaugeschwindigkeit; in der Abschätzung ist zudem berücksichtigt, dass die Ausbaupotenziale von Geothermie, Wasserkraft und Biomasse vergleichsweise gering sind. 37 GW × 4100 h entsprechen 152 TWh Wind auf See, 113 GW × 2800 h entsprechen 317 TWh Wind an Land, 350 GW × 980 h entsprechen 343 TWh Photovoltaik, 45 TWh mittels Wasserkraft und Biomasse (heute 18 und 46 TWh). Das gesamte erneuerbare Erzeugungspotential beträgt ca. 857 TWh, da bei hohen Erzeugungsleistungen z. T. abgeregelt werden muss (Annahme: ca. 25 TWh Abregelung) ergibt sich insgesamt ca. 832 TWh regenerative Erzeugung. Zudem fallen ca. 5% Netzverluste an. Zu diesem Zeitpunkt stehen vermutlich für Zeiten mit zu wenig Wind- und Solarertrag noch keine ausreichenden Speicherkapazitäten bzw. Wasserstoff oder synthetische Energieträger zur Verfügung. Daher ist es vermutlich nötig, dass etwa 10% des Bedarfs noch aus fossilen Quellen gedeckt werden müssen. Damit ergeben sich ca. 875 TWh.

¹²⁹ Szenario „Suffizienz 2035“ in Sterchele et al. (2020)

Szenario allerdings Importe synthetischer Kraftstoffe in Höhe von ca. 280 TWh nötig.¹³⁰ Um entsprechend hohe Kapazitäten an Wind- und Solaranlagen zu erreichen, ist eine deutliche Erhöhung des jährlichen Zubaus unabdingbar.¹³¹ Auf Dachflächen kann nur ein Teil des genannten Photovoltaik-Ausbaus installiert werden – Freiflächenanlagen sind erforderlich.¹³² Mit dieser Gesamtkapazität wäre etwa die Hälfte des oben angenommenen Energiebedarfs in Deutschland 2030 durch inländische erneuerbare elektrische Energie gedeckt. Mit diesen Erzeugungskapazitäten wird weniger erneuerbarer Strom erzeugt, als in den meisten Energiewende-Szenarien¹³³ für die inländische Erzeugung angenommen wird. Der Aufbau entsprechender Erzeugungskapazitäten ist sinnvoll, da die Erzeugung elektrischer Energie mit Wind- und Solarkraftwerken günstiger als mit fossilen Quellen ist, insbesondere wenn ein gegenüber heute steigender CO₂-Preis berücksichtigt wird.¹³⁴

Geringere Erzeugungskapazitäten, vor allem für die Photovoltaik, finden sich in vielen Energiewende-Szenarien; diese sind allerdings mit sehr hohen Energie-Importmengen von mehr als 300 TWh pro Jahr¹³⁵ oder mit sehr ambitionierten und erst im Jahr 2050 erreichten Einsparungen¹³⁶ verbunden. Importe in dieser Größenordnung bis 2030 erfordern den sehr schnellen Aufbau umfangreicher regenerativer Erzeugungskapazitäten in anderen Ländern sowohl für den Eigenbedarf als auch für den Export sowie eine entsprechend umfangreiche Transportinfrastruktur (vergleiche

¹³⁰Im Szenario Suffizienz des FhG IS (Sterchele et al., 2020) wird eine vollständige Reduktion der energiebedingten Emissionen bis 2035 betrachtet. Der jährliche Ausbau von Wind und Solarenergie pro Jahr wird in der Berechnung begrenzt, deshalb wird für 2035 der Import synthetischer Kraftstoffe mit 570 TWh beziffert. Würde in der Simulationsrechnung ein höherer Ausbau zugelassen, würden sich höhere Kapazitäten für 2030 und 2035 ergeben. In diesem Szenario steigen die Kapazitäten bis 2050 auf 232 GW Wind und 384 GW PV, der Importbedarf sinkt dann auf 70 TWh/Jahr.

¹³¹Eine deutliche Erhöhung des derzeitigen Ausbautempos ergibt sich sowohl aus unserer Abschätzung für 2030 mit 150 GW Wind und 350 GW Photovoltaik als auch aus dem Szenario Suffizienz 2035 mit 144 GW Wind und 181 GW Photovoltaik im Jahr 2030 (Sterchele et al., 2020). Für das letztere Szenario wird zusätzlich eine sehr ambitionierte Erhöhung der Importmengen von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen auf 280 TWh/Jahr angenommen. Unsere Abschätzung nimmt demgegenüber einen höheren Ausbau der Photovoltaik und geringere Importe an.

¹³²Auf den meisten Gebäuden können nur kleine Anlagen errichtet werden. Somit ist der Aufwand insgesamt hoch und es erscheint schwierig, deutlich mehr als 100 GW bis 2035 zu realisieren. Zu beachten ist, dass die Gebäude überwiegend in Besitz von Privatpersonen oder Unternehmen sind. Eine verpflichtende Nutzung der Dachflächen ist rechtlich nicht einfach umzusetzen, Anreizsysteme können helfen, das Potenzial stärker zu nutzen, allerdings ist eine nachträgliche PV-Installation nicht in allen Fällen kosteneffizient. Nach BMVI (2015) liegt das realisierbare Photovoltaik-Potenzial auf Dächern für Deutschland zwischen 89 GW und 150 GW, was einem Ertrag von ca. 84 – 140 TWh/Jahr entspricht. Durch Nutzung von Fassaden kann das Photovoltaik-Potenzial weiter auf 900 GW, entsprechend ca. 740 TWh/Jahr erhöht werden (Eggers et al., 2020). Nach Fath (2018) liegt es bei ca. 1200 TWh bis 2500 TWh/Jahr. Beschränkend für den Ausbau der Photovoltaik-Dachanlagen ist jedoch die Zahl qualifizierter Handwerker, weshalb auch ein Ausbau auf Freiflächen nötig ist.

¹³³Wuppertal Institut, 2020; Ram et al., 2019; Sterchele et al., 2020.

¹³⁴Strom aus Wind- und Solarenergie lässt sich in Deutschland in großen Anlagen für ca. 4 ct/kWh erzeugen [Bundesnetzagentur, 2020]. Bei einem CO₂-Preis von 40 €/t belaufen sich die CO₂-Kosten von Braunkohlestrom ebenfalls bereits auf etwa 4 ct/kWh. Strom aus Wind oder Solar ist dann deutlich billiger als aus Braunkohle.

¹³⁵Szenarien EL95 und TM95 aus Bründlinger et al. (2018) und Szenario „Import größerer Mengen klimaneutraler Energieträger“ aus Wuppertal Institut (2020).

¹³⁶Zum Beispiel UBA Rescue Green Supreme und Green Ee (Purr et al., 2019).

Abschnitt III/3 „Energieimporte“¹³⁷). Beides zusammen erscheint uns schwieriger als ein entsprechender Ausbau in Deutschland. Selbst in sehr ambitionierten aktuellen Initiativen wird für 2030 nur von einer realisierbaren Importmenge von 140 TWh pro Jahr ausgegangen.¹³⁸ Zum Erreichen ambitionierter Klimaziele (1,5 °C) wären jedoch bis 2030 bis zu 350 TWh Importe pro Jahr notwendig, wenn der Ausbau erneuerbarer Energien weiter begrenzt bleibt.¹³⁹

Umgekehrt nennen manche Energiewende-Szenarien für die Photovoltaik auch deutlich höhere Erzeugungskapazitäten von ca. 500 GW¹⁴⁰ bis 1 400 GW¹⁴¹. Für die Windkraft werden Erzeugungskapazitäten von 150 bis 250 GW angesetzt¹⁴².

Eine Erhöhung des Windkraft-Ausbaus bei gleichzeitiger Reduktion des Photovoltaik-Ausbaus ist möglich.¹⁴³ Diese Variation spiegelt sich in den unterschiedlichen Energiewende-Szenarien wider.

Bei insgesamt zu geringem Ausbau besteht das Risiko, Treibhausgas-Reduktionsziele nicht zu erreichen. Ausbauziele von Wind- und Photovoltaik-Anlagen sollten in den nächsten Jahren an die tatsächliche Entwicklung des durch inländische Erzeugung zu deckenden elektrischen Energiebedarfs und das noch verfügbare CO₂-Restbudget angepasst werden.

Durch die Elektrifizierung von Mobilität und Wärmeversorgung sowie den oben genannten Ausbau von Windkraft und Photovoltaik würden sich die THG-Emissionen ausgehend von 2019 bis 2030 um ca. 45 % reduzieren¹⁴⁴. Diese Reduktion ist nicht ausreichend zur Einhaltung des CO₂-Budgets. Daher wären auch bei dem hier vorgeschlagenen regenerativen Ausbau zusätzliche Maßnahmen notwendig. Dies sind insbesondere die Reduktion des Energiebedarfs, z. B. durch energetische Sanierung von Gebäuden, in der Industrie und gegebenenfalls Importe erneuerbarer Energieträger und eine Reduktion der Emissionen der Landwirtschaft.

¹³⁷ Zu Energieimporten, Transportverlusten, Umstellung der Energiesysteme in den Exportländern, usw., siehe Abschnitt III/3.

¹³⁸ HyDeal Ambition, 2021. Diese Importmengen beruhen auf geplanten Elektrolyseur-Kapazitäten von 67 GW. Eine andere ambitionierte Initiative (Desertec) rechnet mit geringeren Elektrolyseur-Kapazitäten von 40 GW (Wijk & Chatzimarkakis, 2020).

¹³⁹ Sterner et al., 2021.

¹⁴⁰ Fraunhofer, Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz, 2020.

¹⁴¹ Ram et al., 2019.

¹⁴² Wuppertal Institut, 2020; Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz, 2020; SolarPower Europe LUT 2020; Bründlinger et al., 2018; DENA-Leitstudie; Prognos et al., 2020; Purr et al., 2019 (= UBA RESCUE).

¹⁴³ Ein niedrigerer Windkraftausbau ist nicht möglich, da der hohe winterliche Bedarf elektrischer Energie sonst nicht gedeckt werden kann (vgl. Kaspar et al., 2019). Eine saisonale Speicherung ist bis 2030 nicht in ausreichendem Umfang möglich.

¹⁴⁴ Die Reduktion der CO₂-Emissionen aufgrund der Vermeidung von fossilen Energieträgern wurde folgendermaßen abgeschätzt (eigene Berechnungen, Mt CO₂-Äquivalente): (a) Stromerzeugung: Ersatz von 205 TWh fossiler Erzeugung vermeidet ca. 146 Mt (2019), (b) Mobilität: Ersatz von 200 TWh Benzin und Diesel vermeidet ca. 55 Mt durch Batterie-Auto und 17 Mt durch Brennstoffzellen-Fahrzeuge, (c) Raumwärme: 240 TWh Raumwärme mittels Wärmepumpen vermeidet 59 Mt; 80 TWh Prozesswärme: 17 Mt; H₂ aus Elektrolyse vermeidet Erdgas-Dampfreformierung 14 Mt. Gesamte Einsparung von CO₂-Emissionen: ca. 307 Mt (Gesamtemission 2019: 711 Mt). Emissionsfaktoren nach Juhrich (2016) und Edwards et al. (2011).

12. Bedarf an Speichern im Elektrizitätssystem

In einem klimaverträglichen Energiesystem schwankt das Angebot an Elektrizität bedingt durch Tageszeit, Jahreszeit und Wetter. Ein teilweiser Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage kann durch Sektorkopplung sowie Importe und Exporte im Europäischen Stromnetz geschehen. Weiterhin können flexible Verbraucher zu einem Ausgleich beitragen. Diese erhöhen ihren Verbrauch bei hohem Angebot und reduzieren ihn zu Zeiten geringen Angebots, z.B. Ladestationen für Elektroautos oder elektrische Wärmepumpen. Um eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen, ist zusätzlich eine Kombination von Speichertechnologien nötig.¹⁴⁵ Die Kosten dafür sind auf Systemebene relativ gering.¹⁴⁶

Um Schwankungen im Tagesbereich auszugleichen, ist ein Ausbau von Kurzzeitspeichern sinnvoll. Verfügbare Technologien dafür sind z. B. thermoelektrische Speicher, Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Flüssiglufspeicher und Batterien. Aufgrund des wachsenden Produktionsvolumens werden die Kosten insbesondere für Batterien in den nächsten Jahren voraussichtlich weiter sinken.¹⁴⁷ Um Ressourcen optimal zu nutzen, sollte ihr Einsatz nicht nur an lokale Anlagen gekoppelt sein, sondern im Verbund gesteuert werden können.

Trotz aller Maßnahmen zum Ausgleich der Angebots- und Nachfragespitzen treten Zeiträume von mehreren Tagen bis zu zwei Wochen auf, in denen die Kombination von Wind- und Solarenergie sowie die Kapazität der Kurzzeitspeicher nicht ausreichen, um die Elektrizitätsversorgung sicherzustellen („kalte Dunkelflaute“).¹⁴⁸ Der Ausbau eines europäischen HGÜ-Netzes kann die Anzahl und die Dauer solcher Zeiträume deutlich reduzieren.¹⁴⁹ Ausgeprägte Dunkelflauten von mehr als 48 Stunden Dauer treten aber auch EU-weit auf.¹⁵⁰ Um die Energieversorgung in Deutschland auch bei solchen extremen Wetterlagen mit bekannt hoher Sicherheit zu gewährleisten, ist eine Leistungsreserve erforderlich. Basierend auf vorhandenen Stu-

¹⁴⁵Schmidt et al., 2019.

¹⁴⁶Schill et al., 2018; Zerrahn et al., 2018; Ram et al., 2019.

¹⁴⁷Der Lernkurvenfaktor für Batteriespeicher betrug bisher ca. 15–25% (Michaelis et al., 2018).

¹⁴⁸Eine solche Wetterlage wird in der öffentlichen Debatte oft als „kalte Dunkelflaute“ bezeichnet. Huneke et al. (2017) identifizierten die längste Dunkelflaute der letzten Jahre mit dem zweiwöchigen Zeitraum vom 22. Januar bis 7. Februar 2006.

¹⁴⁹Kaspar et al., 2019.

¹⁵⁰Der in der öffentlichen Diskussion häufig verwendete Begriff der Dunkelflaute ist unscharf (vgl. Ohlendorf et al., 2020). In einer Analyse über 20 Jahre (1995–2015) von Kaspar et al., 2019, wird abgeschätzt, dass 48-Stunden-Zeiträume etwa alle drei Jahre vorkommen, in denen durch Photovoltaik und Windkraft zusammen im Mittel weniger als 5% der Nennleistung erzeugt wird (auf Deutschland beschränkt und ohne offshore-Wind); bei europaweiter Betrachtung treten solche Zeiträume immerhin noch etwa alle fünf Jahre auf. Ohlendorf et al., 2020, schätzen Schwachwind-Zeiträume für Deutschland detailliert ab und weisen nach, dass im Winter (wenn Photovoltaik wenig Back-up bietet) Schwachwind-Zeiträume (d.h. unter 10% der Nennleistung) maximal um die fünf Tage lang sind und dass 48-h-Zeiträume im Winter ca. einmal pro Jahr auftreten.

dien erscheint eine Leistungsreserve für Deutschland von mindestens 50 GW sinnvoll.¹⁵¹ Ein zusätzlicher Aufbau an Reservekapazität hat jedoch Zeit, da zunächst noch alte Kohlekraftwerke in Reserve gehalten werden können.¹⁵² Die Leistungsreserve kann in Deutschland z. B. durch mit Wasserstoff betriebene Gas-Turbinen und -Motoren¹⁵³ bzw. Stromimporte¹⁵⁴ bereitgestellt werden. Damit im Falle einer extremen Wetterlage die Stromversorgung sichergestellt ist, sollten ca. 23 TWh Strom sicher produziert werden können. Hierfür sind Gasspeicher mit einer Kapazität von ca. 44 TWh Wasserstoff notwendig.¹⁵⁵ Regenerativ erzeugtes synthetisches Gas kann hierfür in Porenspeichern und unterirdischen Kavernen gespeichert werden, die heute schon in ausreichender Größe vorhanden sind und aktuell als Erdgaspeicher genutzt werden.¹⁵⁶

¹⁵¹ Huneke et al. (2017) untersuchten, wie sich eine zweiwöchige Dunkelflaute in einem Stromversorgungssystem auf Basis von 100 % erneuerbarer Energie auswirken würde (fiktiv im Jahr 2040). In dieser Studie wird der Bedarf für eine Leistungsreserve auf 67 GW beziffert. Auch in anderen Studien werden Kapazitäten für die Reserveleistung ermittelt, häufig wird dabei allerdings als Basis der Wetterdaten nur ein (Referenz-) Jahr verwendet, so dass in diesen Studien angegebene Kapazitätswerte nicht mit der hier angesprochenen nötigen Leistungsreserve gleichzusetzen sind (vgl. Ohlendorf et al., 2020). Dies betrifft z. B. die Szenarien aus Purr et al. (2019), und Ram et al. (2018, 2019). In Zerrahn et al. (2018) werden sechs Wetterjahre berücksichtigt, und hier wird die Leistungsreserve in einem 90 %-Szenario auf ca. 70 % der maximalen Last abgeschätzt. Bei ca. 75 GW maximaler Last (Beispielwert aus dem Jahr 2020, siehe Burger, 2021) entspricht dies ca. 50 GW. Durch zunehmende Elektrifizierung wird die Last voraussichtlich zunehmen, so dass bei einem Strombedarf von 875 TWh/Jahr (wie in Abschnitt III/11 für 2030 als plausibel vorgeschlagen) bereits die mittlere Last 100 GW beträgt und daher vermutlich auch die Leistungsreserve höher ausfallen muss. Zum Vergleich: Heute sind bereits Gaskraftwerke mit einer installierten Leistung von ca. 30 GW in Betrieb (Burger 2021).

¹⁵² Sowohl die Kohlekraftwerke als auch ein großer Teil der Gaskraftwerke werden in einem zunehmend erneuerbar betriebenen Energiesystem eine immer geringer werdende Anzahl von Stunden pro Jahr laufen.

¹⁵³ Um Stranded Assets zu vermeiden, müssen zukünftige Gaskraftwerke, die zu Beginn ggf. noch mit fossilem Erdgas betrieben werden, auch mit Biomethan und Wasserstoff betrieben werden können. Gaskraftwerke können auch durch andere Kraftwerke ergänzt oder ersetzt werden, die mit gespeicherter erneuerbarer Energie wie z. B. Holz betrieben werden. Robinius et al. (2019) sehen als Leistungsreserve alternativ Festoxid-Brennstoffzellen vor, die sich allerdings in Bezug auf Einsatzreife und Kosten pro GW noch gegen Gaskraftwerke behaupten müssen.

¹⁵⁴ In einem starken europäischen Verbundnetz kann die notwendige national bereitgestellte Reserve-Kapazität für Deutschland geringer ausfallen (vgl. Gerhardt et al., 2017). Beispielsweise werden schon heute bei viel Wind in Schleswig-Holstein die Windenergie-Überschüsse nach Norwegen geleitet und umgekehrt bei Flaute aus norwegischen Wasserkraftwerken nach Deutschland übertragen. Es gibt derzeit sechs HGÜ-Leitungen von Skandinavien nach Mitteleuropa (Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz, 2020).

¹⁵⁵ Diese Abschätzung ist Huneke et al. (2017) zu entnehmen: 23 TWh entspricht dabei der elektrischen Residuallast über zwei Wochen Dunkelflaute bei einem Jahreselektrizitätsbedarf von ca. 740 TWh (ohne Elektrolyseure und ohne Pumpspeicherleistung). 44 TWh entspricht dem minimal notwendigen Speicherfüllstand an Wasserstoff und gasförmigen Syntheseprodukten, die im Jahr 2006 notwendig gewesen wären, um Deutschland während der Zeiten der Unterdeckung einschließlich der damaligen Dunkelflaute ausreichend zu versorgen. Robinius et al. (2019) berechnen den notwendigen Speicherfüllstand für ein Jahr mit maximaler Dunkelflaute auf ca. 110 TWh Wasserstoff plus Methan, wobei hier die Dunkelflaute als ein zweiwöchiger Zeitraum im Januar mit einer niedrigen erneuerbaren Stromerzeugung bis hin einem Ausfall der Erzeugung modelliert wurde und der Jahreselektrizitätsbedarf zu ca. 1000 TWh angenommen wurde. Zum Vergleich: 30 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Batteriekapazität von je 60 kWh haben insgesamt 1,8 TWh Energieinhalt.

¹⁵⁶ Laut Sterner et al. (2015) steht unter Berücksichtigung aller geplanten und in Bau befindlichen Speicher (Stand 2013) in Deutschland eine Speicherkapazität von ca. 337 TWh für Methan zur Verfügung (von diesen Poren- und Kavernenspeichern waren 2013 bereits 262 TWh vorhanden und 75 TWh geplant oder im Bau).

Der Aufbau von Leistungsreserven in der beschriebenen Höhe ist im Vergleich zu den Gesamtkosten der Energieversorgung günstig¹⁵⁷. Allerdings birgt ein schneller Aufbau das Risiko eines Lock-In-Effekts: Werden etwa in Kombination mit Wärmeversorgung Gaskraftwerke (KWK) gebaut, welche nur mit Erdgas betrieben werden können, kann der Umbau auf erneuerbare Energien verzögert werden. Dem kann z. B. mit einem ausreichend hohen CO₂-Preis und einer Verpflichtung für eine Umrüstbarkeit auf Wasserstoff entgegengesteuert werden. Wichtig ist, dass die Vorhaltung gesicherter Leistungsreserven für neue Gaskraftwerke finanziell abgesichert wird, auch wenn sie künftig nur wenige Stunden im Jahr betrieben werden.

13. Modernisierung von Elektrizitäts-Infrastruktur und -Marktregeln

Für eine vollständige Versorgung mit erneuerbarer Energie müssen das Stromnetz den Erfordernissen angepasst und die Marktintegration von Speichern und flexiblen Verbrauchern sowie die Finanzierung von Leistungsreserven sichergestellt werden. Dies umfasst insbesondere folgende Maßnahmen:

- Lokale Stromnetze sind zu ertüchtigen, insbesondere um die Einspeisung der Photovoltaik-Anlagen künftig auf fast allen geeigneten Dächern und Fassaden auch bei Sonnenschein aufnehmen sowie den aufgrund zunehmender Elektrifizierung steigenden Strombedarf bedienen zu können.
- Ein Ausbau und eine optimierte Nutzung des europäischen Höchstspannungsnetzes kann entscheidend dazu beitragen, den lokalen Energiebedarf mit dem überregionalen Angebot erneuerbarer Energien auszugleichen und so die Gesamtkosten zu senken.¹⁵⁸
- Flexible Verbraucher müssen so in das System integriert werden, dass ein schwankendes Angebot ausgeglichen wird („Demand-Side-Management“, DSM). Durch die Kopplung der Sektoren Elektrizität, Wärme, Verkehr und Industrie ergeben sich neue Möglichkeiten. Die Wärmebereitstellung kann mit Hilfe von Wärmespeichern zeitlich von Strombedarf und -verfügbarkeit entkoppelt werden. Fahrzeugbatterien können variabel geladen werden, um das lokale Netz nicht zu überlasten. Elektrolyse-Anlagen können in der Leistung dem Angebot erneuerbarer Energie angepasst und energieintensive Prozesse in der Industrie können stärker auf variierende Abnahme optimiert werden. Durch diese Maßnahmen verringert sich der Bedarf an Speichern.
- Die Koordination von vielen dezentralen, wetterabhängig einspeisenden Anlagen, Speichern und flexiblen Stromverbrauchern kann nur hochgradig automatisiert gelingen und erfordert einen hohen Grad an Digitalisierung.

Zumindest die Kavernenspeicher sind langfristig für die Lagerung von Wasserstoff bis zu einer Menge von ca. 70TWh geeignet (Sternier et al., 2015; Gerhardt et al., 2017).

¹⁵⁷Vgl. Huneke et al., 2017 sowie Gerhardt et al., 2017.

¹⁵⁸Deutscher Wetterdienst, o. J.

- Um die Kosten für den Ausbau von Netz und Speichern inklusive Leistungsreserven zu optimieren und Anreize für die Integration flexibler Verbraucher zu geben, sind Änderungen am Preissystem¹⁵⁹, insbesondere die Abschaffung von Fehlpreisen, notwendig.¹⁶⁰ Eine Reform der relevanten Gesetze sollte am Ziel einer vollständigen Versorgung mit erneuerbarer Energie (in einem Mix von zentralen und dezentralen Strukturen) bis zum Jahr 2035 ausgerichtet sein. Der Abbau von heute bestehenden Hemmnissen gegen die Umgestaltung der Energieversorgung ist eine Grundlage hierfür. Neue Anreize, wie ein variabler Preis für Speicherbetreiber oder Endkunden, müssen auf die Optimierung der Gesamtkosten für Erzeugungs-, Netz- und Speicherbetrieb ausgerichtet sein.¹⁶¹ Damit eine steuernde Wirkung möglichst effektiv wird, sollte die Preisvariabilität auch Netzentgelte umfassen. Abgaben und Energiesteuern sollten CO₂-basiert erhoben werden¹⁶². Ein hohes Maß an Transparenz bezüglich des Netzbetriebs und der Kosten ist erforderlich.
- Gewinnung, Transport und Nutzung fossiler Energieträger dürfen ab sofort nicht weiter subventioniert und politisch unterstützt werden¹⁶³.

14. Kosten der Energiewende

Der Umbau der Energieversorgung hin zur Klimaverträglichkeit erfordert hohe, aber leistbare Investitionen, die sich volkswirtschaftlich lohnen.¹⁶⁴ Schätzungen zeigen, dass jährlich ca. 2% des Bruttoinlandsprodukts über einen Zeitraum von ca. drei Jahrzehnten in neue Erzeugungsanlagen, Speicher, Netze und weitere Infrastruktur investiert werden müssten¹⁶⁵. Soll der Umbau wie erforderlich bis 2035 erfolgen,

¹⁵⁹ Jahn et al., 2019; Seidl et al., 2018.

¹⁶⁰ Beispiele für Fehlpreise sind: Für Abnehmer von mehr als 100000 kWh im Jahr gilt in der Regel ein Leistungspreis. Das bedeutet, dass es eine Preiskomponente je kWh gibt und eine für die maximale Leistung. In einem System mit überwiegend erneuerbarem Strom sollte bei hohem Stromangebot aber möglichst viel Leistung direkt abgenommen werden, ohne dass dies höhere Stromkosten zur Folge hat. Für Großabnehmer mit mehr als 10 GWh/Jahr gilt nach § 19, Abs. 2, S. 2–4 StromNEV ein geringeres Netzentgelt, wenn jährlich mehr als 7000/7500/8000 Stunden Strom bezogen wird. So ergibt sich ein Anreiz, auch in Zeiten von wenig Stromangebot aus erneuerbaren Quellen den Bezug nicht zu drosseln.

¹⁶¹ Heute sind Netzentgelte und insbesondere EEG-Abgabe abhängig von der bezogenen Strommenge, und es entsteht keine ökologische Steuerung.

¹⁶² Insbesondere gilt dies für die Stromsteuer (ca. 2 ct/kWh), die EEG-Umlage (ca. 7 ct/kWh), die Konzessionsabgaben auf Strom (bis zu 2,8 ct/kWh), die KWK-Umlage (ca. 0,3 ct/kWh), die Offshore-Umlage (ca. 0,4 ct/kWh) und die StromNEV-Umlage (ca. 0,3 ct/kWh).

¹⁶³ Zu den umweltschädlichsten Subventionen gehören z. B. im Verkehrssektor Steuervergünstigungen für Dieselmotoren (7353 Mio. €), Flugverkehr (11846 Mio. €), Entfernungspauschale (5100 Mio. €) und Dienstwagen (3100 Mio. €) sowie Steuern- und Abgabentlastung für Industrie und Gewerbe (11715 Mio. €) (UBA, 2019b, BAFA, 2020a, Taylor, 2020).

¹⁶⁴ Glanemann et al., 2020.

¹⁶⁵ Detaillierte Kosten zu Erzeugungsanlagen und Speichern siehe Ram et al. (2018) und SolarPower Europe & LUT (2020).

sind in Deutschland jährlich Investitionen von ca. 100 Mrd. € notwendig (entsprechend 2,9 % des Bruttoinlandsproduktes, BIP).¹⁶⁶ Dazu kommen Investitionen z. B. für den Umbau im Mobilitätssektor und für die Gebäudesanierung, die teilweise vorgezogen werden müssen. Dem gegenüber stehen als Vorteile insbesondere:

- Die neuen Energietechniken haben geringere Betriebskosten.¹⁶⁷
- Es entfallen nach und nach die heutigen Beschaffungskosten für Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie in Höhe von jährlich ca. 60 Mrd. €¹⁶⁸ und die Subventionen für fossile Energieträger.¹⁶⁹
- Ersatzinvestitionen für fossile Grundlast-Kraftwerke, Raffinerien, Tankstellen und deren Betriebsausgaben entfallen.
- Die durch die deutschen CO₂-Emissionen verursachten Schadenskosten in Höhe von mindestens 170 Mrd. € pro Jahr¹⁷⁰ werden reduziert.

Durch die in den letzten Jahren bereits erzielten Kostensenkungen¹⁷¹ sowie die absehbaren weiteren Reduktionen¹⁷² werden die Kosten eines klimaverträglichen Energiesystems auf längere Sicht nicht unbedingt höher sein als die des derzeitigen Systems¹⁷³. Das gilt auch dann, wenn die Schadenskosten des heutigen Energiesystems durch Treibhausgas-Emissionen nicht berücksichtigt werden. Schon bei einem CO₂-Preis in der Größenordnung von 25 EUR/t ist Strom aus Kohlekraftwerken teurer als aus erneuerbaren Quellen. Ein höherer CO₂-Preis ist ein wichtiges Instrument zur Bewältigung der Klimakrise.¹⁷⁴ Mit einem schnellen Umstieg auf erneuerbare Quellen kann dauerhaft eine preisgünstige Stromversorgung sichergestellt werden.

¹⁶⁶ Ein Umbau bis 2050 wird in Ram et al. (2019) mit Gesamtinvestitionen von ca. 1400 Mrd. € beziffert. Verdichtet auf 15 Jahre Umsetzungszeit ergeben sich bei linearem Ansatz ca. 100 Mrd. € pro Jahr (Bruttoinlandsprodukt 2019: 3400 Mrd. €).

¹⁶⁷ Die energetische Sanierung und Umstellung auf erneuerbare Energieversorgung rechnet sich insbesondere bei steigenden CO₂-Preisen.

¹⁶⁸ Robinius et. al., 2019

¹⁶⁹ Je nach Berechnungsmethode summieren sich die deutschen Subventionen für fossilen Energien auf bis zu 46 Mrd. € (ohne Berücksichtigung der Schadenskosten, die durch Emissionen verursacht werden, Zerkawy, 2017). Niedrigere Zahlen von ca. 8 Mrd. € ergeben sich aus Berechnungen der Bundesregierung bzw. des IWF (Taylor, 2020).

¹⁷⁰ Siehe UBA (2019a): Deutsche CO₂-Emissionen werden mit 180 €/t bewertet, zukünftig steigend. Die Schäden entstehen nicht nur in Deutschland, sondern anteilig global.

¹⁷¹ In Deutschland kann elektrische Energie, wie die Ausschreibungen im Jahr 2018 gezeigt haben, sowohl mit Wind als auch mit Photovoltaik für unter 4 ct/kWh erzeugt werden (Bundesnetzagentur, 2020).

¹⁷² Grundlage für geringe Systemkosten sind geringe Erzeugungs- und Speicherkosten. Insbesondere bei der Photovoltaik und bei Batteriespeichern sind weitere Kostenreduktionen zu erwarten (Ramez, 2020). Der Lernkurvenfaktor für PV beträgt ca. 23 % (ITRPV, 2020). Der Lernkurvenfaktor für Batteriespeicher beträgt ca. 15 – 25 % (Michaelis et al., 2018).

¹⁷³ SolarPower Europe & LUT, 2020; Matthey & Bünger, 2019; Ram et al., 2018. Grundsätzlich kann mit weiter fallenden Preisen bei der Produktion erneuerbarer Energien gerechnet werden, allerdings kommen Kosten für die Energiespeicherung hinzu (vgl. Palmer & Floyd, 2020).

¹⁷⁴ Mattauch et al., 2020.

Auch im Vergleich mit den Beträgen, die für das Abfedern anderer Krisen aufgewendet werden¹⁷⁵, sind die notwendigen Investitionen in das Energiesystem angemessen. Insgesamt ist die Umstellung auf ein klimaverträgliches Energiesystem bereits kurz- bis mittelfristig auch aus rein ökonomischer Betrachtung für unsere Volkswirtschaft sinnvoll.

15. Arbeitsmarkt

Der Aufbau eines zukunftssicheren Energiesystems erfordert neue Berufsbilder und eine Vielzahl qualifizierter Arbeitskräfte. Dies betrifft sowohl den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung als auch die Umbaumaßnahmen im Wärme- und Mobilitätsbereich. Unterschiedlichste Berufsgruppen werden verstärkt neues Wissen erwerben und sektorübergreifend denken müssen. Dies betrifft öffentliche und private Planung, Beratung und auch das Handwerk. Angesichts des heute schon teilweise vorhandenen Fachkräftemangels bei Projektplanern, bei Beratern sowie im Bau-, Heizungs- und Elektrohandwerk muss verhindert werden, dass Projekte aufgrund fehlender Fachkräfte nicht umgesetzt werden können. Klare Rahmenbedingungen und deutlich ausgeweitete und am künftigen Bedarf orientierte Ausbildungen, Weiterbildungen und Umschulungen sind daher sektorübergreifend notwendig. Andernfalls könnte der Arbeitskräftemangel ein wesentliches Hindernis bei der Energiewende werden.

Komplexe gesellschaftliche und technische Transformationen wie die Energiewende erfordern ein geeignetes Veränderungsmanagement¹⁷⁶. Neben Fachkräften in den einzelnen Sektoren werden daher auch zunehmend solche Fachkräfte benötigt, die die Gesamtheit der sozialen und technischen Transformation im Blick haben und die die Vernetzung der Akteure und Aktivitäten auf allen Ebenen organisieren. Derzeit wird diese Rolle beispielsweise von Klimaschutzmanager:innen und Energieagenturen ausgefüllt.

In Deutschland sind die Beschäftigtenzahlen im Bereich erneuerbarer Energien von 417 000 im Jahr 2011 auf 304 000 im Jahr 2018 gesunken. Dies ist vor allem auf den Solarbereich zurückzuführen (Rückgang von 157 000 in 2011 auf 46 000 in 2018). Auch im Bereich der Windenergie ist 2016 bis 2018 ein empfindlicher Rückgang von über 40 000 Arbeitsplätzen zu verzeichnen (von 163 000 auf 122 000). In 2018 waren nur noch ca. 167 000 Menschen in den Bereichen Windenergie und Photovoltaik beschäftigt.¹⁷⁷ Ein beschleunigter Ausbau der Wind- und Solarenergiekapazitäten schafft neue Arbeitsplätze für den Zubau und die Ersatzinstallation (Repowering) sowie für den Betrieb und die Instandhaltung der entsprechenden Anlagen. Sofern auch die Produktion der Anlagen in Deutschland bzw. der EU erfolgt, entstehen noch zusätzliche Arbeitsplätze.

¹⁷⁵Die im Rahmen der COVID-Krise geplante Schuldenaufnahme der deutschen Bundesregierung für die Jahre 2020 und 2021 betragen ca. 315 Mrd. € (Kinkartz, 2020).

¹⁷⁶WBGU, 2011.

¹⁷⁷Quelle für alle Zahlen in diesem Abschnitt: BMWi (2020a).

Genauere Aussagen zur erwartbaren Zahl neuer Arbeitsplätzen sind schwierig, z. B. weil je nach Größe und Art (On-/Offshore, Freifläche/Dachfläche) der Wind- bzw. Solarenergieprojekte mit unterschiedlichem Arbeitskräftebedarf zu rechnen ist.¹⁷⁸

Durch den in [Abschnitt III/11](#) abgeschätzten, bis 2030 notwendigen Aufbau einer Erzeugungskapazität von ca. 350 GW Photovoltaik (Zubau um ca. 300 GW) und 150 GW On- und Offshore-Windkraft (Zubau um ca. 85 GW) kann voraussichtlich mit einer Zunahme der Arbeitsplätze um mindestens 250 000 allein für Aufbau, Betrieb und Wartung gerechnet werden.¹⁷⁹ Dies kann wegfallende Arbeitsplätze in der fossilen Energiebranche voraussichtlich mehr als kompensieren.¹⁸⁰ Produktion, Forschung und Entwicklung sowie indirekte Arbeitsmarkteffekte sind hier noch nicht einbezogen.¹⁸¹

Auch die Bereitstellung der künftig wichtiger werdenden nachwachsenden Rohstoffen, welche petrochemische Produkte ersetzen, sichert dauerhaft regionale Arbeitsplätze.¹⁸²

Im Gebäudesektor sind zumindest regional ebenfalls starke Arbeitsmarkteffekte zu erwarten. Wertschöpfungsketten der Bauwirtschaft weisen geringe Importanteile auf und die Arbeitsintensität ist bei energetischen Sanierungen groß.¹⁸³ So ist bei einer Investitionssumme von 1 Mio. € in die energetische Gebäudesanierung mit 10,5 bis 10,9 Personenjahren (Netto-Vollzeitäquivalente) zu rechnen.¹⁸⁴

¹⁷⁸Die Spanne, die sich für unterschiedliche Windenergieprojekte in unterschiedlichen Ländern ergibt, sind z. B. in Aldieri et al. (2019) zusammengestellt.

¹⁷⁹Die Arbeitsintensität ist vor allem bei Photovoltaik- und Windenergieanlagen nicht gleichmäßig über die Lebensdauer verteilt. Die höchste ist im Jahr der Installation zu verbuchen. In den Folgejahren fällt weniger Arbeit an. Je nach Technologie unterscheiden sich diese Werte. Um die Größenordnung abzuschätzen, hier eine Beispielrechnung auf Basis der Daten von Rutovitz et al. (2015): Ein Photovoltaik-Zubau von 30 GW/Jahr (nur Freifläche) entspricht 385 000 Arbeitsplätzen auf Basis der Zahlen von 2015 bzw. 227 000 bei Berücksichtigung einer Reduzierung um 41% in 15 Jahren. Bei Wind (9 GW/Jahr Zubau) ergeben sich Zahlen von 28 000 (2015) bzw. 27 000 (2030) (die Degression wird hier von Rutovitz et al. (2015) mit 5% wesentlich geringer eingeschätzt), wenn der Ausbau rein onshore erfolgt (konservative Abschätzung, für offshore wird ein 2–3-mal so hoher Bedarf geschätzt). Mit Betrieb und Wartung einer Kapazität von 350 GW Photovoltaik und 150 GW Wind wären 2030 dann voraussichtlich 122 000 (Photovoltaik) bzw. 23 000 Arbeitsplätze (Wind) verbunden (hier wurden als konservative Abschätzung für Betrieb und Wartung von Windanlagen die Zahlen für offshore-Windenergie verwendet, onshore wird mit 1,5- bis 2-mal höheren Zahlen gerechnet). Insgesamt ergeben sich aus dieser Beispielrechnung für 2030 mindestens ca. 400 000 Arbeitsplätze in den Bereichen Windenergie und Photovoltaik, also etwa 240 000 mehr als heute. Mit den Annahmen aus Rutovitz et al. (2015) lassen sich Zahlen für die Arbeitsplätze in der PV- und Windindustrie in Deutschland berechnen. Diese Zahlen entsprechen auch denen aktueller Übersichten (Ferroukhi et al., 2020).

¹⁸⁰Ein direkter Vergleich zu Arbeitsplätzen der fossilen Energieerzeugung lässt sich u. a. Ram et al. (2020b) entnehmen.

¹⁸¹Aus Sicht der zu erwartenden Produktivitätssteigerung und der damit verbundenen Schaffung von Arbeitsplätzen in diesen Bereichen ist es vermutlich realistischer, mit geringeren jährlichen Zubauzahlen zu starten und diese bis 2030 kontinuierlich zu steigern. Da 2030 voraussichtlich noch nicht die volle Kapazität an Anlagen für ein weitgehend klimaneutrales Energiesystem errichtet sein wird, ist nach 2030 noch ein weiterer Zubau der Kapazitäten zu erwarten. Wenn der Aufbau der Kapazitäten bis spätestens 2040 abgeschlossen ist, geht der Zubau in Ersatzinstallation für alte Anlagen über.

¹⁸²Pollin & Garrett-Peltier, 2009; Madlener & Koller, 2007; Höher et al., 2015.

¹⁸³Kuckshinrichs et al., 2010.

¹⁸⁴Diefenbach et al., 2018; Weiß et al., 2014.

Auch die Wahl der Energie-Importquote beeinflusst die Zahl der im heimischen Energiesektor entstehenden Arbeitskräfte wesentlich.

Die Energiewende wird weltweit stattfinden und erheblichen Bedarf für technische Güter auslösen. Sie bietet große Chancen für exportorientierte Arbeitsplätze.

Da alle genannten Punkte positive Arbeitsmarkteffekte aufweisen, ist bei Umsetzung der dargestellten Maßnahmen zur Energiewende insgesamt mit einem deutlichen Impuls für den Arbeitsmarkt zu rechnen.

16. Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Energiewende

Die Energiewende in Deutschland ist und bleibt ein Gemeinschaftswerk. Der Umbau der Energieversorgung erfordert hohe Investitionen durch viele und unterschiedliche Akteur:innen. Gebäude müssen saniert, neue Fahrzeuge angeschafft, viele Solar- und Windenergieanlagen installiert werden. Infrastrukturen wie z. B. das Schienennetz, Ladepunkte für Elektromobile oder Wärmenetze müssen angepasst oder ausgebaut werden. Dies alles wird schneller erreicht, wenn regulative Rahmenbedingungen¹⁸⁵ vereinfacht und gezielte finanzielle Anreize auch für lokale, kleinere Akteur:innen gesetzt werden. Sinnvoll ist daher die Ausweitung oder Etablierung entsprechender Förder- und Finanzierungsinstrumente für Privatpersonen und Genossenschaften genauso wie für Unternehmen, Städte und Kommunen.

Die notwendige beschleunigte Transformation des Energiesystems kann gelingen, wenn Bürger:innen in Entscheidungsprozesse aktiv eingebunden werden¹⁸⁶ und wenn alle Akteur:innen an erneuerbaren Energien und Energiesparmaßnahmen sozial ausgewogen wirtschaftlich teilhaben.

Der Transformationsprozess erfordert ein gesellschaftliches Verständnis der durch die Klimakrise bedingten Handlungsnotwendigkeit, der nötigen Veränderung der Rahmenbedingungen und der daraus resultierenden Verhaltensänderung. Hierzu kann z. B. eine umfangreiche staatlich finanzierte Aufklärungskampagne¹⁸⁷ beitragen.

Zur Flankierung dieser Entwicklung bedarf es einer zeitnahen Ausrichtung der Steuern und Abgaben für Strom und fossile Energieträger an den verursachten Umwelt- und Gesundheitsschäden. Dies kann durch Änderungen im EEG-Umlagesystem, einen schnelleren und geregelten Anstieg der CO₂-Preise (so, dass sie lenkende Wirkung entfalten) sowie klare und einfache Rahmenbedingungen für die Umstellung der Strom- und Wärmeversorgung auf erneuerbare Energie erreicht werden.

Beispiele dafür sind im Wärmebereich die verpflichtende Steigerung des Anteils CO₂-neutraler Wärmequellen, die Absicherung von Risiken, die im Rahmen der Er-

¹⁸⁵ Die Rahmenbedingungen können z. B. durch Vereinfachung rechtlicher Aspekte bei Genehmigungsverfahren oder mit Blick auf lokalen Stromverkauf verbessert werden.

¹⁸⁶ Dies schließt sowohl klassische Beteiligungsverfahren als auch Bürger:innensammlungen ein (siehe z. B. Hagedorn et al., 2021).

¹⁸⁷ Vgl. Hagedorn & Peters, 2021.

schließung geothermischer Wärmepotenziale oder Einbindung von Abwärme entstehen, sowie eine sozial ausgewogene Anpassung des Mietrechts, das heute Gebäudesanierungen hemmt.

Im Strombereich sind Beispiele für solche veränderten Rahmenbedingungen die Änderung des Raumplanungsprozesses, um schnellere und dennoch naturverträgliche Genehmigungsverfahren für Wind- und Photovoltaik-Freiflächen-Anlagen zu erreichen, die Vereinfachung von Mieterstromregeln, verringerte Messpflichten für Photovoltaik-Kleinanlagen, die Rücknahme der Auktionsteilnahmepflicht für mittelgroße Photovoltaik-Anlagen und die Ermöglichung der Kombination von Agrarbeihilfen mit dem Betrieb von Agro-Photovoltaik-Anlagen¹⁸⁸. Bei der Windenergie müssen Abstandsregelung zu Wohn-, Gewerbe, Industrie- und Infrastruktur¹⁸⁹ flexibilisiert und neue Lösungen für die Berücksichtigung des Artenschutzes entwickelt werden.

Durch klare Rahmenbedingungen und Ausbauziele für Wind- und Solaranlagen, Wärmeverbünde und Anlagen zur Abwärmenutzung entsteht Planungs- und Investitionssicherheit. Zusammen mit dem Verzicht auf Subventionen im fossilen Energiebereich können Fehlinvestitionen vermieden werden. Eine solche Fehlinvestition ist z. B. der Ausbau jener Erdgas-Infrastrukturen, die zukünftig für eine erneuerbare Energieversorgung nicht benötigt werden.¹⁹⁰

Der Bau von Wind- und Solaranlagen kann beschleunigt werden, indem die Bürger:innen vor Ort in die Planung einbezogen werden und indem Gemeinden sowie Anwohner:innen wirtschaftlich vom Betrieb dieser Anlagen profitieren und deshalb Projekte in ihrem Gebiet unterstützen.¹⁹¹

Viele Befugnisse für die Klima- und Energiepolitik (z. B. European Green Deal, Regulierung des Strombinnenmarktes oder europäischer Emissionshandel) liegen bei der EU. Deutschland sollte sich daher energisch auf EU-Ebene dafür einsetzen, dass die gesamte EU ihre Klimaziele und klima- und energiepolitischen Instrumente mit dem Pariser Klimaschutzabkommen in Einklang bringt.

IV. Schlusswort

Gewiss, nicht alles ist klar. Welche Technologien skalieren ausreichend schnell? Welche Ressourcen stehen in ausreichender Menge zur Verfügung? Wie vermeidet man soziale Spaltung durch Energie-Armut?

Klar ist jedoch: Die Zeit des vorsichtigen Herantastens und des Wartens auf die besten Lösungen ist vorbei. Geeignete Technologien sind überwiegend vorhanden oder

¹⁸⁸ Dies ist im EU-Agrarrecht durchaus möglich und wird in anderen Ländern auch gemacht. Durch die deutsche Umsetzung (Direktzahlungen-Durchführungsverordnung – DirektZahlDurchfV § 12 (3) 6) wird es jedoch ausgeschlossen.

¹⁸⁹ Unter „Infrastruktur“ fallen z. B. Kleinst- und Regionalflughäfen, Drehfunkfeuer für die Flugnavigation sowie Bundeswehrinstallationen.

¹⁹⁰ Siehe Brauers et al., 2021; ein Teil der Erdgas-Infrastruktur kann auch zukünftig weiter genutzt werden. Dies beinhaltet insbesondere die Nutzung für Wasserstoff und gasförmige Syntheseprodukte.

¹⁹¹ Local Energy Consulting, 2020.

zumindest in Erprobung. Die Knappheit der Zeit und des verbleibenden CO₂-Budgets zwingt uns, den nach heutigem Wissen besten Weg jetzt sofort mit großen Schritten zu gehen. Mit einer Mischung aus Ordnungsrecht und einer wirkungsvollen Bepreisung sowohl von Emissionen als auch Naturzerstörung kann die Energiewende marktwirtschaftlich und kosteneffizient umgesetzt werden. Wenn wir dabei stets reflektieren, wissenschaftlich die sozialen und wirtschaftlichen Veränderungen kontrollieren und gegebenenfalls zügig korrigieren, werden wir Erfolg haben.

Wir brauchen hierzu alle Köpfe und Herzen. Wir brauchen eine demokratische, partizipatorische und sozial ausgewogene Energiewende unter Einbindung aller gesellschaftlichen Akteur:innen. Dies ist ein entscheidender Baustein für den Klimaschutz, den Erhalt der Biodiversität und die Zukunftssicherung unserer Gesellschaft.

© Autor:innen der Scientists for Future, CC BY-SA 4.0

V. Quellenverzeichnis

(🔒 = Closed Access)

- ACORE. (2018). *The role of renewable energy in national security (ACORE Issue Brief, 16.10.2018)*. American Council on Renewable Energy. [acore.org/wp-content/uploads/2018/10/ACORE_Issue-Brief_-The-Role-of-Renewable-Energy-in-National-Security.pdf](https://www.acore.org/wp-content/uploads/2018/10/ACORE_Issue-Brief_-The-Role-of-Renewable-Energy-in-National-Security.pdf)
- AGEB. (2020). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019 (Stand September 2020)*. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. [ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html](https://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html) & [ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html](https://www.ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html)
- Agora Energiewende. (2019). *Wie werden Wärmenetze grün? Dokumentation zur Diskussionsveranstaltung am 21. Mai 2019 auf den Berliner Energietagen 2019*. Agora Energiewende. www.agora-energiawende.de/fileadmin/Projekte/2019/Waermentetze/155_Waermentetze_WEB.pdf
- Agora Energiewende. (2021). *Corona-Jahr 2020: Rekordrückgänge bei CO₂-Emissionen und Kohleverstromung (Pressemitteilung Agora Energiewende vom 5.1.2021)*. www.agora-energiawende.de/presse/pressemitteilungen/corona-jahr-2020-rekordrueckgaenge-bei-co2-emissionen-und-kohleverstromung-1/
- Aldieri, L., Grafström, J., Sundström, K., & Vinci, C. P. (2019). Wind power and job creation. *Sustainability*, 12(1), 45. doi.org/10.3390/su12010045
- Arneth, A., Shin, Y.-J., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., Midgley, G. F., Oberdorff, T., Palomo, I., & Saito, O. (2020). Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(49), 30882–30891. doi.org/10.1073/pnas.2009584117
- BAFA. (2020). *Liste der Wärmepumpen mit Prüf-/Effizienznachweis*. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/liste_foerderfaehige_anlagen_node.html
- Bergk, F., Biemann, K., Heidt, C., Knörr, W., Lambrecht, U., Schmidt, T., Ickert, L., Schmied, M., & Schmidt, P. (2016). *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (UBA Texte 56/2016)*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf
- Bergner, J., Siegel, B., & Quaschnig, V. (2020). *Hemmnisse und Hürden für die Photovoltaik. Stand: Januar 2020*. HTW Berlin. [pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2020_01_HTW_Berlin_PV2City_Hemmnisse_und_Huerden_fuer_die_Photovoltaik.pdf](https://www.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2020_01_HTW_Berlin_PV2City_Hemmnisse_und_Huerden_fuer_die_Photovoltaik.pdf)
- Blew, J., Albrecht, K., Reichenbach, M., Bußler, S., Grünkorn, T., Menke, K., & Middeke, O. (2019). *Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Vogelkollisionen an Windenergieanlagen* (No. 518; BfN-Skripten). Bundesamt für Naturschutz. doi.org/10.19217/skr518
- BMBF. (2020). *Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre*. www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html
- BMVI. (2015). *Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland*. (No. 08/2015; BMVI-Online-Publikation). www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministrien/bmvi/bmvi-online/2015/DL_BMVI_Online_08_15.pdf?__blob=publicationFile&v=2

- BMWi (Ed.). (2017). *Die Luft ist rein. Effiziente Klima- und Lüftungsanlagen helfen Energie sparen*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/klima-und-lueftungsanlagen-flyer.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- BMWi. (2020a). *Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2018. Stand März 2020*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaeftigungszahlen-seit-2000.pdf
- BMWi. (2020b). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467
- Bowyer, C. (2010). Anticipated indirect land use change associated with expanded use of biofuels and bioliquids in the EU – an analysis of the national renewable energy action plans. Institute European Environmental Policy (IEEP). ieep.eu/archive_uploads/731/Anticipated_Indirect_Land_Use_Change_Associated_with_Expanded_Use_of_Biofuels_and_Bioliquids_in_the_EU_-_An_Analysis_of_the_National_Renewable_Energy_Action_Plans.pdf
- Brändle, G., Schönfisch, M., & Schulte, S. (2020). *Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen*. EWI Working Paper, No 20/04. Institute of Energy Economics at the University of Cologne (EWI). www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2020/11/EWI_WP_20-04_Estimating_long-term_global_supply_costs_for_low-carbon_Schoenfisch_Braendle_Schulte-1.pdf
- Brhauers, H., Braunger, I., Hoffart, F., Kemfert, C., Pao-Yu, O., Präger, F., Schmalz, S., & Troschke, M. (2021). Expansion of natural gas infrastructure: A bridge technology or a liability for the energy transition? (Version 1.1, English). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 6. doi.org/10.5281/zenodo.4536573
- Breyer, C., Fasihi, M., & Aghahosseini, A. (2020). Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: A new type of energy system sector coupling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(1), 43–65. doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y
- Bründlinger, T., König, J. E., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., Krieger, O., Mischinger, S., Prein, P., Seidl, H., Siegemund, S., Stolte, C., Teichmann, M., Willke, J., & Wolke, M. (2018). *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena) und Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH). www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- Bundesnetzagentur (BNA). (2020). Ausschreibungen für EE- und KWK-Anlagen. www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElEktrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Ausschreibungen_node.html
- Burger, B. (2021). *Energy-Charts*. Fraunhofer ISE. energy-charts.info/
- Burke, M. J., & Stephens, J. C. (2018). Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Research & Social Science*, 35, 78–93. doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.018
- Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four As. *Energy Policy*, 75, 415–421. doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005
- Chittum, A., & Østergaard, P. A. (2014). How Danish communal heat planning empowers municipalities and benefits individual consumers. *Energy Policy*, 74, 465–474. doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.001
- Clausen, J., Benne, M., & Hinterholzer, S. (2021). Wärmeplanung als Instrument der Wärmewende. Digitale Unterstützung als Schlüssel zur Verbreitung in der Verwaltung. CliDiTrans Werkstattbericht. Borderstep Institut. www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/02/Clausen-Waermeplanung_20210226.pdf
- Clausen, J., & Fichter, K. (2020). *Transformation der Wärmeversorgung. Politisches Instrumentarium und Wachstumspotenziale*. Borderstep Institut. www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/07/AP2-Politikstrategie-fuer-die-Waermewende_20200714.pdf
- Connect Energy Economics. (2014). Leitstudie Strommarkt Arbeitspaket Optimierung des Strommarktdesigns im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/leitstudie-strommarkt.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Convention for Biological Diversity. (2020). *Update of the zero draft of the post-2020 Global Biodiversity Framework*. CBD & UN Environm. Programme. www.cbd.int/doc/c/3064/749a/0f65ac7f9def86707f4eaefa/post2020-prep-02-01-en.pdf

- Covey, K., Soper, F., Pangala, S., Bernardino, A., Pagliaro, Z., Basso, L., Cassol, H., Fearnside, P., Navarrete, D., Novoa, S., Sawakuchi, H., Lovejoy, T., Marengo, J., Peres, C. A., Baillie, J., Bernasconi, P., Camargo, J., Freitas, C., Hoffman, B., ... Elmore, A. (2021). Carbon and Beyond: The Biogeochemistry of Climate in a Rapidly Changing Amazon. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 618401. doi.org/10.3389/ffgc.2021.618401
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269, 115021. doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021
- Cremonese, L., & Gusev, A. (2016). Die ungewissen Klimakosten von Erdgas – Bewertung der Unstimmigkeiten in den Daten zu Methanlecks in Europa, Russland und den USA und deren Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit. *IASS Working Paper*. doi.org/10.2312/IASS.2016.040
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., ... Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944. doi.org/10.1111/gcbb.12205
- Creutzig, F., Breyer, C., Hilaire, J., Minx, J., Peters, G. P., & Socolow, R. (2019). The mutual dependence of negative emission technologies and energy systems. *Energy & Environmental Science*, 12(6), 1805–1817. doi.org/10.1039/C8EE03682A
- Creutzig, F., Erb, K., Haberl, H., Hof, C., Hunsberger, C., & Roe, S. (2021). Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments. *GCB Bioenergy*, 13(4), 510–515. doi.org/10.1111/gcbb.12798
- Criekemans, D. (2018). Geopolitics of the renewable energy game and its potential impact upon global power relations. In D. Scholten (Ed.), *The geopolitics of renewables* (1st ed., pp. 37–73). Springer. doi.org/10.1007/978-3-319-67855-9
- Danish District Heating Association & PlanEnergi. (2018). *Solar district heating – inspiration and experiences from Denmark. Technical Report of IEA SHC TASK 55*. task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/SDH Inspiration ExperiencecDK v5.pdf
- Deutscher Bauernverband. (2020, December). *Situationsbericht 2019/20: Kap. 1.7. Bioenergie und nachwachsende Rohstoffe*. Situationsbericht Bioenergie und nachwachsende Rohstoffe. www.bauernverband.de/situationsbericht-19/1-landwirtschaft-und-gesamtwirtschaft/17-bioenergie-und-nachwachsende-rohstoffe [accessed 2021-02-16]
- Deutscher Naturschutzring, BUND, Deutsche Umwelthilfe, Greenpeace, NABU, & WWF. (2020). *Thesenpapier zum naturverträglichen Ausbau der Windenergie*. www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/wind/200130-thesenpapier-windenergieausbau.pdf
- Deutscher Wetterdienst. (o.Jahr). *Klimawandel – ein Überblick*. www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick_node.html
- D'haeseleer, W. D. (2013). *Synthesis on the economics of nuclear energy – Study for the European Commission, DG Energy. Final Report*. www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/wpen2013-14.pdf
- Dialogforum Erneuerbare Energien und Naturschutz. (2020). *Energiewende und Naturschutz – Praxisbeispiele zeigen, wie es miteinander geht*. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND); NABU (Naturschutzbund Deutschland). www.dialogforum-energie-natur.de/wp-content/uploads/2020/12/Dialogforum_GutePraxis_Energiew_A4quer_FINAL_WEB.pdf
- Diefenbach, N., Stein, B., Loga, T., Rodenfels, M., & Jahn, K. (2018). *Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2017*. Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt (IWU) und Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM). www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-alle-Evaluationen/Monitoring-der-KfW-Programme-EBS-2017.pdf
- Edwards, R., Larivé, J. F., Beziat, J. C., European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2011). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context: Report version 3c, July 2011*. Publications Office. dx.publications.europa.eu/10.2788/79018
- Eggers, J.-B., Behnisch, M., Eisenlohr, J., Poglitsch, H., Phung, W.-F., Münzinger, M., Ferrara C., & Kuhn, T. (2020). *PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland*. 35. PV-Symposium 2020, Kloster Banz, Bad Staffelstein. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/PV-Potenzial-gebaeudescharf.pdf
- Energate Messenger. (2013, October 21). *Großbritannien garantiert Einspeisevergütung für Atomkraftwerk*. www.energate-messenger.de/news/137140/grossbritannien-garantiert-einspeiseverguetung-fuer-atomkraftwerk
- Entler, S., Horacek, J., Dlouhy, T., & Dostal, V. (2018). Approximation of the economy of fusion energy. *Energy*, 152, 489–497. doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.130

- Escribano Francés, G., Marín-Quemada, J. M., & San Martín González, E. (2013). RES and risk: Renewable energy's contribution to energy security. A portfolio-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 549–559. doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.015
- Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung. (2011). *Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft; Bericht an die Bundeskanzlerin, Berlin, 30. Mai 2011*. archiv.bundesregierung.de/resource/blob/992814/394384/962/baf09452793c8a87402c9ee347379/2011-07-28-abschlussbericht-ethikkommission-data.pdf?download=1
- Etmann, M., Myhre, G., Highwood, E. J., & Shine, K. P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing: Greenhouse Gas Radiative Forcing. *Geophysical Research Letters*, 43(24), 12,614–12,623. doi.org/10.1002/2016GL071930
- EUROfusion. (2018). European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy. www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2020). *Anbauzahlen*. pflanzen.fnr.de/anbauzahlen
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2021). *Faustzahlen*. biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/
- Fath, K. (2018). *Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings*. KIT Scientific Publishing. doi.org/10.5445/KSP/1000081498
- Ferroukhi, R., Renner, M., García-Baños, C., Elsayed, S., & Khalid, A. (2020). *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020*. IRENA (International Renewable Energy Agency). www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_RE_Jobs_2020.pdf
- Fischer, C., Cludius, J., Förster, H., Fries, T., Hünecke, K., Keimyer, F., Kenkmann, T., Postpischil, R., Scherf, C.-S., Schmidt, A., Schumacher, K., Wolff, F., Zell-Ziegler, C., Brischke, L.-A., Leuser, L., & Steiner, V. (2020). *Möglichkeiten der Instrumentierung von Energieverbrauchsreduktion durch Verhaltensänderung*. TEXTE 56/2020. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/publikationen/instrumentierung-energieverbrauchsreduktion
- Flauger, J., & Witsch, K. (2020). Atomkraft für Klimaschutz? Energiekonzerne sind von neuen Pro-AKW-Demos genervt. *Handelsblatt*. www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/energie-wirtschaft-atomkraft-fuer-klimaschutz-energiekonzerne-sind-von-neuen-pro-akw-demos-genervt/26224130.html
- Fraunhofer IWES & IBP. (2017). *Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Agora Energiewende. static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf
- Gerhardt, N., Böttger, D., Trost, T., Scholz, A., Pape, C., Gerlach, A.-K., Härtel, P., & Ganai, I. (2017). *Analyse eines europäischen -95%-Klimaszenarios über mehrere Wetterjahre*. Fraunhofer IWES. www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Jahresberichte/Auswertung_7Wetterjahre_95Prozent_final_FraunhoferIWES.pdf
- Gerhardt, N., Bard, J., Schmitz, R., Beil, M., Pfennig, M., & Kneiske, T. (2020). *Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme* (46 pp.). Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE. www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_2020529.pdf
- Glanemann, N., Willner, S. N., & Levermann, A. (2020). Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nature Communications*, 11(1), 110. doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1
- Gössling, S., Humpe, A., Fichert, F., & Creutzig, F. (2021). COVID-19 and pathways to low-carbon air transport until 2050. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034063. doi.org/10.1088/1748-9326/abe90b
- Grosse, R., Christopher, B., Stefan, W., Geyer, R., & Robbi, S. (2017). *Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU*. European Commission. Joint Research Centre, ILF Consulting Engineers Austria GmbH. AIT Austrian Institute of Technology GmbH. data.europa.eu/doi/10.2760/24422
- Grunwald, A. (2010). Wider die Privatisierung der Nachhaltigkeit – Warum ökologisch korrekter Konsum die Umwelt nicht retten kann. / Against privatisation of sustainability – Why consuming ecologically correct products will not save the environment. *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society*, 19(3), 178–182. doi.org/10.14512/gaia.19.3.6
- Guler, B., Çelebi, E., & Nathwani, J. (2018). A 'Regional Energy Hub' for achieving a low-carbon energy transition. *Energy Policy*, 113, 376–385. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.044
- Günther, B., Karau, T., Kastner, E.-M., & Warmuth, W. (2011). Berechnung einer risiko-adäquaten Versicherungsprämie zur Deckung der Haftpflichttrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken resultieren. *Versicherungsforen*

- Leipzig GmbH. www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/110511_BEE-Studie_Versicherungsforen_KKW.pdf
- Günther, D., Wapler, J., Langner, R., Helmling, S., Miara, M., Fischer, D., Zimmermann, D., Wolf, T., & Wille-Hausmann, B. (2020). *Abschlussbericht. Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“ (Version 2.1)*. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE. wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-smart-im-bestand/download/Berichte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf
- Haan, P. de, Peters, A., Semmling, E., Marth, H., & Kahlenborn, W. (2015). *Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik*. UBA TEXTE 31/2015. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_31_2015_rebound-effekte_ihre_bedeutung_fuer_die_umweltpolitik.pdf
- Haendschke, S. & Deutsche Energie-Agentur. (2011). *Ungeliebt, aber unentbehrlich Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix*. www.powerfuels.org/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9059_MOB_Studie_Ungeliebt_aber_unentbehrlich.pdf
- Hagedorn, G., & Peter, F. (2021, accepted). Was müssen wir anders machen? Wie wir uns und unseren Kindern eine Zukunft gewinnen. In L. Dohm, F. Peter, & K. van Bronswijk (Eds.), *Climate Action – Psychologie der Klimakrise. Handlungshemmnisse und Handlungsmöglichkeiten*. Psycho-sozial-Verlag. 📄
- Hagedorn, G., Baasch, S., Blöbaum, A., Brendel, H., Hardt, Heiland, S., Amann, M., Matthies, E., Pfennig, A., Baisch, C., Wipfler, B., Altermatt, P.P., Baumgarten, S., Bergmann, M., Brendel, E., Bronswijk, K. van, Creutzig, F., Daub, C.-H., Dohm, L., ... Weber, U. (2021). *Scientists for Future empfiehlt eine repräsentative Klima-Bürger:innenversammlung im Jahr 2021 / Scientists for Future recommends a representative Climate Citizens' Assembly in 2021 (Version 1.1)*. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 5. doi.org/10.5281/zenodo.4417265
- Hainsch, K., Brauers, H., Burandt, T., Göke, L., Hirschhausen, C. von, Kemfert, C., Kendziorski, M., Löffler, K., Oei, P.-Y., Präger, F., & Wealer, B. (2020). *Make the European Green Deal real – Combining climate neutrality and economic recovery*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, DIW Kompakt 153. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.791736.de/diwkompakt_2020-153.pdf
- Hanaki, K., & Portugal-Pereira, J. (2018). Chapter 6: The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions. In K. Takeuchi, H. Shiroyama, O. Saito, & M. Matsuura (Eds.), *Biofuels and sustainability: Holistic perspectives for policy-making*. Springer Japan. doi.org/10.1007/978-4-431-54895-9
- Hanssen, S. V., Daioglou, V., Steinmann, Z. J. N., Doelman, J. C., Van Vuuren, D. P., & Huijbregts, M. A. J. (2020). The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, 10(11), 1023–1029. doi.org/10.1038/s41558-020-0885-y 📄
- Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit* S. 689f (6. Auflage). Springer Vieweg. 📄
- Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Kämper, C., Lambrecht, U., Jöhrens, J., & Meyer, K. (2019). *Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen*. Agora Verkehrswende. www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeuge/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. (2020). *Faktenpapier Windenergie in Hessen: Natur- und Umweltschutz*. publikationen.windindustrie-in-deutschland.de/faktenpapier-windenergie-in-hessen-natur-und-umweltschutz/55720025/14
- Hintemann, R., & Clausen, J. (2018). *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb*. Borderstep Institut. www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf
- Höher, M., Jamek, A., Limbeck, S., Tinkhof, O. M., Schmid, J., & Simader, G. R. (2015). *Regionale Wertschöpfung und Beschäftigung durch Energie aus fester Biomasse* (p. 104). Österreichische Energieagentur/Austrian Energy Agency. www.waermeausholz.at/fileadmin/content/downloads/Wertscho_pfung_Biomasse_Endbericht.pdf
- Hoekstra, A., & Steinbuch, M. (2020). Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren. www.gruenebundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/mobilitaet/pdf/200831-Studie_EAuto_versus_Verbrenner_CO2.pdf
- Hüttl, R. F., & Ossing, F. (2011). Der Ausstieg aus der Atomenergie und die Energiebilanz Deutschlands. *System Erde*, 1(2), 8–15. doi.org/10.2312/GFZ.SYSERDE.01.02.1
- Huneke, F., Linkenheil, C. P., & Niggemeier, M. (2017). *Kalte Dunkelflaute – Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter*. Greenpeace Energy eG. www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Studien/Studie_2017-06-26_GPE_Studie_Kalte-Dunkelflaute_Energy-Brainpool.pdf
- HyDeal Ambition. (2021). *Pressemitteilung: 30 Energieakteure planen Aufbau einer integrierten*

- Wertschöpfungskette, um europaweit grünen Wasserstoff zum Preis fossiler Brennstoffe anzubieten. Open Grid Europe GmbH. oge.net/_Resources/Persistent/7/f/3/7/7f3703bb54d6e385d6780db0fe5f2fbded147c21/20210210_HyDeal_Ambition_DEU.pdf
- ifeu, Fraunhofer IEE, & Consentec. (2018). *Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. Studie im Auftrag von Agora Energiewende*. Agora Energiewende & European Climate Foundation (ECF). www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf
- ILK Dresden. (2017). *Flüssigeis zur Kälte- und Wärmerversorgung*. Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH. www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/170130_Broschuere_Vakuumeis_d_e.pdf
- International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen*. www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). www.ipcc.ch/report/sr15/
- ITRPV. (2020). *Results 2019 including maturity report 11th Edition, October 2020*. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). itrpv.vdma.org/viewer/-/v2article/render/29775594
- Jahn, A., Lenck, T., & Graichen, P. (2019). *Netzentgelte 2019: Zeit für Reformen. Impuls*. Agora Energiewende. www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2014/transparenz-energiewirtschaft/Agora_Netzentgelte_2019.pdf
- Joas, F., Witecka, W., Lenck, T., Peter, F., Seiler, F., Samadi, S., Schneider, C., Holtz, G., Kobiela, G., Lechtenböhrer, S., Dinges, K., Steinbacher, K., Schröder, J., Sach, T., Schimmel, M., Kliem, C., Altmann, M., Lehnert, W., Finke, J., & Yilmaz, Y. (2019). *Klimaneutrale Industrie Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Agora Energiewende und Wuppertal Institut. static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- Jührich, K. (2016). *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe (UBA Climate Change 27/2016)*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikation/en/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf
- Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S., & Barndow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(23), 11187–11194. doi.org/10.1073/pnas.1821029116
- Kaspar, F., Borsche, M., Pfeifroth, U., Trentmann, J., Drücke, J., & Becker, P. (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. doi.org/10.5194/asr-16-119-2019
- Kasten, P. (2020). E-Fuels im Verkehrssektor. Kurzstudie über den Stand des Wissens und die mögliche Bedeutung von E-Fuels für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Öko-Institut e.V. p376185.mittwaldserver.info/fileadmin/user_upload/Dateien/Daten/Publikationen/Hintergrund/E-Fuels_im_Verkehrssektor_-_Kurzstudie_Öko-Institut_Klima-Allianz_Deutschland.pdf
- Kelm, T., Metzger, J., Fuchs, A.-L., Schicketanz, S., Günnewig, D., & Thylmann, M. (2019). *Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen*. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Bosch & Partner. www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2019/politischer-dialog-pv-freiflaechenanlagen-studie-333788.pdf
- Kinkartz, S. (2020, September 18). Mit Rekordschulden gegen die Corona-Krise. *Deutsche Welle*. www.dw.com/de/mit-rekord-schulden-gegen-die-corona-krise/a-54981660
- Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., & Müschen, K. (2010). *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieziel-2050
- Klebsch, W., Guckes, N., & Heining, P. (2020). *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel »Netz Düren«*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. www.vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltriebzuegen-data.pdf
- Kuckshinrichs, W., Kronenberg, T., & Hansen, P. (2010). Das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm der KfW: Klimaschutz, Konjunktur- und Budgeteffekt. *Wirtschaftsdienst*, 90(9), 616–623. doi.org/10.1007/s10273-010-1125-2
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., & Vajen, K. (2012). The potential of solar heat for industrial processes in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5121–5130. doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.032
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglested, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global

- aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- Lehr, U., Edler, D., O'Sullivan, M., Peter, F., & Bickel, P. (2015). Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb, heute und morgen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. GWS, DIW, DLR, Prognos, ZSW. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/beschaeftigung-durch-erneuerbare-energien-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Leopoldina (2019). *Klimaziele 2030. Wege zu einer nachhaltigen Reduktion der CO₂-Emissionen*. Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften). www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2019_Stellungnahme_Klimaziele_2030_Final.pdf
- Leopoldina, acatech, & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. (2019). *Welche Bedeutung hat die Kernenergie für die künftige Weltstromerzeugung?* Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften), acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. www.acatech.de/publikation/welche-bedeutung-hat-die-kernenergie-fuer-die-kuenftige-weltstromerzeugung/
- Leopoldina, acatech, & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. (2020). *Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität*. Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften), acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2020_Energiewende_2030_Final.pdf
- Liebich, A., Fröhlich, T., Münter, D., Fehrenbach, H., Giegrich, J., Köppen, S., Dünnebeil, F., Knörr, W., & Biemann, K. (2020). *Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht*. UBA Texte 68/2020. Umweltbundesamt (UBA). umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/tx_exte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf
- Linz, M. (2015). *Suffizienz als politische Praxis: Ein Katalog*. Wuppertal Spezial 49. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-57355
- Local Energy Consulting. (2020). *Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende – Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik*. Impuls im Auftrag von Agora Energiewende. Agora Energiewende. www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_EE-Akzeptanz/182_A-EW_Akzeptanz-Energiewende_WEB.pdf
- Lütkehus, I., Salecker, H., & Adlunger, K. (2013). *Potential der Windenergie an Land*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf
- Madlener, R., & Koller, M. (2007). Economic and CO₂ mitigation impacts of promoting biomass heating systems: An input-output study for Vorarlberg, Austria. *Energy Policy*, 35(12), 6021–6035. doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.023
- Maier, M. (2016). *Die Kommunale Wärmeplanung ein wichtiger Treiber der Wärmewende* (RENEWS SPEZIAL NR. 79/November 2016). Agentur für Erneuerbare Energien e.V. www.unendlich-viel-energie.de/media/file/531.79_Renews_Spezial_Waermeplanung_Nov2016.pdf
- Mangold, D., & Deschaintre, L. (2015). *Seasonal thermal energy storage, Report on state of the art and necessary further R+D*. Solites. task45.iea-shc.org/fact-sheets
- Mathisen, B. V., Bertelsen, N., Schneider, N. C. A., García, L. S., Paardekooper, S., Thellufsen, J. Z., & Djørup, S. R. (2019). *Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe*. Aalborg Universität. vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/316535596/Towards_a_decarbonised_H_C_sector_in_EU_Final_Report.pdf
- Mattauch, L., Creutzig, F., Moore, N. aus dem, Franks, M., Funke, F., Jakob, M., Sager, L., Schwarz, M., Voß, A., Beck, M.-L., Daub, C.-H., Drupp, M., Ekardt, F., Hagedorn, G., Kirchner, M., Kruse, T., Loew, T., Neuhoﬀ, K., Neuweg, I., ... Wallacher, J. (2020). Antworten auf zentrale Fragen zur Einführung von CO₂-Preisen (Version 2.0) – Gestaltungsoptionen und ihre Auswirkungen für den schnellen Übergang in die klimafreundliche Gesellschaft. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 2, 41 pp. doi.org/10.5281/zenodo.3644498
- Matthey, A., & Bünger, B. (2019). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten Kostensätze Stand 2/2019*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf
- Mauch, W., Corradini, R., Wiesemeyer, K., & Schwentzek, M. (2010). *Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen*. www.ffe.de/download/wissen/334_Allokationsmethoden_CO2/ET_Allokationsmethoden_CO2.pdf
- Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz (Eds.). (2020). *Handbuch Klimaschutz. Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann: Basiswissen, Fakten, Maßnahmen*. Oekom Verlag. www.oekom.de/buch/handbuch-klimaschutz-9783962382377

- Merten, F., & Scholz, A. (2021). Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten versus heimische Erzeugung – Teil 1. Kostenunterschiede, Realisierungsunsicherheiten und Reboundeffekte in Lieferländern. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 71 (1/2), 33–37. [epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7673/file/7673_Merten.pdf](https://pub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7673/file/7673_Merten.pdf)
- Michaelis, S., Rahimzei, E., Kampker, A., Heimes, H., Lienemann, C., Offermanns, C., Kehrer, M., Thielmann, A., Hettesheimer, T., Neef, C., Kwade, A., Haselrieder, W., Rahlfs, S., Uerlich, R., & Bognar, N. (2018). *VDMA Roadmap Battery Production Equipment 2030 – Update 2018*. VDMA Verlag. [elektromobilitaet.vdma.org/en/viewer/-/v2article/render/26974821](https://www.elektromobilitaet.vdma.org/en/viewer/-/v2article/render/26974821)
- Ohlendorf, N., & Schill, W.-P. (2020). Frequency and duration of low-wind-power events in Germany. *Environmental Research Letters*, 15 (8), 084045. doi.org/10.1088/1748-9326/ab91e9
- O'Sullivan, M., Overland, I., & Bresch, D. (2017). *The Geopolitics of Renewable Energy (Working Paper)*. Columbia University and Harvard Kennedy School. energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/CGEPTheGeopoliticsOfRenewables.pdf
- Palmer, G., & Floyd, J. (2020). *Energy storage and civilization: A systems approach* (Vol. 40). 186 pp. Springer International. 
- Pape, C., Gerhardt, N., Härtel, P., Scholz, A., Schwinn, R., Drees, T., Maaz, A., Sprey, J., Breuer, C., Moser, A., Sailer, F., Reuter, S., & Müller, T. (2014). *Roadmap Speicher*. Fraunhofer IWES, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Fakultät 6: Elektrotechnik und Informationstechnik, Stiftung Umweltenergierecht. www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/14.IWE_S_Roadmap-Speicher/14_IWES-et-al_Roadmap_Speicher_Langfassung.pdf
- Paravantis, J. A., & Kontoulis, N. (2020). Energy Security and Renewable Energy: A Geopolitical Perspective. In M. Al Qubeissi, A. El-kharouf, & H. Serhad Soyhan (Eds.), *Renewable Energy – Resources, Challenges and Applications*. Intech-Open. doi.org/10.5772/intechopen.81765 (Zugang nach Anmeldung)
- Persson, U., Wiechers E, Möller B, Werner S. 2019. Heat Roadmap Europe: Heat distribution costs. *Energy* 176: 604–22. doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.189
- Peschel, R., Peschel, T., Marchand, M., & Hauke, J. (2019). *Solarparks – Gewinne für die Biodiversität* (68 pp.). Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V. www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet_online.pdf
- Petschow, U., Lange, S., Hofmann, D., Pissarskoi, E., Moore, N. aus dem, Korfhage, T., Schoofs, A., & Liebich, A. (2018). *Gesellschaftliches Wohlergehen innerhalb planetarer Grenzen. Der Ansatz einer vorsorgeorientierten Postwachstumsposition*. UBA TEXTE 89/2018 (UBA Texte). Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/publikationen/vorsorgeorientierte-postwachstumsposition
- Pfennig, A. (2019). Sustainable bio- or CO₂ economy: Chances, risks, and systems perspective. *ChemBioEng Reviews*, cben.201900006. doi.org/10.1002/cben.201900006
- Pollin, R., & Garrett-Peltier, H. (2009). *Building the Green Economy: Employment effects of green energy investments for Ontario*. University of Massachusetts-Amherst. www.peri.umass.edu/fileadmin/pdf/other_publication_types/green_economics/Green_Economy_of_Ontario.PDF
- Profijt, M. (2018). *Mobilitätssuffizienz, Grundlagen – Messung – Förderung*, Wuppertaler Schriften zur Forschung für eine nachhaltige Entwicklung, Band 11. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. [epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7074/file/WSFN11_Profijt.pdf](https://pub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7074/file/WSFN11_Profijt.pdf)
- Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut. (2020). *Klimaneutrales Deutschland*. Im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland/
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE-Studie* (UBA Climate Change 36/2019). Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/rescue
- Rahmstorf, S. (2019). *Wie viel CO₂ kann Deutschland noch ausstoßen?* *KlimaLounge*. scilogs.spektrum.de/klimalounge/wie-viel-co2-kann-deutschland-noch-ausstossen/
- Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., & Breyer, C. (2018). A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015–2030. *Journal of Cleaner Production*, 199, 687–704. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.159 
- Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, S. A., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa, L. S. N. S., Fasihi, M., Khalili, S., & Breyer, C. (2019). *Global energy system based on 100% renewable energy – power, heat, transport and desalination sectors*. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group. energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf
- Ram, Manish, Galinova, T., Bogdanov, D., Faisihi, M., Gulagi, A., Breyer, C., Micheli, M., & Crone,

- K. (2020a). *Powerfuels in a renewable energy world – Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050*. LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). www.powerfuels.org/fileadmin/powerfuels.org/Dokumente/Global_Alliance_Powerfuels_Study_Powerfuels_in_a_Renewable_Energy_World.pdf
- Ram, M., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020b). Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119682. doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008
- Ramez, N. (2020). Solar's future is insanely cheap. Blog: Ramez Naam. rameznaam.com/2020/05/14/solars-future-is-insanely-cheap-2020/
- Raven, P. (2021, February). Letter regarding use of forests for bioenergy (February 11, 2021). To President Biden, President von der Leyen, President Michel, Prime Minister Suga, and President Moon. www.woodwellclimate.org/letter-regarding-use-of-forests-for-bioenergy/
- Repenning, J., Emele, L., Blanck, R., Böttcher, H., Dehoust, G., Förster, H., Greiner, B., Harthan, R., Henneberg, K., Hermann, H., Jörß, W., Loreck, C., Ludig, S., Matthes, F. Chr., Scheffler, M., Schumacher, K., Wiegmann, K., Zell-Ziegler, C., Braungardt, S., ... Ziesing, H.-J. (2015). *Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit*. Öko-Institut / Fraunhofer ISI. www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf
- Richter, M., Safarik, M., & Heinrich, C. (2014). *Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung. Ein Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/klimafreundliche_gebaeudeklimatisierung.pdf
- Robinus, M., Markewitz, P., Lopion, P., Kullmann, F., Heuser, P.-M., Syranidis, K., Cerniauskas, S., Reuß, M., Ryberg, S., Kotzur, L., Caglayan, D., Welder, L., Linßen, J., Grube, T., Heinrichs, H., Stenzel, P., & Stolten, D. (2019). *Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Kurzfassung)*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Lehrstuhl für Brennstoffzellen RWTH Aachen University. www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf?__blob=publicationFile
- Román-Palacios, C., & Wiens, J. J. (2020). Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4211–4217. doi.org/10.1073/pnas.1913007117
- Ruhnau, O., Hirth, L., & Praktiknjo, A. (2020). Heating with wind: Economics of heat pumps and variable renewables. *Energy Economics*, 92, 104967. neon.energy/Ruhnau-Hirth-Praktiknjo-2020-Heating-with-wind.pdf
- Rutovitz, J., Dominish, E., & Downes, J. (2015). *Calculating global energy sector jobs: 2015 Methodology update*. Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/43718/1/Rutovitzetal2015Calculatingglobalenergysectorjobsmethodology.pdf
- Samaras, C., Nuttall, W. J., & Bazilian, M. (2019). Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100409. doi.org/10.1016/j.esr.2019.100409
- Sandrock, M., Maaß, C., Weisleder, S., Westholm, H., Schulz, W., Löschan, G., Baisch, C., Kreuter, H., Reyer, D., Mangold, D., Riegger, M., & Köhler, C. (2020). *Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmesquellen am Beispiel tiefergeothermischer Ressourcen (UBA Climate Change | 31/2020)* (p. 357 pp.). Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/publikationen/effiziente-fernwaermeversorgung-mit-niedertemperaturwaerme
- Sauer, D. U. (2019). Wege zu einem integrierten Energiesystem – was jetzt geschehen muss. Impuls des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“. energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESY_S_Impuls_Wege_zu_einem_integrierten_Energiesystem.pdf
- Schill, W.-P., Zerrahn, A., Kemfert, C., & Hirschhausen, C. von. (2018). Die Energiewende wird nicht an Stromspeichern scheitern. *DIW Aktuell*, 2018-11. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.591369.de/diw_aktuell_11.pdf
- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(1–2), 127–140. doi.org/10.1002/cite.201700129
- Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, 3(1), 81–100. doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Ahmad, A., Katsuta, T., Ramana, M. V., Wealer, B., Stienne, A., & Meinass, F. (2020). *The World Nuclear Industry Status Report 2020, Paris, September 2020*. Mycle Schneider Consulting. www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_hr.pdf

- Scholten, D., & Bosman, R. (2016). The geopolitics of renewables; exploring the political implications of renewable energy systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 273–283. doi.org/10.1016/j.techfore.2015.10.014
- Seegerer, A. H., & Rosenkranz, E. (2018). Das große Insektensterben: Was es bedeutet und was wir jetzt tun müssen (2. Auflage). oekom.
- Seidl, H., Schenuit, C., Teichmann, M., Limbacher, E.-L., Mann, J., & Dünwald, A. (2018). *Impulse zur Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik*. www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9238_Ergebnispapier_der_Taskforce_Netzentgelte_Impulse_zur_Weiterentwicklung_der_Netzentgeltsyst.pdf
- Sgouridis, S., Carbajales-Dale, M., Csala, D., Chiesa, M., & Bardi, U. (2019). Comparative net energy analysis of renewable electricity and carbon capture and storage. *Nature Energy*, 4(6), 456–465. doi.org/10.1038/s41560-019-0365-7
- SolarPower Europe and LUT University. (2020). *Renewable Europe – how to make Europe’s energy system climateNeutral before 2050* (Kurzversion auf Anfrage verfügbar). www.solarpowereurope.org/100-renewable-europe/
- Sørensen, P. A., & Schmidt, T. (2018). Design and construction of large scale heat storages for district heating in Denmark. planenergi.dk/wp-content/uploads/2018/05/Soerensen-and-Schmidt_Design-and-Construction-of-Large-Scale-Heat-Storages-12.03.2018-004.pdf
- Sotscheck, R. (2019, January 17). Britische AKW-Projekte scheitern. Nun auch noch Atom-Brexit. Taz. taz.de/Britische-AKW-Projekte-scheitern/!5563581/
- SRU. (2020). *Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget*. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_02_Pariser_Klimaziele.pdf?__blob=publicationFile&v=21
- Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., Bett, A., & Henning, H.-M. (2020). *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem*. Fraunhofer-ISE. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf
- Sterner, M., Thema, M., Eckert, F., Lenck, T., & Götz, P. (2015). Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool Studie im Auftrag von Greenpeace Energy. www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Windgas-Studie_2015_FENES_GPE_lang.pdf
- Sterner, M., Bauer, F., Hofrichter, A., Rank, D., Schumm, L., Heberl, M., Thema, M., Exenberger, M., & Bollerhey, T. (2021). Analyse des deutschen Abnahmemarktes für grünen Wasserstoff und PtX-Produkte. Entwicklung des H2Global Konzeptes für Deutschland. Studie im Auftrag der GIZ und des BMWi. Institut für Energiespeicher (IFES), Regensburg.
- Taylor, M. (2020). *Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Energy_subsidies_2020.pdf
- Thamling, N., Pehnt, M., & Kirchner, J. (2015). *Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*. Prognos. www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20151220_prognos_hintergrundpapier_ees.pdf
- Toprani, A. (2019). *Oil and the great powers: Britain and Germany, 1914 to 1945* (First edition). Oxford University Press.
- Trier, D., Bava, F., Skov, C. K., & Sorensen, S. S. (2018). Solar district heating – Trends and possibilities: Characteristics of ground-mounted systems for screening of land use requirements and feasibility. task52.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/SDH-Trends-and-Possibilities-IEA-SHC-Task52-PlanEnergi-20180619.pdf
- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer, U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, S., & Vollprecht, J. (2020). *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf
- UBA. (2019a). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen
- UBA. (2019b). *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/umweltschaedliche-subventionen-in-deutschland#umweltschadliche-subventionen
- UBA. (2020a). *Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#landwirtschaftlich-genutzte-moore
- UBA. (2020b). *Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren
- UBA. (2020c, Feb. 14). *Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs*. Umweltbundesamt

- (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#endenergieverbrauch-steigt-seit-2010-wieder-an
- UBA. (2020d). Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent
- UBA. (2021). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Umweltbundesamt (UBA). www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland-emissionsentwicklung
- United Nations (2021). *United Nations. (2021). Sustainable Development. Sustainable Development. sdgs.un.org/* (accessed 2021-02-20)
- Vakulchuk, R., Overland, I., & Scholten, D. (2020). Renewable energy and geopolitics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109547. doi.org/10.1016/j.rser.2019.109547
- Walter, A., & Wiehe, J. (2018). *Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050*. Bundesamt für Naturschutz. www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript501.pdf
- WBGU. (2011). *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation. 2. Veränderte Auflage*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2011/pdf/wbgu_jg2011.pdf
- WBGU. (2020). *Globale Umweltveränderungen. (2020). Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration.Hauptgutachten*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2020/pdf/WBGU_HG2020.pdf
- Wealer, B., Bauer, S., Göke, L., Hirschhausen, C. von, & Kemfert, C. (2019a). Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung (Version 2.0). *DIW Wochenbericht*. doi.org/10.18723/DIW_WB:2019-30-1
- Wealer, B., Bauer, S., Göke, L., Hirschhausen, C. V., & Kemfert, C. (2019b). Economics of nuclear power plant investment. Monte Carlo Simulations of generation III/III+ investment projects. *Discussion Papers of DIW Berlin*. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.698579.de/dp1833.pdf
- Wealer, B., Bauer, S., Hirschhausen, C. v., Kemfert, C., & Göke, L. (2021). Investing into third generation nuclear power plants – Review of recent trends and analysis of future investments using Monte Carlo Simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110836. doi.org/10.1016/j.rser.2021.110836
- Weiß, J., Prahl, A., Neumann, A., Schröder, A., Bettgenhäuser, K., Hermelink, A., John, A., & Manteuffel, B. v. (2014). *Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung (KoWeG). Endbericht*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Ecofys. www.klimaschutz.de/sites/default/files/Endbericht_KoWeG_final_für_veröffentlichung_mit_logo.pdf
- Wietschel, M., Bekk, A., Breitschopf, B., Boie, I., Edler, J., Eichhammer, W., Klobasa, M., Marscheider-Weidemann, F., Plötz, P., Sensfuß, F., Thorpe, D., & Walz, R. (2020). *Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten* (Policy Brief 03/2020). Fraunhofer ISI. www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf
- Wijk, A. van, & Chatzimarkakis, J. (2020). *Green Hydrogen for a European Green Deal – A 2x40 GW Initiative*. Hydrogen Europe. dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-04-01_Dii_Hydrogen_Studie2020_v13_SP.pdf
- Wirth, H. (2020a). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Fassung vom 10.06.2020. Fraunhofer ISE. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf
- Wirth, H. (2020b). *Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende. Positionspapier*. Fraunhofer ISE. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Integrierte_PV_Positionspapier.pdf
- Wuppertal Institut. (2020). *CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5°C-Grenze*. Wuppertal Institut. pub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606_CO2-neutral_2035.pdf
- Yergin, D. (1991). *The prize: The epic quest for oil, money, and power*. Simon & Schuster.
- Zerrahn, A., Schill, W.-P., & Kemfert, C. (2018). On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources. *European Economic Review*, 108, 259–279. doi.org/10.1016/j.eurocorev.2018.07.004
- Zerzawy, F., Fiedler, S., & Mahler, A. (2017). *Subventionen für fossile Energien in Deutschland*. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS). www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/2017-07-04_gpd_report_subventionen_fuer_fossile_energien_in_deutschland.pdf

VI. Anhang

Videos zum Thema: Publikationen zu einer künftigen Energieversorgung kommen teilweise zu sehr unterschiedlichen Schlüssen, je nachdem wie stark sie z. B. kurzfristige Kostenaspekte, die in Teilen der Bevölkerung vorhandene Abneigungen gegen Windkraft oder den Klimaschutz priorisieren. Um Zusammenhänge besser verstehen zu können, empfehlen – wir in Ergänzung der zitierten Literatur – eine Reihe von Videos und Podcasts. Diese ersetzen nicht die 16 Orientierungspunkte. Im Gegenteil, in manchen Fällen weichen die Videos in Details von den hier vorgestellten Einsichten ab, da sie teilweise andere Schwerpunkte, Perspektiven oder Prioritäten haben. Wichtiger noch: Zu vielen wichtigen Unterthemen haben wir keine geeigneten Videos gefunden. Dennoch halten wir die auf einer Webseite gesammelten Videos für eine sinnvolle Verständnishilfe, siehe hier: de.scientists4future.org/videoempfehlungen-klimavertraegliche-energieversorgung-fuer-de

Tabelle 1 (folgende Seite). *Übersicht Energiebedarf und Ausbauleistungen Photovoltaik und Wind in verschiedenen Studien. Die Zahlen beziehen sich auf Deutschland und sofern nicht anders angegeben auf das Jahr 2050. "Energiebedarf (Stand 2030)" weist soweit verfügbar den Bedarf im Jahr 2030 aus. Solange Energieeinsparungen noch nicht voll umgesetzt sind, ist der Bedarf stets höher als im Endstand einer klimaverträglichen Energieversorgung. So sind z. B. Maßnahmen der Gebäudesanierung nur vergleichsweise langsam umsetzbar. Die Importe sind, soweit erkenntlich, die Summe aus dem Strom- und Energieträger-Import. Angaben bei Strombedarf schließen, soweit erkennbar, Stromimporte ein. Bei Photovoltaik, Wind onshore und offshore ist die Nennleistung angegeben.*

Anmerkungen:

^a: Aus Grafik abgelesen und daher geschätzt

^b: Aus Ausbauzielen + Bestand mit Volllaststunden-Annahmen berechnet

^c: Bezieht sich auf das Szenario „Suffizienz“ („Suffizienz 2035“ basiert im Wesentlichen auf den Annahmen von „Suffizienz“)

^d bezogen auf 2050, sonst angegeben

^e Erzeugung 2050 in DE

^{T1} Purr et al., 2019 Detaillierte Aufstellung zum Energiebedarf in Tab 5-3 S.96, Alle Angaben hier ohne nicht-energetischen Bedarf von 282 TWh, Stromerzeugung in Deutschland aus Graphik S.98, Importe S.140.

^{T2} Sterchele et al., 2020, Erzeugungskapazität aus Abb.24 S.48 und Tabelle 1, S.18, Energie aus Abb.3, S.23/Anhang.

^{T3} Prognos et al., 2020, Tabelle S.31 und Graphik S.47 für Endenergie.

^{T4} Bründlinger et al., 2018.

^{T5} SolarPower Europe & LUT, 2020. Die Studie basiert auf einem auf Europa ökonomisch optimierten Modell, Werte aus Abbildungen S.51/S.52, Klimaneutral 2050.

^{T6} Ram et al., 2019: Deutscher Anteil der weltweiten Studie, keine Importe von Deutschland, Werte aus Abb. S.52 sowie pers. Mitteilungen des Autors.

^{T7} Wuppertal Institut, 2020; die Studie basiert auf Zahlen für das Zieljahr 2050 (S.43ff). Es wurde angenommen, dass der Bedarf an Photovoltaik- und Windanlagen, der zur Deckung des Bedarfs 2050 nötig ist, schon 2035 erreicht sein muss. Damit wurden drei Ausbauszenarien abgeleitet. Die hier angegebene Kapazität wurde aus der jeweiligen Szenario-Ausbaurate und dem heutigen Bestand (Burger, 2020) mit Annahmen zu Volllaststunden berechnet (Photovoltaik 980h, 53GW Bestand; Wind Land 2800h, 55GW; Wind See 4100h, 8GW; Biomasse 46 TWh, Wasser 18 TWh).

^{T8} Mehr Demokratie & BürgerBegehren Klimaschutz, 2020; die Szenarien für den Energiebedarf sind auf S.35 beschrieben, Stromerzeugung ab S.55 erläutert. Die Autoren des Handbuches rechnen mit einem Strombedarf in 2040 von ca. 1900 TWh/Jahr, wovon 1200 TWh/Jahr Strom in Deutschland erzeugt werden muss.

Studie und Szenario	Energiebedarf 2030 [TWh/Jahr]	Energiebedarf [TWh/Jahr] ^d	Importe [TWh/Jahr] ^d	Strombedarf [TWh/Jahr] ^d	Photovoltaik [GW] ^d	Wind onshore [GW] ^d	Wind offshore [GW] ^d
UBA RESCUE: ^{T1} Green Supreme	1866	1056	100 ^a	750 ^a	130 ^a	125 ^a	35 ^a
UBA RESCUE: Green Ee1	1971	1305	120 ^a	790 ^a	170 ^a	125 ^a	35 ^a
UBA RESCUE: Green Late	2199	1768	400 ^a	920 ^a	230 ^a	155 ^a	35 ^a
Fraunh. ISE 2020: ^{T2} Suffizienz 2035	2012 ^c	1500 ^{ac} (End) 1750 ^{ac} (Primär)	570 (2035) 70 (2050)	1186 ^{ac}	185 (2035) 384 (2050)	147 (2035) 176 (2050)	38 (2035) 56 (2050)
Fraunh. ISE 2020: Referenz 100	2334	1950 ^a (End) 2300 ^a (Primär)	70 ^a (2050)	1440 ^a	410 ^a	230 ^a	80 ^a
AGORA: ^{T3} Klimaneutral 2050	2118	1580	348 (PtX)	962	355	130	70
DENA-Leitstudie: ^{T4} 95 EL	2588 (Primär)	1861 (Primär)	396 (PtX)	1156	165	179	33
DENA-Leitstudie: 95 TM	2644 (Primär, 2030)	2007 (Primär)	744 (PtX)	1139	114	171	26
LUT 2020: ^{T5} Moderate	(keine Angabe)		?	1069 ^e	600 ^a	120 ^a (inkl. offshore)	(s. Summe links)
LUT 2020: Leadership	(keine Angabe)		?	1297 ^e	615 ^a	150 ^a (inkl. offshore)	(s. Summe links)
LUT: Germany ^{T6}	(keine Angabe)	2450 (End) 2630 (Primär)	0	2426	1400 ^a	220 ^a (inkl. offshore)	(s. Summe links)
WI 2020/FFF: ^{T7} Effizienzsteigerungen und Import größerer Mengen	(keine Angabe)		350–700	807	145	159	38
WI 2020/FFF: Effizienzsteigerungen und relativ geringer Import	(keine Angabe)		150	1404	428	219	75
WI 2020/FFF: Effizienzstei- gerung, suffiziente Lebens- stile und geringer Import	(keine Angabe)		65	1026	308	159	53
Handbuch Klimaschutz: ^{T8}	(keine Angabe)	1900 (in 2040)	(20–60%, je nach Szenario)	1200 (in 2038)	500	150	55