



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license



Zukunftsbild Fokussiert – Energieversorgung

Version 1.0

Andreas Pfennig, Alexander Graf, Bernadette Menacher, Regine Rehaag

Wissenschaftliches Review: Franziska Hoffart

Sprachliche Durchsicht und Satz: Lea Musiolek, Isabel Schmittknecht

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.

Zitervorschlag:

Pfennig, A., Graf, A., Menacher, B., Rehaag, R. (2022) Energieversorgung – Version 1.0, Zukunftsbild Fokussiert, DOI 10.5281/zenodo.6421448

2040 – Wir haben schon viel erreicht

Globale Perspektive: Trotz aller Anstrengungen bei der globalen Energiewende werden weltweit noch rund 40% der Primärenergie fossil gedeckt. 2021 hatte dieser Wert noch bei 87% gelegen. Durch die Beschleunigung der Energiewende werden jedes Jahr weitere etwa 2,5% des globalen Primärenergiekonsums durch erneuerbare Ressourcen ersetzt, sodass die globale Energiewende spätestens 2055 abgeschlossen sein wird. Ab 2055 wird Energie also nur noch nachhaltig und insbesondere ohne Einsatz fossiler Energieträger bereitgestellt.

ERKLÄRUNG: Die zugrundeliegenden Szenarien basieren auf Bilanzen beispielsweise für Energie, CO₂ und Landfläche (1), die die Entwicklung der Vergangenheit in die Zukunft fortschreiben, dabei aber eine gezielte Veränderung ausgewählter Parameter erlauben, um deren Einfluss zu bewerten. Diese Szenarien beschreiben die Welt insgesamt, die Perspektive für Deutschland ist mit sinnvollen Annahmen daraus abgeleitet, die sich an aktuellen Daten orientieren. Für das Energieszenario wird angenommen, dass der globale Ausbau von Wind- und Sonnenenergie mit 20% pro Jahr zunimmt, was etwa der mittleren Entwicklung der letzten zehn Jahre entspricht (2). Da der Ausbau nicht immer weiter zunehmen kann, wird eine Obergrenze des Ausbaus bei einer Substitution von 3% des Primärenergiekonsums pro Jahr angenommen (Energie nach der Substitutionsmethode berechnet). Dies entspricht der Rate, mit der Solaranlagen und Windkraftträder, die heute eine Lebensdauer von etwa 30 Jahren aufweisen, jährlich ausgetauscht werden müssen, also der Rate, die nach der Energiewende benötigt wird, um die dann vorhandenen Anlagen in Betrieb zu halten. Eine höhere Substitutionsrate würde bedeuten, dass Überkapazitäten bei der Herstellung von Solaranlagen und Windkraftträdern nach der Energiewende abgebaut werden müssten, was wirtschaftlich nur bedingt sinnvoll ist (3). Dies ist zwar keine harte Grenze, beschreibt aber einen zügigen Ausbau, der herausfordernd ist, wenn er global bis 2055 durchgehalten werden soll. Zudem wird angenommen, dass der globale mittlere Primärenergiekonsum von heute 21 500 kWh bis 2070 linear bis auf 27 400 kWh pro Kopf und Jahr zunimmt, da dies nach Arto et al. (4) ein entwickeltes Leben in Wohlergehen zulässt. Ein Mehrbedarf an Energie für eine CO₂-Ökonomie ist nicht berücksichtigt, da diese deutlich teurer ist als eine Bioökonomie, die beim Zukunftsbild Fokussiert stattdessen realisiert wird (5).

Deutschland: Deutschland ist der weltweiten Entwicklung etwa 10 Jahre voraus und hat damit seine Vorreiterrolle seit 2020 behauptet. In Deutschland werden 2040 bereits etwa 85% der Primärenergie erneuerbar erzeugt, die Energiewende wird spätestens 2045 abgeschlossen sein. Der Energie-Konsum wurde bis 2040 gegenüber 2020 um etwa 15% reduziert. Dies wurde durch technischen Fortschritt und wenige, fokussiert ausgewählte Energiesparmaßnahmen erreicht, die wesentliche und längerfristige Einsparungen bewirken, wie die bessere Wärmedämmung von Gebäuden und die Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen. Die Versorgung mit erneuerbarer Energie geschieht vorrangig über Strom (ca. 950 TWh pro Jahr). Heizung und Kühlung von Gebäuden erfolgt entsprechend über Wärmepumpen und lokale Wärmenetze. Einen nennenswerten Anteil bei der Deckung des Wärmebedarfs macht auch die direkte Speicherung und Nutzung der Sonnenwärme aus. Ein verbleibender Rest-Anteil zum Beispiel zur Heizung denkmalgeschützter und andere Gebäude, die technisch nicht umgerüstet werden können, wird über Bioenergie wie beispielsweise Biogas oder Ethanol als Brennstoff bereitgestellt.

FACETTENVERWEIS: Energie, Güter und Dienstleistungen



ERKLÄRUNG: Das Szenario für Deutschland ergibt sich ausgehend vom heutigen Stand bei einer Entwicklung des Ausbaus mit gleichen Annahmen wie bei der globalen Entwicklung (2). Um dies zu erreichen, wird nach Klafka (6) nach Abschluss der Energiewende etwa fünffach mehr Strom durch Sonnen- und Windenergie bereitgestellt werden müssen, als dies 2020 der Fall war. Bis 2060 wird der Pro-Kopf-Primärenergiekonsum etwa 30 000 kWh pro Kopf und Jahr (nach Substitutionsmethode (1)) und der Endenergiekonsum 14 000 pro Kopf und Jahr erreichen. Dies liegt etwas oberhalb des globalen Mittelwertes, da davon auszugehen ist, dass die zur Gebäudeheizung benötigte Energie vom jeweiligen Breitengrad abhängt und in Deutschland daher ein gegenüber dem globalen Mittelwert leicht erhöhter Energiebedarf resultiert. In 2040 liegt der Endenergiekonsum bei etwa 20 000 kWh pro Kopf und Jahr. Die Abnahme gegenüber etwa 30 000 kWh pro Kopf und Jahr in 2019 (7) ist zum größten Teil darauf zurückzuführen, dass die fossilen Brennstoffe bereits zum größten Teil durch erneuerbaren Strom ersetzt wurden, sowie auf eine darüber hinausgehende Energieeinsparung von 15 %, die mit fokussierten, effizienten Maßnahmen erreicht wird. Die Umsetzung der Energiewende wird durch Energiesparen erleichtert, wobei besonders solche Sparmaßnahmen wichtig sind, die viel bringen, den Lebensstil aber nur wenig beeinflussen. Beispiele sind eine bessere Wärmeisolierung bei Gebäuden, die Nutzung kleinerer Pkw, eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen, die Wahl nähergelegener Urlaubsziele und der technische Fortschritt zum Beispiel mit sparsameren Haushaltsgeräten. Weitergehende Energiesparmaßnahmen werden nicht benötigt, da die wesentliche Reduktion des CO₂-Ausstoßes durch eine Beschleunigung der Energiewende bewirkt wird. Zur Stabilisierung des Klimas müssen weltweit in der Größenordnung von 2 000 Gt CO₂ wieder aus der Atmosphäre entfernt werden (8). Bezogen darauf bewirken viele weitere in der Literatur vorgeschlagene Energiesparmaßnahmen nur kleine Reduktionen des CO₂-Ausstoßes, die teilweise deutliche Veränderungen des Lebensstils erfordern (siehe zum Beispiel (9; 10; 11; 12; 13)). Wenn die Energiewende abgeschlossen ist, hat der Pro-Kopf-Energiekonsum keinen wesentlichen Einfluss mehr auf den Klimawandel. Es wird beim Zukunftsbild Fokussiert daher davon ausgegangen, dass nur wesentliche Energieeinsparungen realisiert werden, die sich auch im Geldbeutel der Konsument:innen positiv bemerkbar machen und die durch eine Bepreisung der CO₂-Emissionen angetrieben werden. Darüber hinausgehende Sparmaßnahmen werden sich nur schwer allgemein durchsetzen lassen, insbesondere, da viele dieser Maßnahmen einen deutlichen Einfluss auf den Lebensstil haben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich auch zukünftig manche Menschen dafür entscheiden, individuell besonders energiesparfam zu leben.

Den größten Teil der Stromversorgung decken Solarzellen auf Dächern, auf Freiflächen sowie Windkraftanlagen an Land und off-shore. Stromimporte in größerem Umfang werden nicht benötigt. Die Speicherung des Stroms findet zu einem großen Teil direkt in Batterien zum Beispiel in Gebäuden, Pkw und Nutzfahrzeugen statt, von deren Kapazität beispielsweise 10 bis 25 % für diese Speicherung freigegeben werden können (Smart Grid, das heißt energieintensive Geräte wie beispielsweise E-Autos und Wärmepumpen und Stromversorger sind vernetzt und kommunizieren, um die Speicher- und Pufferkapazität des Elektrizitäts-Systems optimal zu nutzen), was entsprechend finanziell honoriert wird. Durch intelligente Steuerung kann die jeweilige Batterie aber auf Wunsch der Nutzer:innen auch voll geladen werden, beispielsweise wenn eine längere Fahrt geplant ist. Überschussstrom wird durch Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt. Dieser wird in Kavernen und anderen Gasspeichern gelagert und entweder bei Bedarf durch Gasturbinen oder Gasmotoren kurzfristig wieder in Strom umgewandelt, oder in industriellen Produktionsprozessen genutzt. So werden die verschiedenen Sektoren des Energiesystems eng miteinander verkoppelt. Die Gesteungskosten (Herstellungskosten) für Strom, dessen Verfügbarkeit dem täglichen Bedarf entsprechend nachgeführt wird, liegen bei etwa 0,07 € ohne Netzkosten (Kostenbasis 2020). Damit sind die Energiekosten unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung, die nach der Energiewende entfällt, vergleichbar wie 2020.

ERKLÄRUNG: Dieses Szenario ergibt sich aus detaillierten Szenarienrechnungen von Peter Klafka (6). Für die Wasserstoffherzeugung wird 85 % Effizienz von PEM-Elektrolyseuren angenommen, die Wasserstoff bei erhöhtem Druck erzeugen und schnell an- und abfahren werden können. Das Ausbauszenario stimmt auch überein mit dem von Gerhards et al. (14), auch wenn dort eine schnellere Energiewende gefordert wird und der Anteil der Bioenergie begrenzt ist, weil die vegane Ernährungswende, die beim Zukunftsbild Fokussiert zugrunde gelegt wird, unberücksichtigt bleibt. Auch bei Gerhards et al. (14) ergibt eine Literaturlauswertung, dass die Energiekosten nach der Energiewende nicht notwendigerweise höher sind als heute.

Flugzeuge, Schiffe und einige industrielle Prozesse, die Brennstoffe benötigen, werden mit flüssigen Biokraftstoffen betrieben (ca. 300 TWh pro Jahr).

FACETTENVERWEIS: Ernährung

ERKLÄRUNG: Im Szenario wird zugrunde gelegt, dass 2040 Schiffe und Flugzeuge aufgrund der hohen Energiedichte weiterhin mit flüssigen Treibstoffen betrieben werden. Durch die vegane Ernährungswende ist hierfür ausreichend Landfläche verfügbar ohne die globale Ernährungssicherheit zu gefährden. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass 10 % des Primärenergie-Konsums durch biogene Brennstoffe bereitgestellt werden, was für Schiffe, Flugzeuge und industrielle Prozesse, bei denen nicht auf Wasserstoff als Energieträger oder Strom umgestellt werden kann, ausreichend ist. Der Bedarf an Landfläche zur Erzeugung der Bioenergie kann dabei nicht alleine in Deutschland



FACETTENVERWEIS:

Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe

FACETTENVERWEIS: Ernährung, Landnutzungswandel und Böden, Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe

gedeckt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass Bioenergie wie im folgenden Abschnitt genauer ausgeführt aus flächenreicheren Ländern importiert werden muss.

In Deutschland steht pro Kopf weniger landwirtschaftlich nutzbare Fläche als in anderen Ländern wie beispielsweise Australien, USA und Argentinien zur Verfügung. Daher reicht trotz veganer Ernährungswende diese Landfläche nicht aus, um innerhalb von Deutschland in ausreichender Menge neben Nahrungsmitteln auch Bio-Kraftstoffe nachhaltig zu erzeugen und BECCS zu betreiben (bio-energy with carbon capture and storage, Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung). Bei BECCS wird Bio-Energie genutzt, das beim Verbrennen der Biomasse entstehende CO₂ abgetrennt und unterirdisch gespeichert, zum Beispiel in alten Erdgaslagerstätten. BECCS ist eine der Optionen für sogenannte negative Emissionen, bei denen CO₂ aktiv aus der Atmosphäre entfernt wird. BECCS und Bio-Kraftstoffe stellen im Zukunftsbild Fokussiert jeweils etwa 10% des Primärenergiekonsums bereit. Da die Landfläche in Deutschland dafür nicht ausreicht, muss für biobasierte Energie eine Landfläche von etwa 2000 m² pro Person in anderen Ländern gegen eine angemessene Vergütung genutzt werden, die über deutlich mehr Fläche pro Person verfügen als Deutschland. Dies sind insgesamt fast 170 000 Hektar. Die genaue Flächenaufteilung wird im Facettentext „Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe“ begründet. Die auf dieser Fläche produzierte Biomasse wird teilweise in den Erzeugerländern direkt vor Ort eingesetzt, beispielsweise um den Beitrag Deutschlands zu den negativen Emissionen zu realisieren. Die dort erzeugten Bio-Kraftstoffe werden nach Deutschland importiert.

ERKLÄRUNG: Da ein stabiles und der menschlichen Zivilisation zuträgliches Klima nur dann sichergestellt werden kann, wenn die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wieder auf 350 ppm reduziert wird, was etwa dem Niveau Ende der 1980er Jahre entspricht, muss CO₂ in großem Maßstab aus der Atmosphäre abgetrennt und gespeichert werden (8). Dieser Wert wurde zwar in der Nachfolge angezweifelt, allerdings steigt beispielsweise seit Jahrzehnten der Meeresspiegel durch das Abschmelzen der Eisschilde auf Grönland und der West-Antarktis, was klar auf ein seit Jahrzehnten instabiles Erdsystem hinweist (15). Beim Zukunftsbild Fokussiert werden die sogenannten negativen Emissionen durch Aufforstung und BECCS erreicht (16). Für beides ist aufgrund der veganen Ernährungswende nach Szenarien von Pfennig (3; 1) global ausreichend fruchtbare Landfläche verfügbar ohne die Ernährungssicherheit der Menschheit zu gefährden, siehe die Facettentexte „Ernährung“, „Landnutzungswandel und Böden“, und „Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe“. Deutschland ist im Vergleich zu anderen Ländern allerdings relativ dicht besiedelt, sodass Landfläche in anderen Ländern genutzt werden muss, die mehr fruchtbare Fläche zur Verfügung haben.

Das als Alternative zur Umsetzung der negativen Emissionen vorgeschlagene DACCS (direct air carbon capture and storage) wird im Zukunftsbild „Fokussiert“ nicht berücksichtigt. Bei DACCS würde, anders als bei BECCS, zwar keine Konkurrenz mit der Nahrungsmittelerzeugung um Ackerland auftreten, sodass keine vegane Ernährungswende nötig würde. Allerdings würde eine CO₂-Ökonomie zu einem erheblichen Mehrbedarf an Energie führen, der die Energiewende verzögern, und zu sehr hohen zusätzlichen Kosten führen würde (5). Zur Verdeutlichung der Mehrkosten ergeben Szenarien von Pfennig (1) bei einer Zuordnung der Kosten für die CO₂-Ökonomie nach den Kalorien eines Lebensmittels eine Verteuerung eines 200-g-Schweinekoteletts um 1,50 €, eines 250-g-Stückes Butter um 6,60 € und eines Liters Milch um 2,35 €. Im Facettentext „Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe“ wird im Detail begründet, warum Bio-Kraftstoffe und Bio-Materialien sich am Markt gegenüber zum Beispiel Power-to-X-Kraftstoffen, bei denen überschüssige Sonnen- und Windenergie zur Herstellung von Wasserstoff und anderen Kraftstoffen genutzt werden, und CO₂-basierten Materialien durchsetzen werden. Solche CO₂-basierten Materialien sind beispielsweise Methanol und andere Kohlenwasserstoffe, die als Ausgangsmaterial für die Chemische Industrie oder als Brennstoff verwendet werden können.

Beginn der 2020er Jahre – Die Maßnahmen, die uns auf den Weg brachten

Zu Beginn der 2020er Jahre wurden die Maßnahmen zur Beschleunigung der Energiewende beschlossen. Die Entwicklung im Energiesektor wurde durch die systematische Bepreisung von CO₂-Emissionen ausgelöst und vorangetrieben. Dies wurde in den Folgejahren systematisch fortgeführt und dem Fortschritt beim Erreichen der Klimaziele immer wieder angepasst, sodass der CO₂-Preis 2035 bei etwa 200 € pro Tonne CO₂ liegt. Der Ausstieg aus der Kernenergie erfolgte 2022, aus der Kohleverstromung 2038, also wie 2021 geplant.

ERKLÄRUNG: Der Preis von 200 € pro Tonne CO₂ in 2035 entspricht dem Wert, der zum Erreichen der Klimaziele führt (17; 18; 19). Dieser Betrag ist beispielhaft für die erwartete Größenordnung, denn ein genauer Wert lässt sich nicht wissenschaftlich belastbar vorhersagen. Es ist zu erwarten, dass bei einer planbaren Klimapolitik dieser Preis nicht erreicht wird, weil die Firmen zur Vermeidung der hohen Kosten für fossil-basierte Produkte und dem daraus resultierenden



Wettbewerbsnachteil frühzeitig auf nachhaltigere Produkte und Produktionsmethoden umstellen.



Literatur

1. Pfennig, A. Bilanz-basierte Welt-Szenarien (2021). URL <https://www.vision3000.eu/sustainability-en/scenario-explorer-en>.
2. BP. Statistical Review of World Energy June 2019. bp-stats-review-2019-all-data.xlsx (2020). URL <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
3. Pfennig, A. Sustainable Bio- or CO2 economy: Chances, Risks, and Systems Perspective. *ChemBioEng Reviews* **6**, 90–104 (2019). URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cben.201900006>.
4. Arto, I., Capellán-Pérez, I., Lago, R., Bueno, G. & Bermejo, R. The energy requirements of a developed world. *Energy for Sustainable Development* **33**, 1–13 (2016). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082616301892>.
5. Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S. & Heidel, K. A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere. *Joule* **2**, 1573–1594 (2018). URL [https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351\(18\)30225-3](https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351(18)30225-3).
6. Klafka, P. Persönliche Mitteilung an A. Pfennig (zu aktuellen Kosten für erneuerbare Elektrizität volatil und stabilisiert in Deutschland) (2020).
7. UBA Umweltbundesamt. Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Statistik, UBA Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2020). URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>.
8. Hansen, J. *et al.* Target Atmospheric CO2: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal* **2** (2008). URL <https://openatmosphericssciencejournal.com/VOLUME/2/PAGE/217/>.
9. HWG. *Energie Spar ebook. Geld sparen und Klima schützen!* (neobooks Self Publishing, 2017). URL <https://www.neobooks.com/ebooks/hwg-hwg-energie-spar-ebook-ebook-neobooks-AWAHB1URymV8rf8gNHtE?toplistType=undefined>.
10. Lettenmeier, M., Akenji, L., Koide, R., Amellina, A. & Toivio, V. 1.5-degree lifestyles. Targets and options for reducing lifestyle carbon footprints – A summary. Tech. Rep., SITRA, Helsinki (2019). URL <https://www.sitra.fi/en/publications/1-5-degree-lifestyles/>.
11. Koschak, M. *Klimaschutz im Alltag. Kleine Taten - grosse Wirkung* (BuchVerlag für die Frau, Leipzig, 2020). URL <https://buchverlag-fuer-die-frau.de/Unsere-Buecher/Natur-und-Gesundheit/Klimaschutz-im-Alltag--Kleine-Taten---grosse-Wirkung.html>.
12. Poortinga, W., Steg, L., Vlek, C. & Wiersma, G. Household preferences for energy-saving measures: A conjoint analysis. *Journal of Economic Psychology* **24**, 49–64 (2003). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016748700200154X>.
13. SITRA. Pathways to 1.5-degree lifestyles by 2030. Blog, Helsinki, SITRA (2020). URL <https://www.sitra.fi/en/publications/pathways-to-1-5-degree-lifestyles-by-2030/>.
14. Gerhards, C. *et al.* Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany—16 points of orientation. Tech. Rep. 7, Scientists for Future, Berlin (2021). URL <https://zenodo.org/record/4409334>.
15. Nerem, R. S. *et al.* Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **115**, 2022–2025 (2018). URL <https://www.pnas.org/content/115/9/2022>.
16. Fuss, S. *et al.* Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* **13**, 063002 (2018). URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
17. Umweltbundesamt, Bürger, A., Lünenbürger, B. & Kühleis, C. CO2-Bepreisung in Deutschland - Ein Überblick über die Handlungsoptionen und ihre Vor- und Nachteile - UBA fact sheet. Tech. Rep., UBA Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2019). URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-bepreisung-in-deutschland>.
18. BMU Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und nukleare Sicherheit & Schulze, S. Schulze: CO2-Preis kann sozial gerecht gestaltet werden - BMU-Pressemitteilung (2019). URL <https://www.bmu.de/PM8614>.
19. Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., Knopf, B. & Pahle, M. Optionen für eine CO2-Preisreform - MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Gutachten / Stellungnahme, Sachverständigenrat zur Begutachtung der Gesamtwirtschaftlichen Entwicklung / Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change



(MCC) gGmbH / Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung e.V. (PIK) (2019).
URL <https://www.sachverstaendigenrat->

[wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/
Arbeitspapiere/Arbeitspapier_04_2019.
pdf.](https://wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Arbeitspapiere/Arbeitspapier_04_2019.pdf)