

Nationale Eigenversorgung und Bedarf an internationalem Energiebezug

Aktuelle Situation

Die verschärfte geopolitische Lage im Jahr 2022 hat die gefühlte Versorgungssicherheit an Energie und Energieträgern in Deutschland erschüttert. Als Resultat wurde der Ruf nach einem resilienteren Energiesystem lauter und Deutschlands Importabhängigkeit von Energieträgern wurde gesellschaftlich in Frage gestellt.

In diesem Kontext lohnt ein Blick auf die Primärenergieversorgung Deutschlands in den letzten Jahren. Unsere Primärenergieversorgung wird noch immer massiv von fossilen Energieträgern dominiert. 2021 lag dieser Anteil bei 77%, wobei Mineralöl und Erdgas zusammen bereits 59% des Primärenergieverbrauchs ausmachen (Weltenergieat - Deutschland e.V., 2022). Sowohl Mineralöl als auch Erdgas wird nahezu vollständig importiert (98% bei Mineralöl, 95% bei Erdgas), sowie Steinkohle zu 100%. Daher lag 2021 die Importabhängigkeit, definiert als Verhältnis der importierten Primärenergie zum gesamten Primärenergieverbrauch, in Deutschland bei 71%.

Die Energieversorgungslage in 2022 wurde maßgeblich dadurch verschärft, dass wir den Hauptteil der fossilen Importe an Mineralöl, Erdgas und Steinkohle aus Russland bezogen und somit zu diesem Land die stärkste energiebedingte Abhängigkeit bestand (Weltenergieat - Deutschland e.V., 2022). Durch die forcierten Energieeinsparmaßnahmen und den milden Winter konnte der Erdgasbedarf 2022 zwar um 15% gesenkt werden. Doch dieser Rückgang wurde teilweise durch einen erhöhten Import von Öl und Steinkohle aufgebraucht, was insgesamt dazu führte, dass der Primärenergiebedarf nur um 2% zurückging. Dabei wurde der Wegfall russischer Energieimporte durch einen verstärkten Bezug an Energieträgern aus den USA, Niederlanden, Norwegen und Südafrika ausgeglichen, so dass insgesamt auch 2022 die Importabhängigkeit bei 71% blieb.

Deutschlands Ziel der Klimaneutralität bis 2045 stellt unser Energiesystem vor eine weitere Herausforderung. Insbesondere die Sektoren Wärme und Verkehr verzeichnen einen eher stagnierenden

Anteil erneuerbarer Energien bei lediglich 7% im Verkehr und 17% im Wärmesektor im Jahr 2022 (AGEE-Stat, 2023). Daher stellt sich die Frage: Wie könnte sich der Primärenergiebedarf von einem klimaneutralen Deutschland verändern und wie wirkt sich dies auf unsere Energieimportabhängigkeit aus?

Mögliche Transformationspfade des Energiesystems für ein klimaneutrales Deutschland

Eine Studie des Fraunhofer ISE hat mögliche Transformationspfade hin zu einem klimaneutralen Deutschland aufgezeigt. Als Grundlage für die Szenarienentwicklung wurden vier unterschiedliche gesellschaftliche Verhaltensweisen genutzt (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020): Von einem Beharren auf konventionellen Technologien („Beharrung“) bis hin zu einem breiten gesellschaftlichem Wandel, der auch größere Energieeinsparmaßnahmen ermöglicht („Suffizienz“).

Es zeigte sich, dass alle Szenarien zu einem geringeren Primär- und Endenergiebedarf in allen Sektoren führen, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß (► *Abbildung 1*). Dies kann auf die direkte Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs zurückgeführt werden, sowie erhöhte Energieeffizienz und die indirekte Elektrifizierung durch den verstärkten Einsatz von Wasserstoff, E-Fuels und Biomasse. So würde der Anteil der Elektrizität am Endenergiebedarf von 18% im Jahr 2019 auf 40% bis 70% in 2045 ansteigen. Die voranschreitende Elektrifizierung wird den Strombedarf Deutschlands bis 2045 in allen Szenarien somit mehr als verdoppeln. Dafür könnten Wind- und Solarenergie die tragenden Säulen des zukünftigen Energiesystems darstellen mit insgesamt ca. 1300 TWh Primärenergiebereitstellung in 2045 (Brandes, et al., 2021).



DLR

Dr. Nicole Neumann
nicole.neumann@dlr.de

Juan Pablo Rincon Duarte
juan.rinconduarte@dlr.de

Dr. Martina Neises-von Puttkamer
martina.neises@dlr.de

Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

Dirk Krüger
dirk.krueger@dlr.de

DBFZ

Dr. Kathleen Meisel
kathleen.meisel@dbfz.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

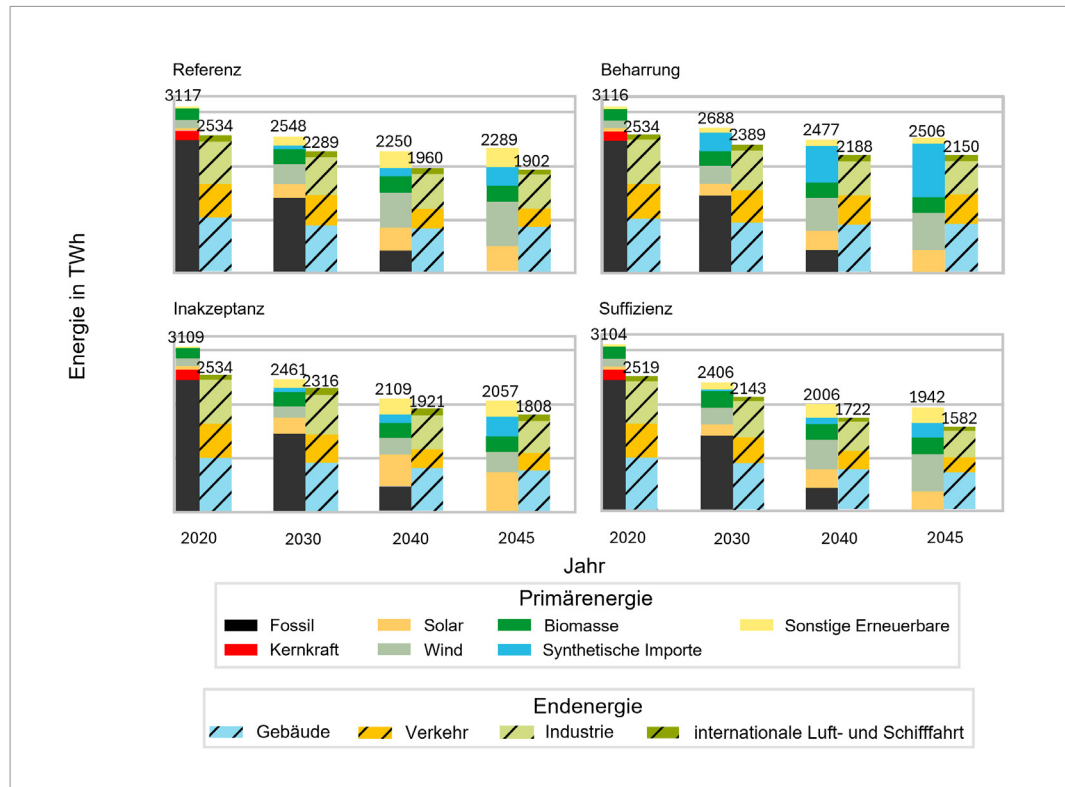
UFZ

Dr. Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

► Abbildung 1

Primär- und Endenergiebedarf für vier Szenarien möglicher Transformationspfade zur Klimaneutralität Deutschlands bis 2045

(Quelle: Brandes, et al., 2021)



Um diese Energiesystemtransformation zu bewerkstelligen, muss neben einem starken Ausbau der installierten Leistung an Wind und PV auch das Wasserstoffnetz ausgebaut werden sowie die inländischen und grenzübergreifenden Stromnetzkapazitäten.

Potenziale und Beiträge erneuerbarer Technologien zur Energieeigenversorgung

Eine Potenzialanalyse des Fraunhofer IEE zum Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland zeigt, wie sich das Erreichen eines klimaneutralen Energiesystems auf die installierte Leistung auf regionaler Ebene auswirken könnte. Dafür wurden drei Szenarien definiert, welche auf dem Netzausbauplan für ein klimaneutrales Deutschland 2045 basieren. Hier werden die Ergebnisse für ein Szenario mit hohem Anteil Wasserstoff und für ein Szenario mit intensiver Elektrifizierung dargestellt (Pape & Geiger, 2023).

Windenergie

Zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2045, müsste sich die installierte Nennleistung an Windkraftanlagen an Land von derzeit 56 GW auf etwa 160 GW erhöhen, was einer Verdreifachung der Leistung entspricht.

Insbesondere entlang der Westküste Schleswig-Holsteins, der westfriesischen Nordseeküste und im Paderborner Land gibt es noch signifikante Ausbaupotenziale. Hingegen sind geringere Zuwächse in Regionen wie dem Rhein-Main-Gebiet, dem Ruhrgebiet und dem Nationalpark Harz zu erwarten.

Das Ergebnis liegt auch im Rahmen der Resultate der Fraunhofer ISE-Studie, die in einzelnen Szenarien sogar Werte bis 200 GW installierte Nennleistung Wind an Land beinhalten. Potenzialstudien gehen für Deutschland von einem möglichen Ausbau bis zu 230 GW installierter Leistung für Windkraftanlagen an Land aus (Masurowski, Drechsler, & Frank, 2016). Die im Windenergieflächenbedarfs-gesetz 2023 festgelegten 2% der Bundesfläche für Windkraftanlagen an Land könnten bei einer vergleichbaren Leistungsdichte wie bisher die benötigte Leistung für einen klimaneutralen Energiesystem bereits abdecken.

Allerdings muss sich in den nächsten Jahren die Zubaurate um den Faktor 5 im Vergleich zum Durchschnitt von 2020-2022 drastisch erhöhen. Im Jahr 2023 wird das Ausbaziel voraussichtlich verfehlt, was die Situation weiter verschärft (Windguard).

Photovoltaik

Hier müsste sich nach den Studien von Fraunhofer IEE und Fraunhofer ISE die installierte Leistung

bis 2045, je nach Szenario, fast versiebenfachen auf ca. 400 GW.

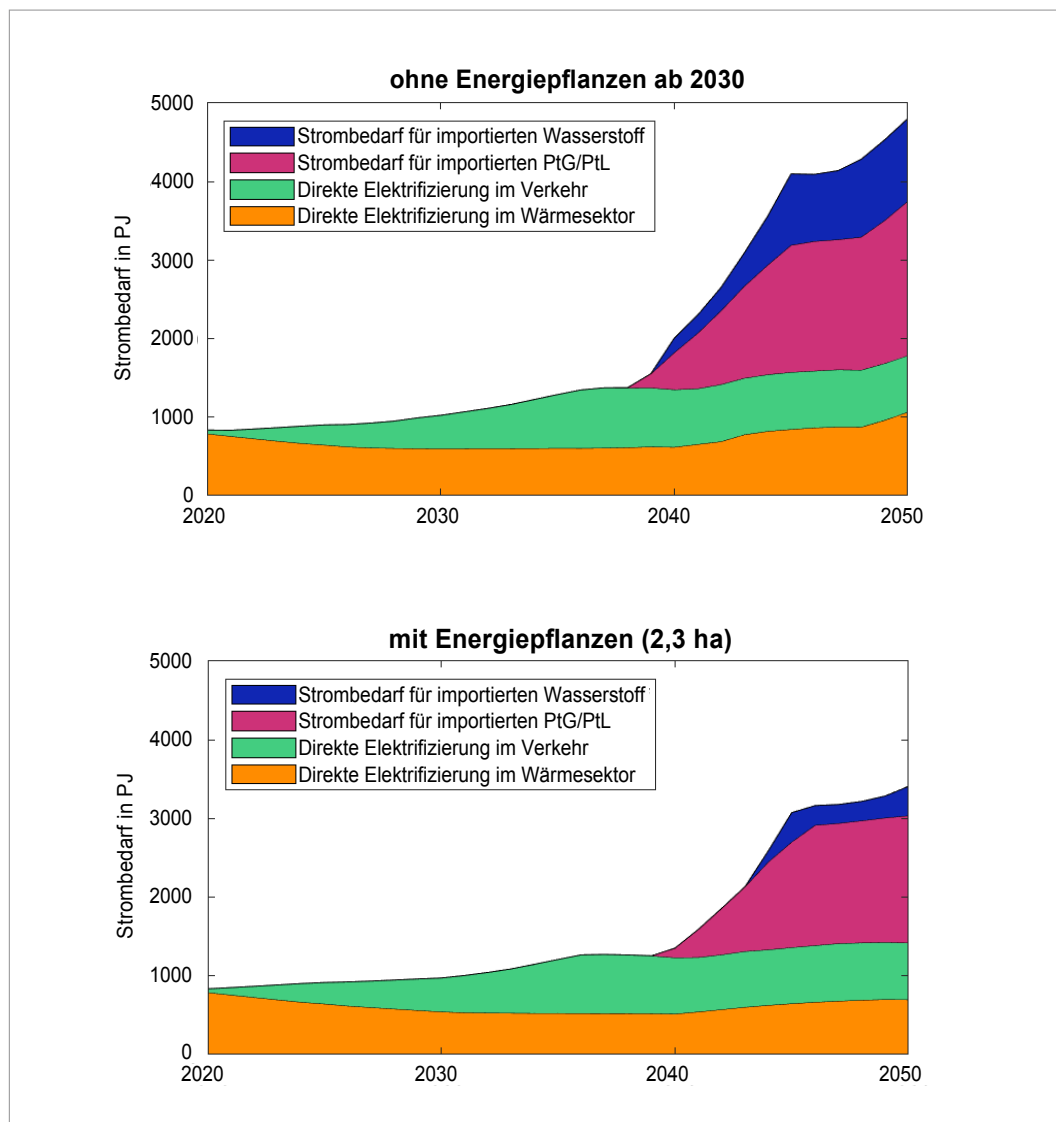
Das höchste Potenzial wird bei Aufdach-PV gesehen, insbesondere in den Metropolregionen. Freiflächen-PV kann mit Flächen entlang von Autobahnen und Schienenwegen sowie Agrarflächen mit niedriger Bodenqualität beitragen. Auch hier liegt die benötigte installierte Leistung noch unterhalb des ermittelten Ausbaupotenzials. So ergab eine Studie des KIT (Fath, 2018) ein Potenzial für Freiflächen-PV von 190 GW und Aufdach-PV von 610 GW. Die Herausforderung besteht hier wieder in dem schnelleren Ausbau, im Falle von PV um den Faktor 2 bis 4 im Vergleich zu 2020 mit 4.9 GWp Zubau. (Wirth, et al., 2021).

Energiepflanzen

Die Nutzung von Energiepflanzen kann ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten. Aktuell werden ca. 6,4% der

Bundesfläche für den Anbau von Energiepflanzen genutzt. Eine langfristige Umverteilung der aktuell genutzten Biomassepotenziale in die schwer zu elektrifizierenden Bereichen des Energiesystems, kann die zukünftige Importabhängigkeit von Power-to-X-Energieträgern (PtX) deutlich verringern. Dies betrifft insbesondere Hochtemperatur-Industrieanwendungen mit einem Wärmebedarf über 500 °C, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr kostenintensiv möglich ist.

Weitere sinnvolle Einsatzgebiete für Biomasse sind der Schiffs- und Flugverkehr sowie die Bereitstellung von Flexibilität im Stromsektor. Die erneuerbare Alternative in diesen Bereichen ist in der Regel der Import von PtX-Energieträgern (Bundesregierung, 2020). Langfristig kann durch den weiteren Einsatz von Energiepflanzen der Strombedarf zur Herstellung von H₂ und PtX, sowie der direkten Elektrifizierung um ~389 TWh reduziert



► Abbildung 2

Vergleich des Strombedarfs ohne bzw. mit die Nutzung von Energiepflanzen

für die direkte Elektrifizierung im Strom- und Wärmesektor sowie für die Produktion von importiertem H₂ und PtX

(Quelle: Jordan, et al., 2023)

(► *Abbildung 2*) und damit die Importabhängigkeit und die Kosten der Energiewende deutlich verringert werden (Jordan, et al., 2023). Da ein Verzicht auf Energiepflanzen auch mit vielen positiven Effekten verbunden ist, wie z.B. der Reduktion des Flächendrucks in Deutschland, sollte diese Entscheidung sorgfältig abgewogen werden.

Solarthermie

Bei konzentrierender Solartechnik bietet sich eine Kopplung mit kostengünstigen thermischen Energiespeichern an, wodurch hohe Deckungsgrade erreicht werden können. Vielversprechende Anwendungsgebiete umfassen insbesondere die Wärmeversorgung der Industrie oft zwischen 100 und 200 °C, aber auch bis ca. 350 °C, z.B. für Chemiebranche, Lebensmittelbranche und Textilindustrie.

Insbesondere Parabolrinnenkollektoren können in großen Anlagen unter deutschen Wetterbedingungen ab ca. 5 MW niedrigere Wärmegestehungskosten als die Verbindung aus PV und Elektroheizern erreichen mit ca. 4 cent/kWh statt ca. 6 cent/kWh (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch, & Stengler, 2021) und benötigen erheblich weniger Fläche zur Aufstellung als PV. Daher hat diese Technologie ein hohes Potenzial zur Dekarbonisierung des Wärmesystems. In Nachbarländern mit ähnlichen solaren Bedingungen wurden kürzlich Anlagen im Pilotmaßstab erfolgreich getestet, z.B. die Versorgung eines Chemiewerks mit 2,5 MW und 280°C (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch, & Stengler, 2021), sodass auch für den Standort Deutschland eine zeitnahe Einführung in industriellem Maßstab zu erwarten ist.

Fazit

Deutschland hat also das Potenzial die benötigte installierte Leistung an PV und Windkraftanlagen für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2045 zu verwirklichen. Dafür müssen die Zubauraten drastisch und schnellstmöglich erhöht werden, um das Ausbauziel fristgerecht zu erreichen. Auch Biomasse, Solarthermie oder Geothermie können insbesondere bei der Wärmebereitstellung einen wichtigen Beitrag leisten und damit auch den steigenden Strombedarf Deutschlands abmildern.

Deutschlands zukünftiger Bedarf an Energieimporten

Die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten hat im Jahr 2022 verstärkt Aufmerksamkeit erhalten, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Transformation unseres Energiesystems hin zu einem klimaneutralen Deutschland.

Je nach gesellschaftlicher und politischer Verhaltensweise können sich unterschiedliche Transformationspfade mit abweichendem Importbedarf ergeben (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020). Die benötigte Importmenge an Wasserstoff und dessen Derivaten (PtX) hängt entscheidend von den zu erwartenden Effizienzsteigerungen, dem Elektrifizierungsgrad und dem totalen Endenergiebedarf ab (Brandes, et al., 2021) (Jordan, et al., 2023), aber auch von der Technologie- und Energieträgerwahl wie Biomasse, Solarthermie oder Geothermie für schwer zu elektrifizierende Bereiche (Jordan, et al., 2023) (Krüger, Inigo Labairu, Dersch, Hirsch & Stengler, 2021).

Ein Festhalten an konventionellen Technologien würde zu einem erheblichen Bedarf an PtX von ca. 20% im Szenario „Beharrung“ für das Jahr 2045 führen. Dazu kommt noch inländisch produzierter Wasserstoff, so dass der Wasserstoffanteil am Primärenergiebedarf auf ca. 29% stiege.

Dagegen würden eine Anpassung der Verbrauchsgewohnheiten und die Umsetzung von Suffizienz-Szenarien den Importbedarf erheblich reduzieren. Trotzdem bleibt selbst in einem Suffizienz-Szenario ein gewisser Bedarf an Energieimporten bestehen, wenn auch in geringerem Umfang von ca. 3% im Jahr 2045.

Dies verdeutlicht die Bedeutung des Aufbaus von Infrastruktur und Produktionskapazitäten für Wasserstoff und dessen Derivate. Besonders im Schiffs- und Luftverkehr, der Stahlindustrie und im Chemiebereich werden diese Energieträger eine wichtige Rolle spielen, sodass der Aufbau und Ausbau einer innerdeutschen Wasserstoff-erzeugungs- und Verteilungsstruktur unverzichtbar sind. Ebenso ist die innerdeutsche Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus systemischer Sicht sinnvoll, trotz geringerer Volllaststunden. Dies könnte eine wichtige Ergänzung zu anderen nachhaltigen Energiequellen sein (Brandes, et al., 2021) (Sterchele, et al., 2020).

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Deutschland die Klimaneutralität bis 2045 aus technologischer und systemischer Sicht erreichen kann. Wind und Photovoltaik werden die wichtigsten Primärenergiequellen sein und somit stark zur Reduzierung der Importabhängigkeit beitragen, vorausgesetzt, die Zubauraten steigen drastisch. Energielieferanten wie Energiepflanzen und konzentrierte Solarthermie können den Umbau des

Wärmesektors unterstützen. Der Bedarf an Energieimporten hängt jedoch von den politischen Rahmenbedingungen und dereingesetzten Technologie ab.

Ein klimaneutrales Energiesystem kann insgesamt zu einer geringeren Importabhängigkeit führen als das aktuelle System. Um allerdings ein resilienteres Energiesystem zu schaffen, sollte Deutschland auf eine diverse Importstruktur von Energieträgern und Importländern setzen. Dies ist auch im Hinblick auf geopolitische Entwicklungen in den exportierenden Ländern von großer Bedeutung. Mögliche Kandidaten für zukünftige exportierende Länder könnten z.B. Spanien, die Ukraine, Brasilien, Australien und Algerien sein (Hank, et al., 2023).

Literatur

- AGEE-Stat. (15. 11 2023). Von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick> abgerufen
- Brandes, J., Haun, M., Wrede, D., Jürgens, P., Kost, C., & Henning, H.-M. (2021). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Update November 2021: Klimaneutralität 2045. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Bundesregierung. (06 2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Fath, K. (2018). Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Hank, C., Holst, M., Thelen, C., Kost, C., Längle, S., Schaadt, A., & Smolinka, T. (2023). Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- Jordan, M., Meisel, K., Dotzauer, M., Schröder, J., Cyffka, K.-F., Dögnitz, N., Schmid, C., Lenz, V., Naumann, K., Daniel-Gromke, J., Costa de Paiva, G., Schindler, H., Esmaili Aliabadi, D., Szarka, N., Thrän, D. (2023): The controversial role of energy crops in the future German energy system: The trade offs of a phase-out and allocation priorities of the remaining biomass residues Energy Rep. 10 , 3848 - 3858 10.1016/j.egy.2023.10.055
- Krüger, D. R., Inigo Labairu, J., Dersch, J., Hirsch, T., & Stengler, J. (17. 06 2021). Concentrating collectors for Central Europe. Konferenzbeitrag, 24tes Kölner Sonnenkolloquium. Köln, Deutschland: <https://elib.dlr.de/145703/>.
- Krüger, D., Leicht, J., Fahr, S., Epp, B., Krüger, J., Bonleitner, S., . . . Stengler, J. (2022). Standardized Balance of Plant Engineering for Solar Process Heat. 28th SolarPACES Conference.
- Masurowski, F., Drechsler, M., & Frank, K. (10 2016). A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany. Energy Policy, S. 343-350.
- Pape, C., & Geiger, D. (2023). Regionalisierung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien. Kassel: Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE.
- Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., . . . Henning, H.-M. (2020). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- Weltenergieerat - Deutschland e.V. (2022). Energie für Deutschland - Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext. Berlin: Weltenergieerat - Deutschland e.V.
- Windguard. (kein Datum). Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland - Jahr 2022. Varel: Deutsche WindGuard GmbH.
- Wirth, H., Kost, C., Kramer, K., Neuhaus, H., Peper, D., Rentsch, J., & Senkpiel, C. (2021). Solaroffensive für Deutschland - Wie wir mit Sonnenenergie einen Wirtschaftsboom entfesseln und das Klima schützen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.