

Windenergie



Die Stromerzeugung aus Windenergie stellt einen wesentlichen Faktor der künftigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dar. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland aus Windenergie an Land (onshore) 118,2 TWh Strom erzeugt. Zusätzlich wurden auf See (offshore) 23,9 TWh Strom erzeugt. Mit 52,2 % hatte die Windkraft damit erstmals einen Anteil von mehr als der Hälfte an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Die Windenergie deckte damit über 27 % des deutschen Bruttostromverbrauchs. Ende 2023 waren in Deutschland 28.677 Windenergieanlagen (WEA) an Land [1] mit einer Gesamtleistung von insgesamt 61,0 GW [2] und 1.566 Offshore-WEA auf See [3] mit insgesamt 8,5 GW [2] installiert.

Die Stromgestehungskosten für Windkraft an Land lagen nach [4] im Jahr 2024 bei ca. 4,3 bis 9,2 ct/kWh, Offshore bei ca. 5,5 bis 10,3 ct/kWh.

Im Gegensatz zur Solarenergie (PV) ist das Dargebot aus Windenergie insbesondere in den Monaten Oktober bis April deutlich höher als während der Sommermonate, wie Abbildung 1 zeigt.

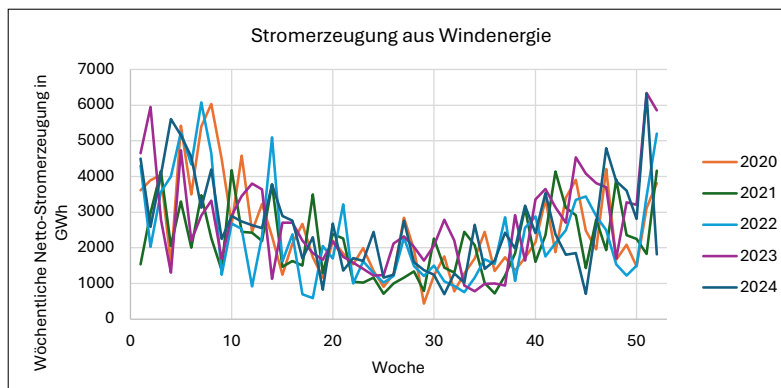


Abbildung 1: Wöchentliche Stromerzeugung aus Windenergie in Deutschland (on- und offshore) für die Jahre 2020-2024. Eigene Darstellung, Datenquelle www.energy-charts.info.

Somit können sich PV und WEA bei der Bedarfsdeckung sehr gut ergänzen. Das Winddargebot ist darüber hinaus jährlichen Schwankungen unterworfen. Außerdem musste in den letzten Jahren die Einspeisung von WEA mancherorts infolge nicht ausreichender Leitungskapazitäten eingeschränkt werden.

Technik

Windenergieanlagen (WEA) haben eine intensive technologische Entwicklung durchlaufen. Sie werden heute in großen Stückzahlen üblicherweise als dreiflügelige Windturbinen mit horizontaler Achse gebaut. Andere Bauformen wurden und werden immer noch entwickelt, konnten sich aber für große Leistungen bislang nicht durchsetzen. Als Sonderbauform wurden auch WEA realisiert, bei denen im Fuß des Turms ein Wasserspeicher integriert ist, der als Oberbecken eines kleinen Pumpspeicher-Kraftwerks eingesetzt wird. Heute realisierte Onshore-Anlagen erreichen Nennleistungen von 5-6 MW bei Nabenhöhen bis 160 m und Rotordurchmessern bis etwa 150 m [1].

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft
(ETG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach
Tel. +49 69 6308-346
etg@vde.com

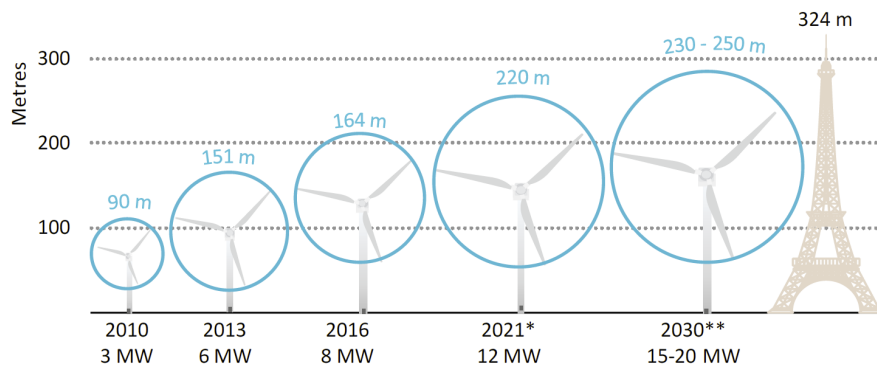


Abbildung 2: Entwicklung der größten kommerziell verfügbaren Windturbinen [5]

Im Offshore-Bereich stellen Nennleistungen im Bereich 5-12 MW den Stand der Technik dar. Leistungen bis 15 MW sind bereits in der Planung. Die Nabenhöhen erreichen bis 145 m und Rotordurchmesser bis 236 m [3].

Als Generatoren in WEA kommen mehrere Technologien in Frage:

- Asynchronmaschine (ASM)
- doppelt gespeiste ASM
- Synchronmaschine (SM, mit/ohne Getriebe, permanent- oder fremderregt) mit Vollumrichter.

Die Asynchronmaschine entspricht aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Anpassung der Drehzahl nicht mehr dem Stand der Technik. Die beiden letztgenannten Prinzipien haben dagegen unterschiedliche technische und wirtschaftliche Vor- und Nachteile. Beide kommen bei Neuanlagen zum Einsatz [6].

Die Windleistung nimmt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Üblicherweise wird ab einer Windgeschwindigkeit von rund 9 bis 12 m/s die Rotorleistung durch aerodynamische Maßnahmen begrenzt, um die vorgegebene Nennleistung nicht zu übersteigen, da es sonst zu Überlastungen und Materialschäden kommen könnte. Bei Sturm (ab circa 25 m/s) muss die WEA abgeregelt und irgendwann abgeschaltet werden. Bei heutigen WEA wird die Leistungsbegrenzung bzw. Leistungsregelung am Rotor durch eine Pitch-Regelung realisiert [7].

Auslegung von WEA und erreichbare Volllaststunden

Die Auslegung einer WEA orientiert sich an den lokal vorherrschenden Windbedingungen. Während in der Vergangenheit möglichst hohe Leistungen nachgefragt wurden, richtet sich die Auslegung heute üblicherweise nach dem möglichen Ertrag. An Standorten mit hoher Windhöffigkeit - insbesondere in den Küstenregionen - werden daher weiterhin sog. Starkwindanlagen mit hoher Leistung gebaut, während sich an Standorten mit geringerer Windhöffigkeit sog. Schwachwindanlagen durchsetzen, bei denen kleinere Generatorleistungen mit eher größeren Rotordurchmessern kombiniert werden. Dadurch lassen sich auch an schlechteren Standorten höhere Volllaststunden realisieren, was zu einer besseren Wirtschaftlichkeit und einer Vergleichmäßigung der Stromerzeugung beiträgt.

Abbildung 3 zeigt eine Auswertung der in den Jahren 2020 und 2021 jeweils erreichten Volllaststunden in Abhängigkeit von der Nabenhöhe der WEA. Die Volllaststunden errechnen sich dabei aus eingespeister Jahresenergie bezogen auf die Nennanschlussleistung einer WEA. Bei dieser Auswertung wurden so gut wie alle Windenergieanlagen im Marktstammdatenregister mit den ÜNB-Bewegungsdaten¹ kombiniert. Die ÜNB-Bewegungsdaten enthalten die abrechnungsrelevante Einspeisung für jede einzelne Anlage. Zur Vergleichbarkeit der Jahre wurden die Daten auf das „100 % Windjahr“ skaliert.

¹ In Abgrenzung von den in der Regel unveränderlichen Stammdaten einer Anlage, wie beispielsweise die installierte Leistung, bezeichnet der Begriff „Bewegungsdaten“ die zeitlich veränderlichen Daten, beispielsweise die tatsächlich eingespeiste Wirkleistung.

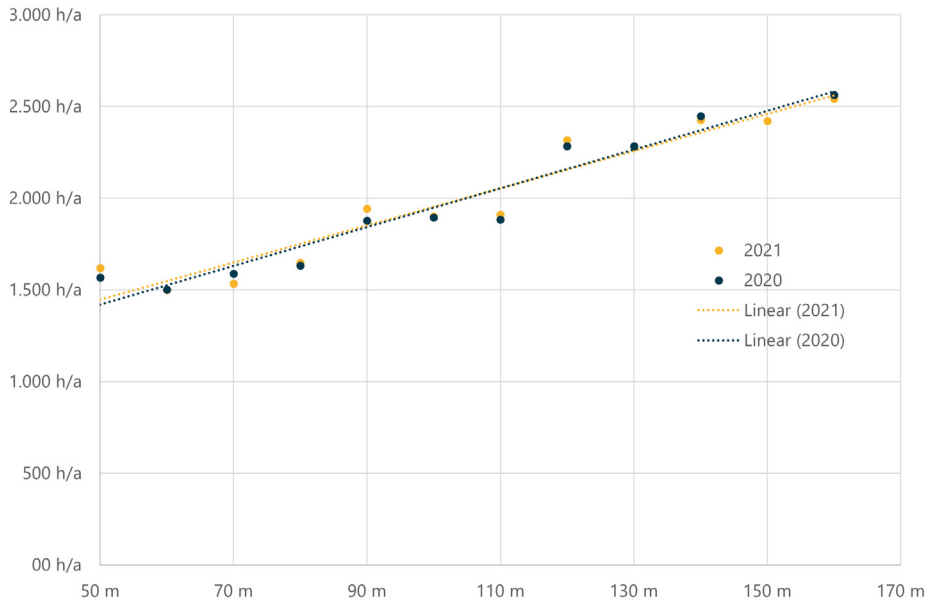


Abbildung 3: Korrelationsanalyse der Nabhöhe und der Volllaststunden anhand der ÜNB-Bewegungsdaten für Deutschland. Jeder Punkt entspricht dem Mittelwert der Anlagen mit der jeweiligen Nabhöhe. Dabei sind alle WEA erfasst, die im Marktstammdatenregister eingetragen sind (interne Analyse des Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.)

An Land werden bereits heute bei neu installierten Anlagen im Mittel über 2.500 Volllaststunden erzielt. Mit steigenden Nabhöhen zeigen Studien [8, 9] im Durchschnitt über alle neuen Standorte ca. 3.000 Volllaststunden pro Jahr, wobei der konkrete Wert standortabhängig ist.

Ausbauplanung und Ausbaupotential

Eine flächendeckende Simulation der Volllaststunden von neuen Windenergieanlagen über Deutschland im 6x6 km Raster über 8 Wetterjahre ist in Abbildung 4 dargestellt. Gut zu erkennen sind die Standorte mit weit über 3.500 Volllaststunden im nördlichen Bereich Deutschlands. Auch in Süddeutschland sind viele Standorte mit über 2.500 Volllaststunden möglich. Im Mittel über alle Rasterpunkte in Deutschland würden sich über 2.800 Volllaststunden ergeben. An guten Standorten sind im Einzelfall sehr hohe Volllaststunden erreichbar.

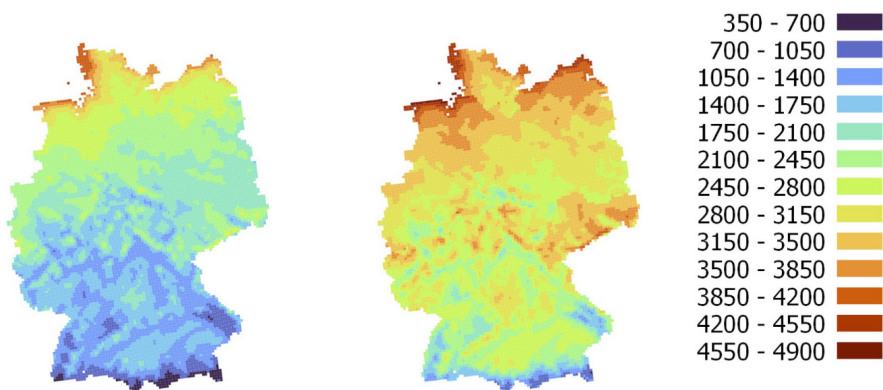


Abbildung 4: Übersicht der Volllaststunden von Bestandsanlagen (links) sowie Neuanlagen (rechts) im 6x6 km Raster [9]. Dabei wurden bundeslandscharf passende Nabhöhen und Anlagentypen angenommen.

Die Netto-Gesamtkapazität für **Windenergie an Land** wird zwischen 160 und 200 GW liegen, wobei der untere Wert dem gesetzlich festgelegten Ziel entspricht [10] und der obere aus der Studie „Neues Strommarktdesign“ [8] stammt. Nachdem es divergierende oder auch restriktive Ziele der Flächenbereitstellung gab, hat das Wind-an-Land-Gesetz im Jahr 2023 den Ländern Vorgaben von 1,8 bis 2,2 % der Landesfläche vorgegeben [11]. Ein Grundkonzept war hierzu wissenschaftlich schon im Jahr 2012 vorgelegt worden [12]. Dieses Konzept soll künftig bundesweit in der Raumordnung umgesetzt werden.

Daraus ergibt sich die Möglichkeit des Betriebs von ca. 32.000 Anlagen bei 25 ha Planungsraum pro WEA in Windparks. Dies entspricht beim aktuellen Stand der Anlagengröße (5 bis 6 MW) einer Kapazität von 160 bis 190 GW. Unter der Annahme von durchschnittlich 2.500 bis 3.000 Volllaststunden und einer bis 2045 durchgeführten Erneuerung des heutigen Anlagenbestands wäre damit perspektivisch in 2045 eine Stromerzeugung von 400 bis 570 TWh aus Windenergie an Land möglich.

Bezüglich des Ausbaupotentials der **Windenergie offshore** wurde das bisherige Ziel der Bundesregierung auf 30 GW bis zum Jahr 2030 erhöht und ein Ausbaziel von 70 GW bis zum Jahr 2045 formuliert [13]. Allerdings steht ein solcher Ausbau ggf. im Konflikt mit dem Meeres- und Wattenmeer-Schutz, weshalb vom BUND eine Begrenzung des Offshore-Ausbaus auf 15 GW gefordert wird [14]. Bei Offshore-Anlagen lassen sich 3200 Volllaststunden pro Jahr in Küstennähe und bis zu 4500 Volllaststunden pro Jahr an küstenferneren Standorten in der Nordsee erreichen [4]. Die künftige Stromerzeugung aus Offshore-Windenergie kann somit bei installierten Leistungen von 15-70 GW je nach angenommenen durchschnittlichen Volllaststunden pro Jahr zwischen 50 und 280 TWh liegen.

Insgesamt wird bis 2045 erwartet, dass Strom aus Windenergie mit 500 bis 850 TWh deutlich mehr als die Hälfte des künftigen Strombedarfs in Deutschland decken kann. Die vergleichsweise große Spanne ergibt sich einerseits aus den Annahmen, beispielsweise hinsichtlich des tatsächlich erfolgten Ausbaus, zukünftiger technologischer Weiterentwicklungen der Anlagentechnik sowie der Abregelung der Anlagen durch Netzengpässe, andererseits aus der Tatsache, dass die jährliche Energie aus Wind von Jahr zu Jahr beträchtlich schwankt. Die Studie [8] gibt unter vergleichsweise konservativen Annahmen inklusive Abregelung eine erwartete Stromerzeugung bis 2045 von ca. 600 TWh an.

Neben der Möglichkeit, die elektrische Energie aus norddeutschen WEA – und insbesondere aus den Offshore-WEA – direkt mittels Stromleitungen in südlichere Bundesländer zu übertragen, wird auch die Produktion von Wasserstoff – direkt an der WEA oder an der Küste – und dessen Transport in Pipelines als mögliche Option diskutiert. Dabei sind die Investitionskosten und die Effizienz der Elektrolyse (und damit der entsprechend höhere Ausbaubedarf für WEA) zu berücksichtigen.

Um zu Zeiten mit hohem Windaufkommen eine Abregelung von WEA so weit wie möglich zu vermeiden, werden zusätzliche flexible Nutzungsmöglichkeiten für Strom aus WEA erschlossen werden. Diese Optionen dienen der Sektorenkopplung und werden allgemein unter dem Begriff „Power-to-X“ zusammengefasst. Neben der Erzeugung von Wasserstoff für die Nutzung in verschiedenen Bereichen (Stahlherstellung, Chemie, Zement, Verkehr ...) steht X insbesondere auch für die Wärmebereitstellung (Power-to-Heat) oder die Mobilität (Laden von Batteriefahrzeugen). Bei all diesen Anwendungen kann die Volatilität des Winddargebots durch unterschiedliche Speicheroptionen ausgeglichen werden. Weiterhin kann die Erzeugung von Wasserstoff (oder geeignete Derivate) aus Windstrom zusammen mit deren Speicherung und bedarfsabhängigen Rückverstromung in Kraftwerken der Versorgungssicherheit dienen, um Zeiten mit nicht ausreichendem EE-Dargebot zu überbrücken.

Umwelt- und Kostenaspekte

Dem vorgenannten Ausbaupotential für WEA wirken verschiedene Restriktionen des Naturschutzes und der Regionalplanung entgegen. Auch für Anlagen innerhalb von Vorranggebieten erfolgt eine Genehmigung gemäß den Vorgaben des Immissionsschutzes und Naturschutzrechtes. Es gilt das Tötungsverbot für besonders geschützte Vogel- und Fledermausarten. Wenn durch zeitweise Abschaltungen der Anlagen und Artenhilfsprogramme signifikante Beeinträchtigungen vermieden und die jeweilige Population der Spezies in ihrem Bestand gesichert ist, kann ein Bauverbot von Windenergieanlagen mittels Ausnahmeregelungen aufgehoben werden. Im Rahmen des Wind-an-Land-Gesetzes wurden ebenso Maßnahmen für den Artenschutz durch Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes und Ausgleichzahlung und Festlegung von Gebieten zur Umsetzung von Artenhilfsprogrammen getroffen. Das Risiko der Tötung von Vögeln kann künftig weitgehend durch den Einsatz von Detektionssystemen vermieden werden².

² Vielfältige Informationen zu technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Fragen bietet die Fachagentur Windenergie an Land: <https://www.fachagentur-windenergie.de/>

Da windhöfliche Gebiete im Abstand von Wohngebieten verbreitet im Wald vorkommen, ist ein Anteil von 25 % der Anlagen im Wald auch von Umweltverbänden akzeptiert, da hierfür weniger als 0,1 % der Waldfläche benötigt wird³. Einwände hinsichtlich der Emissionen von Infraschall konnten fachlich fundiert zurückgewiesen werden, zumal diese auf einer fehlerhaften Studie beruhten [15, 16].

Weiterhin stellen sich **Fragen von Zentralität und Dezentralität**. Das Potential zur Stromerzeugung aus Windenergie weist in Deutschland deutliche Unterschiede der regionalen und lokalen Windhöflichkeit auf (siehe Abbildung 4). Zum einen gibt es ein Nord-Süd-Gefälle, zum anderen deutlich höhere Erträge auf den Höhen der Mittelgebirge. Zur Deckung des mit Strombedarfs mit Schwerpunkträumen von Industrie und Wohnen werden verschiedene Strategien verfolgt. Ein Ausbau der Windenergie mit Schwerpunkt im Norden des Landes bedingt einen Stromnetzausbau insbesondere mittels dutzender und mehrere 100 km langer HGÜ-Stromtrassen. Aus Akzeptanz- und Umweltgesichtspunkten werden diese aktuell als Erdkabeltrassen geplant. Die Kosten hierfür werden auf 250 Mrd. € geschätzt.

Andere Ansätze gehen hingegen von einem dezentralen, zellularen Ansatz aus mit einer eher lastnahen Stromerzeugung und -speicherung sowie einem Ausgleich und Reserve durch regionale KWK-Anlagen (vgl. BUND Expertenstatement [18]). Bei den aktuellen Planungsverfahren für den WEA-Ausbau werden aber die Kosten für den daraus resultierenden benötigten Netzausbau nicht mit einbezogen, da diese auf die Netzentgelte verlagert werden und ein Kosten/Nutzen-Vergleich nicht durchgeführt wird [17]. Verschiedene Studien [19–21] weisen darauf hin, dass eher dezentral orientierte Ansätze mit regionalem Stromausgleich zwar insgesamt höhere spezifische Stromerzeugungskosten (um maximal 2,5 ct/kWh höher) aber einen deutlich geringeren Netzausbau, höhere Versorgungssicherheit, geringere Umweltwirkungen und mehr Akzeptanz aufweisen. Es bleibt eine zentrale politische Aufgabe, die Verteilung des Windenergieausbaus mit einem neuen Strommarktdesign und daraus folgendem Stromnetzausbaubedarf in Einklang zu bringen. Die Bundesregierung hat hierzu im Jahr 2023 die Plattform „Klimaneutrales Stromsystem“ eingerichtet, die Vorschläge zum Strommarktdesign erarbeiten soll. Hierbei muss auch die Vorgabe der Europäischen Kommission umgesetzt werden, dass sog. „Erneuerbare Energien Gemeinschaften“ gebildet werden können, die regional gegenseitig Strom erzeugen, verbrauchen und handeln können. Dies würde dem „Zellularen Ansatz“ des VDE [21] einen Rechtsrahmen eröffnen.

Strom aus Windenergie kann einen wesentlichen Anteil in Konzepten regionaler und zellulärer Stromverbünde darstellen, insbesondere wenn der Strombezug aus Anlagen in Verbrauchsnähe erfolgt. Die Akzeptanz kann durch transparente, rechtssichere Planung auf der Basis von Fachstandards des Naturschutzes und Möglichkeiten der finanziellen Beteiligung und Ausschüttung von Erträgen an die Kommunen⁴ und Strombezug aus regionalen Anlagen hergestellt werden.

Der Rückbau der Anlagen ist in Genehmigungen festgelegt. Finanziell ist der Rückbau über Rückbaubürgschaften abgesichert. Stahl und Beton der Anlagen, die über 95 % der Masse ausmachen, können leicht recycelt werden. Etablierte Verfahren für das Recycling der Rotorblätter aus Verbundwerkstoffen (GFK) sind grundsätzlich vorhanden [22], müssen aber noch hochskaliert werden auf die entsprechenden anfallenden Mengen.

³ So der Beschluss des BUND: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/bundintern/verband_gremien/deligiertenversammlung/bdv_2019/Beschluss_AEA011_Windkraft_im_Wald.pdf

⁴ Gemäß EEG § 6 können 0,2 ct/kWh von den Betreibern der WEAs an die umliegenden Kommunen ausgeschüttet werden.

Verweise

Aktuelle Informationen über den Ausbau der Windenergie und Details über Leistungswerte findet man unter

- https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Arbeitsgruppe/arbeitsgruppe_ee.html
- <https://www.wind-energie.de/>
- <https://www.windguard.de/windenergiestatistik.html>

Weitere Statistiken – zu allen erneuerbaren Energien – und insbesondere Monatsstatistiken gibt es unter

- <https://www.energy-charts.info>
- <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen/monats-quartalsdaten-der-agee-stat>
- <https://www.unendlich-viel-energie.de/>

Fachinformationen zu technischen, wirtschaftlichen und juristischen Fragen des Ausbaus der Windenergie findet man bei:

- <https://www.fachagentur-windenergie.de/>

Fachinformationen zur Frage erneuerbare Energien und Naturschutz behandelt das Kompetenzzentrum KNU:

- <https://www.naturschutz-energiewende.de>

Literatur

- [1] Deutsche WindGuard GmbH, Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland: Jahr 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20240116_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_Jahr_2023.pdf (Zugriff am: 26. September 2024).
- [2] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2023> (Zugriff am: 26. September 2024).
- [3] Deutsche WindGuard GmbH, Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland: Jahr 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_Jahr_2023.pdf (Zugriff am: 26. September 2024).
- [4] C. Kost, P. Müller, J. Sepúlveda Schweiger, V. Fluri und J. Thomsen, Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf (Zugriff am: 26. September 2024).
- [5] IEA, Offshore Wind Outlook 2019: World Energy Outlook special report. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.
- [6] Bundesverband WindEnergie, Generatorkonzepte. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/leistungsbegrenzung/>.
- [7] Bundesverband WindEnergie, Leistungsbegrenzung und -regelung. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/anlagenkonzepte/generatorkonzepte/> (Zugriff am: 22. Juni 2024).
- [8] D. Böttger et al., Neues Strommarktdesign. Studie. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaneutrales-stromsystem.de/pdf/Strommarktdesignstudie_BEE_final_Stand_14_12_2021.pdf.
- [9] K. Knorr, D. Geiger, M. Stark, M. Altröck, D. Fouquet und V. Gronbach, Netzverknüpfungspunkte-Studie: Gemeinsame Nutzung von Netzverknüpfungspunkten durch Erneuerbare Energien, Speicher und Anlagen zur Sektorkopplung. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Meldungen/Studien/2024/20240310_BEE_Studie_NVP.pdf (Zugriff am: 26. September 2024).

- [10] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare- Energien-Gesetz): EEG 2023, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [11] Gesetz zur Festlegung von Flächenbedarfen für Windenergieanlagen an Land: WindBG, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/>
- [12] Bundesverband WindEnergie, Potenzial der Windenergienutzung an Land. Kurzfassung. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/bwe_potenzialstudie_kurzfassung_2012-03.pdf
- [13] Mehr Fortschritt Wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). [Online]. Verfügbar unter: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf
- [14] BUND, Offshore-Windenergie: Klimaschutz nur mit Meeresnaturschutz. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bund.net/energiewende/erneuerbare-energien/windenergie/offshore-windenergie/>
- [15] Faktenpapier Windenergie und Infraschall. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://digital.zlb.de/viewer/resolver?urn=urn:nbn:de:-kobv:109-1-8325673>
- [16] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Erklärung zum Infraschall von Windenergieanlagen. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-2021-04-27_erklaerung-zum-infraschall-von-windenergieanlagen.html (Zugriff am: 26. September 2024).
- [17] W. Baumann und L. J. Jarass, Überdimensionierter Netzausbau behindert die Energiewende: Erforderliche Änderungen beim Netzentwicklungsplan Strom. Norderstedt: Books on Demand, 2020.
- [18] BUND, Überdimensionierten Bundesbedarfsplan 2020 überarbeiten – Alternativen entwickeln! [Online]. Verfügbar unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/energiewende/energiewende_bbplan_kritik_mdbs.pdf (Zugriff am: 26. September 2024).
- [19] F. Peter et al., Dezentralität und zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prognos.com/de/projekt/dezentralitaet-und-zellulare-optimierung-auswirkungen-auf-den-netzausbaubedarf> (Zugriff am: 26. September 2024).
- [20] T. Tröndle, J. Lilliestam, S. Marelli und S. Pfenninger, „Trade-Offs between Geographic Scale, Cost, and Infrastructure Requirements for Fully Renewable Electricity in Europe“ (eng), Joule, Jg. 4, Nr. 9, S. 1929–1948, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.018>.
- [21] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V, Zellulares Energiesystem – Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde.com/resource/blob/2316290/f024301232b742f617a60157cb6ca89b/vde-studie-zellulares-energiesystem-data.pdf>
- [22] Umweltbundesamt, Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter: Aufbereitung von Rotorblättern. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-von-rueckbau-recyclingstandards-fuer> (Zugriff am: 26. September 2024).

Autoren

Dr. Werner Neumann, BUND

Dr. Matthias Stark, BEE

Dr. Martin Kleimaier, Leiter ETG Fachbereich V1

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, Universität Stuttgart

Veröffentlichung: Juni 2025