

Windkraft im Kontext sog. „erneuerbarer“ Energien – eine kleine Besprechung

Dr. A. Schwienhorst, BUND Ortsgruppe Salzhaff-Rerik
mail@bund-salzhaff.de

Inhalt:

1. Grundlagen: Energieverbrauch, Wirtschaft, Ressourcen und Klima	
– 1.1. Energie	2
– 1.2. Strom	4
– 1.3. „Treibhausgase“	4
– Kleiner Exkurs: Militär und Kriege	6
– 1.4. Ressourcen	6
2. Windkraft – Allgemeines	
– 2.1. Die Ressource Wind und ihre Grenzen	8
– 2.2. Kleine Geschichte der Nutzung von Windkraft	12
– 2.3. Konstruktion moderner Windkraftanlagen und Ressourcenverbrauch	12
– 2.4. Gestehungskosten im Vergleich	14
– 2.5. Windkraftanlagen – Energiebilanz, Emissionen, Wasser- und Flächenverbrauch	14
– 2.6. Windkraftanlagen – Nennleistung pro Kopf und Fläche im internationalen Vergleich	15
– 2.7. Windkraftanlagen – Produktivität im internationalen Vergleich	16
3. Windkraft – Spezielle Aspekte	
– 3.1. Windkraftanlagen – Ruhestromverbrauch	17
– 3.2. Windkraftanlagen – Beitrag zur Erderwärmung	18
– 3.3. Windkraftanlagen – Natur- und Artenschutz	20
– Windparks im Wald	20
– Windkraftanlagen und Artenschutz	21
– Sog. kollisionsgefährdete Brutvogelarten	22
– Andere betroffene Brutvogelarten	22
– Rastvögel	23
– Vogelzugkorridore	23
– Fledermäuse	23
– Reh- und Rotwild	24
– Insekten	24
– Marine Lebewesen	25
– 3.4. Windkraftanlagen und medizinische Aspekte	26
– Mindestabstand zu Wohnbebauung	27
– Störeffekte durch Schall (inkl. Infraschall)	27
– Elektromagnetische Felder	31
– Schlagschatten	31
– Störende Warnlichter für den Flugverkehr	32
– Chemische Emissionen	32
4. Zusammenfassung	34
Anhänge	37

Windkraft als sog. „erneuerbare“ Energie

Sog. „erneuerbare“ d.h. v.a. wetterabhängige Energiegewinnung wird heutzutage als Lösung im Rahmen von Diskussionen zur Veränderung des Weltklimas erwogen. Dabei geht es zumeist um zwei konkrete Aspekte. (i) Das Problem der sog. Klimaerwärmung, d.h. i.W. der Erhöhung der Durchschnittstemperatur, soll durch Vermeidung sog. Treibhausgase¹ gelöst werden, die von vielen als wichtigste Ursache für die Erhöhung der Durchschnittstemperatur gesehen werden. (ii) Durch die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs bei fossilen Energieträgern (Kohle, Gas, Erdöl) und deren Ersatz durch „erneuerbare“ Energien sollen fossile Ressourcen, die auch stoffliche Grundlage der chemischen Industrie sind, noch möglichst lange gesichert werden. Der Club of Rome² ging bereits 1972 von einer baldigen Erschöpfung der Rohstoffreserven (in den meisten seiner Szenarien: vor 2100) aus, die so aber noch nicht eingetreten ist, weil technologischer Fortschritt und Entdeckungen neue Lagerstätten erschlossen haben. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern werden sog. „erneuerbare“ Energien als praktisch unbegrenzt gedacht, Sonne und Wind gibt es schließlich im Überfluss und noch auf unbestimmte Zeit, so die allgemeine Vorstellung.

1. Grundlagen: Energieverbrauch, Wirtschaft, Ressourcen und Klima

Das Weltklima ist eine globale Angelegenheit. Ein einzelner Staat wie Deutschland könnte theoretisch auf zweierlei Weise Einfluß auf das Weltklima nehmen. (i) Er könnte durch eigene Energieeinsparungen den Weltenergieverbrauch und den Weltausstoß von Treibhausgasen gravierend senken, wenn sein Anteil daran groß wäre. Dabei dürften aber nicht gleichzeitig anderen Staaten die besonders energieintensiven Teile der Versorgung aufgebürdet werden. (ii) Ein einzelner Staat wie Deutschland könnte aber auch eine Vorbildfunktion für mindestens die stark energieverbrauchenden Staaten einnehmen und diese zur Energieeinsparung und Senkung der Emissionen motivieren. Ein Blick auf den Weltenergieverbrauch schafft schnell Klarheit.

1.1. Energie

—> siehe: [Tabelle im Anhang 1.1.: Energieverbrauch und Wirtschaftsleistung](#)

China ist mit Abstand der weltweit größte Verbraucher von Primärenergie³ mit 28 % des Weltenergieverbrauchs. Die BRICS-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika) und die USA, auf die Deutschland allesamt herzlich wenig Einfluß hat, stellen gemeinsam über 55 % des Weltenergieverbrauchs. Deutschland verbucht hingegen nur einen Anteil von 1,8 %. Die Energieeinsparungen, die Deutschland von 2014 bis 2024 vorgenommen hat, liegen bei 0,2 % des Weltenergieverbrauchs. In der gleichen Zeit haben andere Länder den Weltenergieverbrauch um mehr als 18 % gesteigert, – entsprechend dem 90fachen der deutschen Einsparung. Deutschland spielt somit keine bedeutende Rolle für den Weltenergieverbrauch. Dies gilt umso mehr zukünftig, als viele Staaten gerade in den letzten 10 Jahren ihren Energieverbrauch erheblich gesteigert haben und dort kein Ende des Wachstums in Sicht ist. Dies gilt v.a. für asiatische Länder wie China (Energieverbrauch: +41 %), Indien (+48 %), Indonesien (+61%) und Vietnam (+100%). Weitere Steigerungen sind in den nächsten Jahren zu erwarten, das legt schon der relativ niedrige Pro-Kopf-Energieverbrauch nahe: Indien liegt z.B. bei 20 % des deutschen Pro-Kopf-Verbrauchs. Dies spricht dafür, dass große Teile der Bevölkerungen dieser Länder noch nicht am Wohlstand/ Energieverbrauch Teil haben, aber danach streben dürften. Ähnliches wird auch für Afrika gelten,

¹ Treibhausgase sind Gase (z.B. H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, Halogen-Kohlenwasserstoffe) natürlichen oder anthropogenen Ursprungs, die in kleinen Mengen in der Atmosphäre vorkommen und einen Teil der von der Erdoberfläche abgegebenen Strahlung absorbieren, die sonst ins Weltall abgegeben würde. Ein kleiner Teil der absorbierten Energie wird in Richtung Oberfläche abgegeben und erwärmt die Oberfläche zusätzlich zum Sonnenlicht, – so die Theorie.

² <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>

³ Primärenergie ist in der Energiewirtschaft die in noch nicht weiterverarbeiteten Energieträgern enthaltene Energie. Energieträger sind v.a, Braunkohle, Erdgas, Erdöl, Kernbrennstoffe, Steinkohle, Torf und erneuerbare Energieträger.

das doch auch ein Recht auf einen adäquaten Teil der Weltenergie hat. Bei einer Einwohnerzahl von 1,52 Milliarden Menschen (18,6 % der Menschheit) hätte Afrika 2024 theoretisch knapp 33000 TWh verbrauchen dürfen. Der gesamte afrikanische Kontinent hatte 2024 aber nur einen Energieverbrauch von ca. 6000 TWh, der somit nur beim 1,9fachen des deutschen Energieverbrauchs lag, aber eine Steigerung seit 2014 um immerhin schon 22 % bedeutete. Auch hier dürften weitere Steigerungen folgen.

Schon der Club of Rome konstatierte 1972, dass der Energieverbrauch eines Landes mit seiner Wirtschaftsleistung (BIP, Bruttoinlandsprodukt, englisch: GDP, gross domestic product) und seinem Wirtschaftswachstum zusammenhängt. Die Wirtschaft vieler asiatischer Staaten wächst rasant. Die Wirtschaft in Deutschland aktuell aber eher nicht (Rezession 2023 und 2024, 0,2 % 2025). Noch vor dem Irankrieg hatte die Bundesregierung für 2026 die Prognose auf 0,9 % abgesenkt. Aktuell (4/2026) sieht die Bundesregierung das BIP für 2026 nur noch bei 0,5 %.⁴

Der Verband der Energieintensiven Industrien in Deutschland (EID) liefert eine Erklärung⁵ für beides, den Rückgang des Energieverbrauchs und die schwächere Wirtschaftsleistung in Deutschland. Danach ist die Produktion in der energieintensiven Industrie (v.a. Chemieindustrie, Glas-Keramik-Stein-Industrie, Metallherzeugung u. -Verarbeitung, Papierindustrie) v.a. aufgrund hoher Energie/Strompreise in Deutschland deutlich zurückgegangen. Nach VEA/BDWE lagen die Strompreise⁶ für die Industrie 2021/2022/2023 bei 21,5/43,3/24,5 ct/kWh, wobei aktuell insbesondere die Netzentgelte auf einem hohen Niveau verbleiben. Nach aktuellen Zahlen⁷ ist der Produktionsindex energieintensiver Industriezweige seit 2015 bis 2024 um ca. 20 % zurückgegangen. Der Produktionsindex allein der Chemischen Industrie⁸ ist in der Zeit um 24 % eingebrochen (Wasserstoff-Produktion sogar um 38 %), die Stahlproduktion⁴ um 14 %, die Aluminiumproduktion⁹ um 18 % (nachdem 2005 bereits die Werke in Stade und Hamburg geschlossen worden waren). In der Papierproduktion¹⁰ war ein Rückgang um 15 % zu verzeichnen.

Ursache des Rückgangs im Energieverbrauch Deutschlands ist also nicht darin zu sehen, dass Deutschland im Vergleich zu 2014 heutzutage (2024) Energie sehr viel effizienter als andere Länder eingesetzt hat, d.h. der Energieeinsatz pro US-\$ BIP besonders deutlich zurückgegangen ist. Im Vergleich mit 2014 betrug der Rückgang (Primärenergie pro BIP) 2024 in Deutschland -28 %, in anderen Ländern vergleichbar: USA (-36 %), Portugal (-35 %), Großbritannien (-29 %), Dänemark (-25 %), Vietnam (-25 %), Frankreich (-16 %), Indien und China (jeweils -15 %). Das Ifo-Institut¹¹ erklärt die schwächelnde Wirtschaft in Deutschland damit, dass sich das Land „in einem tiefgreifenden Strukturwandel befindet, der durch Dekarbonisierung, Digitalisierung, demografische Veränderungen und geopolitische Umbrüche geprägt ist. Im internationalen Vergleich gelingt es nur langsam und kostspielig, sich durch Innovationen und neue Geschäftsmodelle anzupassen“. Deutschland spüre „den Strukturwandel besonders intensiv, da das vorwiegend betroffene verarbeitende Gewerbe eine große gesamtwirtschaftliche Bedeutung hat“. Produktions-

⁴ <https://www.zeit.de/wirtschaft/2026-04/fruehjahrsprojektion-bundesregierung-katherina-reiche-wirtschaft-prognose-gxe>

⁵ https://www.kalk.de/fileadmin/user_upload/2025_11_07_EID_Position_Industriestrompreis.pdf

⁶ <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/stahlindustrie-zahlen-fakten-faq-100.html>

⁷ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>

⁸ <https://vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2024.pdf>

⁹ <https://www.aluminiumdeutschland.de/statistiken/produktion-von-rohaluminium/>

¹⁰ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5940/umfrage/entwicklung-der-papierproduktion-nach-sorten-seit-2007/>

¹¹ <https://www.ifo.de/fakten/2025-12-11/ifo-konjunkturprognose-winter-2025-der-strukturwandel-hat-deutschland-fest-im-griff>

und Gründungsprozesse würden „strukturell durch bürokratische und infrastrukturelle Hürden behindert“.

1.2. Strom

Beim Stromverbrauch zeigt sich grob ein ähnliches Bild wie beim Primärenergieverbrauch.

—> siehe: [Tabelle in Anhang 1.2.: Primärenergieverbrauch, Stromverbrauch und -erzeugung](#)

Auch hier fallen die BRICS-Staaten und die USA stark ins Gewicht und machen zusammen 61 % des Weltstromverbrauchs aus (China alleine 33 %). Deutschland liegt bei 1,7 % des Weltstromverbrauchs. Dabei war Deutschland 2023/24 Netto-Importeur von Strom. In den ersten drei Quartalen 2024 flossen 19,6 TWh mehr Strom aus dem Ausland nach Deutschland als umgekehrt. Betrachtet man den Stromverbrauch relativ zum jeweiligen Primärenergieverbrauch, liegen die meisten Länder bei 11-19 %. Dies ist insofern durchaus bemerkenswert, weil sich diese Ländern in ihrem Mix verschiedener Stromerzeugungsmethoden¹² signifikant unterscheiden.

Auffällig sind Länder wie Iran (9,7%) und Qatar (8,4 %), die deutlich darunter liegen. Iran erzeugt 94,6 % und Qatar 99,7 % seines Stroms aus fossilen Quellen. Norwegen (23,4 %) ist das einzige Land in der präsentierten Liste, das einen deutlich erhöhten Stromverbrauch relativ zum Energieverbrauch aufweist. Es erzeugt als einziges Land den Großteil (89,1 %) seines Stroms hydroelektrisch (dazu kommen 9,2 % aus Windkraft). Bei Ländern mit einem sehr hohen Anteil an Wind-/Sonnenenergie, wie z.B. Dänemark mit 67,5%, hingegen, zeigt sich kein vergleichbar hoher Stromverbrauch relativ zum Primärenergieverbrauch. Den mit großem Abstand geringsten Anteil fossiler Energie an der Stromgewinnung weisen Norwegen (1,2 %), Frankreich (7,9 %), Brasilien (8,9 %) und Kanada (18,9 %) auf. Norwegen (89,1 %), Brasilien (60,2 %) und Kanada (58,6 %) setzen v.a. auf Wasserkraft, Frankreich zu 63,9 % auf Atomkraft.

1.3. „Treibhausgase“

Erwartungsgemäß sind die stärksten Energieverbraucher der Welt auch die Länder, die die höchsten, errechneten CO₂- bzw. Greenhouse-Gas (GHG)-Emissionen aufweisen.

—> siehe: [Tabelle in Anhang 1.3.: „Treibhausgas“-Emissionen relativ zum Primärenergieverbrauch](#)

China alleine hat einen Anteil von 35 % (CO₂) bzw. 29 % (GHG) an den weltweiten Emissionen. Die BRICS-Staaten und die USA weisen zusammen einen Anteil von 63 % (CO₂) bzw. 56 % (GHG) auf. Deutschland zeichnet verantwortlich für einen Anteil von 1,5 % (CO₂) bzw. 1,3 % (GHG) des weltweiten Ausstoßes.

Viele westliche Staaten haben von 2014 bis 2024 einen Emissionsrückgang zu verzeichnen, während die Emissionen asiatischer Staaten im gleichen Zeitraum deutlich zugenommen haben und dieser Trend setzt sich fort. So haben die Emissionen Chinas um + 29 % zugelegt, Indien verbucht + 49 %, Indonesien + 88 %, Vietnam sogar + 181 %. Deutschlands Emissionsrückgang von - 27 % (CO₂) entspricht 0,35 % der Weltemissionen. In der gleichen Zeit haben andere Länder die Weltemissionen um mehr als 10,5 % gesteigert, – entsprechend dem 30fachen der deutschen Einsparung. Somit spielt Deutschland auch keine bedeutende Rolle für die CO₂-Emissionen der Welt. Immerhin haben viele Länder von 2014 bis 2024 ihre Emissionen nicht in dem Maße gesteigert wie ihren Energieverbrauch. Interessant: Brasilien, Südkorea und Norwegen haben sogar das Kunststück fertig gebracht, den eigenen Energieverbrauch deutlich gesteigert, die Emissionen aber signifikant reduziert zu haben. Brasilien bzw. Norwegen produzieren Strom zu 60 % bzw. 89 % mit Wasserkraft, Südkorea zu 30 % mit Atomkraft.¹³

Die „Energy Intensity“, d.h. die Menge Energie, die ein Land einsetzen muss, um einen US-\$ BIP zu erwirtschaften, ist bei den meisten europäischen Staaten schon jetzt niedrig und in der gleichen Größenordnung von 0,65-0,88 kWh/\$. In Europa muss nur Norwegen mit 1,11 kWh/\$ signifikant mehr Energie für Wirtschaftsleistung aufwenden. China, die USA und viele andere Staaten liegen noch deutlich darüber. Spitzenreiter in der Liste ist Russland mit 2,31 kWh/\$.

Die „Carbon intensity“ bezeichnet den errechneten Ausstoß von CO₂ pro kWh verbrauchte Energie. Norwegen weist den geringsten Wert (0,07 kg CO₂/kWh) auf, dicht gefolgt von Frankreich

¹² Zahlen für 2023: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/>

¹³ <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/>

(0,10 kg CO₂/kWh) und Brasilien (0,12 kg CO₂/kWh). Viele Länder liegen mit 0,13-0,16 direkt darüber. Deutschland ebenso wie die USA verzeichnen einen Wert von jeweils 0,18 kg CO₂/kWh. Indien, Indonesien, China, Vietnam und die Türkei liegen bei 0,25-0,28 kg CO₂/kWh. Dies scheint neuere Untersuchungen zu bestätigen, wonach die Stromerzeugung aus Wasserkraft und Atomkraft am besten geeignet ist, Treibhausgasemissionen gering zu halten. Windkraft und Solar würden danach die nächstbesten Lösungen darstellen. Die Berechnungen sind allerdings nicht unumstritten. Daher seien mehrere Erhebungen zwischen 2007 und 2025 hierzu angeführt.

CO₂-Ausstoß bei der Stromerzeugung (Gramm CO₂-Äquivalent/kWh) berechnet über die Lebenszeit eines Kraftwerks

Energieträger	Bundestag WD8-056/2007 & Süddtsch Z. (08.03.2007) ^a	AR5 IPCC (2014) ^b	United Nat. Eco. Com. for Europe (2021) ^c	Neue Analysen zur Kernkraft in Frankreich/USA (2022/2025) ^d
Braunkohle	980 - 1230	1150		
Steinkohle	790 - 1080	798	849 - 1023	
Erdöl	890			
Erdgas	410 - 640	447 - 819	434	
Kernkraft	16 - 23	12 ^e	5,5	3.0 - 4.0
Wind	8 - 16	11-12 (offshore)	16 - 23	
Wasserkraft	4 - 13	24 ^f	6,1 - 11	
Photovoltaik	k.A.	70 - 82 (Deutschland) ^g	35 - 40	
Biomasse	k.A.	230		
Geothermie	k.A.	38		

^a SZ (2007): <http://www.sueddeutsche.de/wissen/artikel/867/104763/> (2007)

^b Fünfter Sachstandsbericht AR5 IPCC (2014) - GTP100; <https://www.tech-for-future.de/co2-kwh-strom/>

^c United Nations (2021): https://unece.org/sites/default/files/2021-11/LCA_final.pdf

^d Kernkraft (2022/2025): <https://www.sfen.org/rgn/les-emissions-carbone-du-nucleaire-francais-37g-de-co2-le-kwh/>; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.70008>

^e Berechnung für 40 Jahre Laufzeit (Deutschland)

^f Achtung: zusätzliche Emissionen durch Verkeimung von stehendem Wasser möglich (Stauseen etc.)¹⁴

^g Annahme: Eine PV-Anlage in Deutschland mit einer Sonneneinstrahlung von 1000 kwh/m²/a liefert im Vergleich zum sonnigen Südeuropa (1700 kwh/m²/a) nur 58 Prozent des Stroms. Daher ist dort die Lebenszeit-Emission pro (niedrigerer) Energie höher als z.B. in Südeuropa.

Fazit: Die Zahlen sprechen eine deutliche Sprache: ob wir in Deutschland bzw. Europa den Muster-schüler in Bezug auf niedrigen Energieverbrauch und niedrige „Treibhausgas“-Emissionen geben, spielt für den Weltenergieverbrauch und das Weltklima eine eher untergeordnete Rolle. Sonderwege, die die Gefahr eines weiteren, wirtschaftlichen Abstiegs riskieren oder ökologische und die Gesundheit betreffende Unwägbarkeiten in Kauf nehmen, sind schwerlich zu rechtfertigen.

¹⁴ Edgar G. Hertwich (2013) Addressing Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Hydropower in LCA, Environmental Science and Technology 47(17)

[https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/255174104)

[255174104 Addressing Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Hydropower in LCA;](https://www.researchgate.net/publication/255174104)

Bridget R. Deemer et al. (2016) Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, BioScience, 66, (11), 949–964

<https://academic.oup.com/bioscience/article-abstract/66/11/949/2754271?redirectedFrom=fulltext>

Kleiner Exkurs: Militär und Kriege

Wäre das weltweit agierende Militär ein eigener Staat, so würde dieser in Sachen Ausstoß sog. Treibhausgase in der Länderliste an vierter Stelle zwischen Indien und Russland rangieren¹⁵. Etwa 5,5 % aller Emissionen weltweit werden durch militärische Aktivitäten verursacht. Diese sind in erheblichem Maße von fossilen Brennstoffen abhängig. In die Zahlen nur zum Teil eingepreist sind die Kosten für die Zerstörung und den späteren Wiederaufbau von Infrastruktur. Noch gar nicht berücksichtigt sind Auswirkungen auf internationale Verkehrswege und Handelsrouten (z.B. aktuell 3/2026 ff. die Sperrung der Straße von Hormus). Beispielhaft zeigten etwa niederländische Klimaforscher, dass die ersten 12 Monate des Ukrainekrieges für einen Ausstoß von knapp 120 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten verantwortlich waren, – ein Sechstel des Ausstoßes Deutschlands 2022.¹⁶ Darin enthalten sind aber noch nicht die Emissionen, die für einen Wiederaufbau nötig sind. Die Emissionen allein für die ersten 120 Tage des Gaza-Krieges werden mit 420,265 bis 652,552 Tonnen CO₂-Äquivalenten angesetzt. Berücksichtigt man die Emissionen für den Wiederaufbau errechnen britische und US-amerikanische Forscher 47 bis 61 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, – die dem Ausstoß von 126 kleineren Staaten gleichkommen.¹⁷ Für die ersten 2 Wochen des aktuellen Irankrieges werden mindestens 5 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente veranschlagt, – ohne die Emissionen für den Wiederaufbau gerechnet.¹⁸

1.4. Ressourcen

Ein Überblick über die wichtigsten Ressourcen moderner Volkswirtschaften zeigt schnell, dass sich die meisten Ressourcen in Händen asiatischer Länder befinden. Besonders im Bereich energieintensiver Industrien (z.B. Chemische Industrie, Metallerzeugung, Papier-Pappe-Industrie) aber auch bei der Produktion von Halbleiterbestandteilen, Photovoltaik-Modulen, Medikamenten u.v.m. tragen diese Länder, zuvorderst China, den Löwenanteil der Weltproduktion.

Dies gilt auch für Rohstoffe, die für Technologien der sog. Energiewende im weitesten Sinne essentiell sind. Für Photovoltaikanlagen werden z.B. benötigt: Silizium, Germanium, Gallium, Indium. Windkraftanlagen¹⁹ benötigen: Zement und Stahl (Fundament, Turm), Aluminium (Gondel), Kupfer (Verkabelung, Stromtrassen), Seltene Erden (Generator). Letztere stecken auch in E-Autos u.v.m. Stromspeicher-Akkus basieren u.a. auf: Lithium, Kobalt.

—> siehe: **Tabellen in Anhang 1.4.: Verteilung wichtiger Ressourcen weltweit**

China ist Marktführer bei Aluminium (66 % Weltmarktanteil), Stahl (54 %), Seltenen Erden (69 %; und 99 % der weltweiten Raffineriekapazität), Silizium (76,4 %), Germanium (73,9 %), Gallium (98,4 %), Indium (56,3 %), Raffinerie-Kupfer (45 %), Raffinerie-Kobalt (90 %)²⁰, Wolfram (79 %), PV-Photovoltaikmodulen (74,7 %), Autobatterien (60 %)²¹, Zement (48,8 %) und Produkten der chem.-pharm. Industrie (41,8 %). Ca. 80 % aller Arzneimittelwirkstoffe und 40 % der Fertigdarstellungen stammen aus chinesischer und indischer Produktion.

¹⁵ <https://www.theguardian.com/commentisfree/2024/jan/09/emission-from-war-military-gaza-ukraine-climate-change>

¹⁶ <https://correctiv.org/faktencheck/2023/11/15/nein-der-krieg-in-der-ukraine-verursacht-nicht-so-viel-co2-wie-deutschland-in-600-jahren/>

¹⁷ <https://phys.org/news/2024-06-reveals-substantial-carbon-emissions-ongoing.html>

¹⁸ <https://earth.org/iran-war-drives-massive-surge-in-planet-heating-emissions-amid-calls-to-accelerate-transition-to-renewables/>

¹⁹ <https://energiewinde.orsted.de/energiewirtschaft/windraeder-bestandteile-rohstoff-versorgung-recycling>

²⁰ <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe-kritische-rohstoffe/bergwerke-und-raffinerien-groesste-kobaltproduzenten-weltweit/1633847>

²¹ <https://www.merckfinck.de/de-de/analyse-und-ausblick/konjunkturpakete-und-nachhaltigkeit-in-china-eine-wachsende-spannung>

Kasachstan ist mit Abstand der größte Uran-Förderer (43 %). Der größte Lithium-Förderer ist Australien (37 %; China immerhin noch mit 17 %). Kobalt wird zu 75 % im Kongo gefördert (China: 0,7 %). Kupfer wird zu 27 % in Chile gefördert. Die Produktion der meisten Rohstoffe ist relativ energieintensiv.

Im Bereich der Produktion fossiler Energieträger und von Helium haben die USA noch immer eine Vormachtstellung am Markt inne. Bei Erdöl²² liegen die USA mit einem Marktanteil von 20 % noch vor Saudi-Arabien (11 %) und Russland (11 %). Bei Erdgas²³ liegen die USA bei einem Marktanteil von 25 % noch vor Russland (16 %) und dem Iran (6 %). Betrachtet man allerdings die Erdöl- und Gasreserven der Welt, so verfügen andere Länder wie Venezuela, der Iran und Russland über ein Vielfaches der USA-Reserven. Es ist daher eine plausible Annahme²⁴, dass die aggressive Politik der USA gegen diese Länder auf den Zugang zu deren Öl- und Gas-Ressourcen abzielt, um die eigene Vormachtstellung auch in Zukunft abzusichern und damit im Wettbewerb mit den besonders rohstoffreichen aber energiebedürftigen Ländern China und Indien ein Faustpfand zu haben. China etwa bezog zuletzt 80 % des vom Iran geförderten Öls zu relativ günstigen Konditionen. Auch bei Halbleitern liegt der Marktanteil amerikanischer Firmen mit ca. 46 % relativ hoch, wobei nur 12 % in den USA selbst produziert werden. Allerdings befinden sich die meisten zur Herstellung notwendigen Ausgangsstoffe (Silizium, Germanium, Gallium, Indium) in Händen asiatischer Staaten, v.a. Chinas. Wichtige Technik (Extreme Ultraviolet Lithography Machines) zur Herstellung wird zudem fast monopolistisch durch ASML in den Niederlanden produziert. Durch den Irankrieg und die dadurch verursachte Heliumverknappung (Katar) bekommen die USA eine noch dominantere Stellung bei der Chipherstellung, weil ihr Anteil an der Weltheliumproduktion noch weiter steigt und bei konkurrierenden Ländern in Asien das essentielle Gas knapp wird.²⁵ **Fazit:** Die geplante „Energiewende“ ist in höchsten Maße abhängig von Rohstoffen, die von China kontrolliert werden und an denen v.a. China verdient.²⁶ Das passt gut zu Meldungen, z.B. in „Die Welt“ („Wie China die Klimabewegung einspannt“, 15.10.2025)²⁷. Danach „schmiedet China einflussreiche Umweltschutz-Netzwerke, die westliche Länder dazu bringen, Gesetze und Klimaziele im Sinne Pekings zu verschärfen. Sie erhöhen damit die Nachfrage nach chinesischer Technologie“. Konkret geht es um die Vernetzung der chinesischen Stiftung Energy Foundation China (EFC) mit westlichen Umweltorganisationen. In einer Ausschusssitzung des US-Senats wurden Belege dafür vorgelegt, dass 14 führende US-Umweltverbände alleine 2023 Gelder in Höhe von 497 Millionen US-\$ von der EFC bekommen haben sollen. Es wird befürchtet, dass China so Einfluss auf die westliche Politik nimmt, um z.B. über die Elektrifizierung die Nachfrage hin zu Wertschöpfungsketten zu verschieben, die China dominiert. Ähnliches gilt für das China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED), indem Deutschland als Geber und Partner fungiert. Laut des ‚Welt‘-Artikels drängt das CCICED den Westen regelmäßig zu ehrgeizigen Klimazielen und dem schnellen Ausbau sog. erneuerbarer

²² <https://www.ig.com/de/trading-strategien/die-weltweit-groessten-oelproduzenten-201030>

²³ <https://www.ig.com/de/trading-strategien/die-groessten-erdgasproduzenten-der-welt--260226>; Über die mit Abstand größten nachgewiesenen Erdgasreserven weltweit verfügt Russland, gefolgt vom Iran.

²⁴ <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/trump-oelstrategie-geopolitik-iran-china-100.html>

²⁵ <https://newsbit.de/heliumpreis-verdoppelt-sich-durch-iran-krieg-gefahr-fuer-chips-und-krankenhaeuser/>

²⁶ https://www.spiegel.de/wirtschaft/seltene-erden-eu-kaempft-vergeblich-gegen-wachsende-abhaengigkeit-von-china-a-e0445f64-ad7f-4d91-b03d-32a370af21a6?utm_source=firefox-newtab-de-de

²⁷ <https://www.welt.de/politik/ausland/plus68eddf10a0257c8ba8966cf/hybride-methoden-wie-china-die-klimabewegung-gegen-den-westen-einspannt.html>; <https://www.erneuerbare-energie.at/energiefakten/2025/08/05/erneuerbare-chinas-wirtschaft>

Energien, von denen China wirtschaftlich profitiert. China selbst will den Emissionshöchststand von Treibhausgasen aber erst bis 2030 erreichen. Europa dagegen soll 2030 bereits 55% weniger Emissionen als beim Hochstand 1990 verursachen.

2. Windkraft – Allgemeines

2.1. Die Ressource Wind und ihre Grenzen

Wind ist, meteorologisch gesehen, eine gerichtete, stärkere Luftbewegung in der Atmosphäre. Als Massenstrom zielt er laut 2. Hauptsatz der Thermodynamik auf Gleichverteilung im Raum, d.h. v.a. Luftdruckausgleich. Dabei bewegen sich Luftteilchen von einem Hochdruck- in Richtung eines Tiefdruckgebietes.

Triebkraft ist die Sonne, die die Erde nicht gleichmäßig erwärmt. Über den Tropen erwärmt sich die Luft stärker. Warme Luft ist leichter und steigt daher nach oben und hinterläßt ein Tiefdruckgebiet. Über den Polen herrscht eher kältere Luft vor. Diese ist schwerer und neigt dazu, nach unten zu sinken. Es bildet sich ein Hochdruckgebiet. Axel Kleidon vom MPI in Jena beschreibt unsere Erdatmosphäre als eine Art Wärmekraftmaschine, die durch den Temperaturunterschied zwischen Tropen und den kühleren Polen angetrieben wird und durch Luftbewegung nach Temperatúrausgleich strebt. Je größer der Temperaturunterschied zwischen Tropen und kühleren Polregionen, desto höher die kinetische Energie der Luftbewegungen (Winde). Wird dieser Temperaturunterschied kleiner, wird auch die zur Verfügung stehende Windenergie auf der Erde kleiner. Dass der Temperaturunterschied gegenwärtig tatsächlich kleiner wird, legen die Daten von Berkley Earth (2022)²⁸ nahe: im Zuge der „Klimaerwärmung“ heizen sich die Tropen weniger stark auf, als z.B. die nördliche Hemisphäre. Es wird im Süden sogar von Kältewellen berichtet.²⁹ Wir können also mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die kinetische Energie der Winde auf der Erde nachläßt.

Ist Windenergie unerschöpflich?

Forscher am Max-Planck-Institut in Jena³⁰ gingen nun der nicht unwichtigen Frage nach, wieviel dieser (kinetischen) Windenergie überhaupt in der Erdatmosphäre zur Verfügung steht und welcher Anteil durch Windkraftanlagen nutzbar ist. Sie ermittelten in einer eher konservativ angesetzten, ersten Näherung einen Wert für die Windenergie von maximal 1,7 W pro m². Multipliziert mit der Erdoberfläche $511 \times 10^{12} \text{ m}^2$ erhält man einen Wert von $850 \times 10^{12} \text{ W}$ (850 TeraW) für die gesamte Erde, der gut übereinstimmt mit dem 1955 von E. N. Lorenz und 2011 von Miller et al. publizierten Wert (900 TW)³¹. Geht man von 850 TW aus, so würden nur ca. 0,5 % der absorbierten Sonnenenergie in kinetische Windenergie umgewandelt. Im unteren Teil der Erdatmosphäre (Peplosphäre, engl. atmospheric boundary layer), in der Windkraftanlagen stehen, kommt etwa die Hälfte dieser Energie an (0,88 W/m²). Der Teil, der wiederum über nicht vereistes Land streicht, wird von Miller et al. (2011)³² mit 112 TW angegeben. Nach dem Betz'schen Gesetz können theoretisch maximal 16/27 oder 59 %, realistisch aber eher 16 bis 59 % oder 18 bis 68 TW, als Energie für Windkraftanlagen über Land genutzt werden (0,14 bis 0,52 W/m²). Andere

²⁸ <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2022/>

²⁹ <https://www.deutschlandfunk.de/kaeltewellen-in-den-tropen-mit-dem-klimawandel-haeufen-sich-extremereignisse-100.html>

³⁰ https://www.researchgate.net/publication/349920646_Physical_limits_of_wind_energy_within_the_atmosphere_and_its_use_as_renewable_energy_From_the_theoretical_basis_to_practical_implications

³¹ https://wind.mit.edu/~emanuel/Lorenz/EdLorenz/Available_Potential_Energy_1955.pdf ; <https://esd.copernicus.org/articles/2/1/2011/esd-2-1-2011.pdf>

³² <https://esd.copernicus.org/articles/2/1/2011/esd-2-1-2011.pdf>

Quellen³³ geben den niedrigeren Wert ($0,14 \text{ W/m}^2$), bzw. für Horizontalläufer³⁴ einen idealisierten Maximalwert von 45 % an, entsprechend $0,40 \text{ W/m}^2$.

Zu beachten ist, dass Miller et al. Mittelwerte für die nicht-vergletscherte Landfläche angeben und nicht lokale Besonderheiten wie Rauigkeitslängen³⁵ (Bewuchs, Gebäude) berücksichtigen, die regional zu stark unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten führen können. Die Rauigkeit, d.h. der Widerstand, den Geländemerkmale dem Wind entgegen setzen, wird in 5 Klassen eingeteilt, von 0= Wasserflächen (offshore) bis 4= Stadtzentren oder Wälder mit unterschiedlichen Baumhöhen. Der Einfluss der Rauigkeit auf die Windgeschwindigkeit sinkt mit zunehmender Höhe der Windkraftanlagen, aber selbst bei einer 100m hohen Anlage vermindert sich die Produktion 15 km inlands der Küste im Vergleich zu einem Offshore-Standort um 20 % laut der zitierten Quelle. Klar wird jedenfalls, dass auch der Windenergie natürliche Grenzen gesetzt sind. Es ist zu erwarten, dass umso weniger Windenergie in Kraftwerken „geerntet“ werden kann, je näher man diesen natürlichen Grenzen kommt. Wo stehen wir in Deutschland und speziell in Mecklenburg-Vorpommern?

Natürliche Grenzen der Windenergie und die Energieversorgung in Deutschland

Bei einem maximalen Wert der kinetischen Windenergie von $0,88 \text{ W pro m}^2$ (Miller et al., 2011) ist für Deutschland (Fläche: $358000 \times 10^6 \text{ m}^2$) maximal eine Windenergie von 315 GigaW anzusetzen, für Mecklenburg-Vorpommern ($22213 \times 10^6 \text{ m}^2$) 20 GigaW. Die durch Windkraftanlagen an Land maximal nutzbare Energie ist nach Miller et al. (2011) $0,14$ bis $0,52 \text{ W/m}^2$, also 50 bis maximal 186 GW für Deutschland (3,1 bis 12 GW für M-V). Auf das Jahr hochgerechnet ist das für die gesamte Fläche Deutschlands eine durch Wind erzeugbare maximale Energiemenge von 1629 TWh, wenn überall rund um die Uhr an allen Tagen im Jahr von idealen Windkraftanlagen idealer, theoretisch vorhergesagter Wind in Strom verwandelt würde. Unter solch idealen Bedingungen müsste grob ein Viertel der Fläche Deutschlands Windpark werden, um Deutschlands Stromverbrauch von 2024 (464 TWh) zu decken, ein Windpark in der Größe zweier Deutschlands wäre nötig um den Gesamtenergieverbrauch (3195 TWh) Deutschlands aufzubringen (s. [Anhang 1.1](#)). Das würde dann aber voraussetzen, dass auch höhere Prozesstemperaturen $> 600 \text{ °C}$ in der Industrie durch Strom erzeugt werden, was in einer aktuellen Studie des Fraunhofer Instituts als nur teilweise technisch machbar und höchst unwirtschaftlich bewertet wird.³⁶

Ende 2025 waren in Deutschland an Land Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 68,067 GW³⁷ installiert (plus 9,62 GW off-shore), in Mecklenburg-Vorpommern Anlagen mit einer Gesamtleistung von 3,925 GW. D.h. die an Land in Deutschland installierte Windkraftleistung entspricht bereits 11 % (M-V: 11 %) der vorhandenen kinetischen Windenergie und mindestens 36 % (MV: 34 %) des nutzbaren Anteils der Windenergie. Das aber bedeutet, dass v.a. auf den mit Windkraftanlagen besonders stark bestückten Flächen im Norden und Nordosten Deutschlands schon jetzt eine Abschwächung der mittleren Windenergie beobachtbar sein könnte, bzw. es zu wirtschaftlich problematischen Einbußen in Bezug auf die maximal mögliche Windenergieerzeugung kommen könnte. Gibt es bereits Hinweise darauf? Durchaus, aber die Deutung der Veränderung der Windgeschwindigkeit v.a. an einzelnen Messstationen ist nicht trivial. Veränderungen können hier z.B.

³³ https://www.achgut.com/artikel/wie_deutschland_seinen_wind_ausbremst

³⁴ <https://www.elvwis.com/Wind-Leistungsrechner/>

³⁵ https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Rauigkeitsdaten_f%C3%BCr_Energieberechnungen; Beachte: ungünstige Rauigkeitslängen können für manchen potentiellen Windkraftstandort das wirtschaftliche Aus bedeuten.

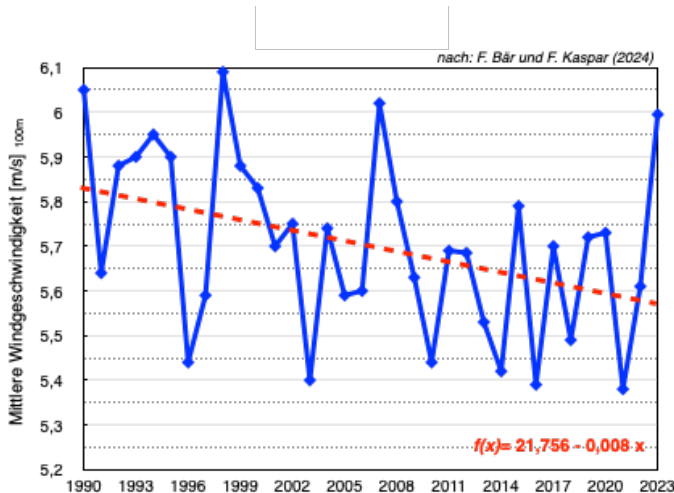
³⁶ https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projects/2023/2023-20_IND_Electrification_Industrial_Heat/A-IN_340_Electrification_Industrial_Heat_DE_WEB.pdf

³⁷ https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2026/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Jahr%202025.pdf

auf lokal veränderte Rauigkeitslängen (Bewuchs, Gebäude) zurückgehen. Die Betrachtung großer Landflächen und Mittelwerte von vielen Messstationen, wie im folgenden, ist daher von Vorteil.

Indizien für eine Windabschwächung in Deutschland

F. Bär und F. Kaspar (2024)³⁸ vom Deutschen Wetterdienst präsentieren eine Zeitreihe (1950-2023) mit den mittleren Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe für Deutschland. Die mittlere Windgeschwindigkeit zeigt von Jahr zu Jahr große Schwankungen zwischen 5,33 und 6,05 m/s. Ab etwa dem Jahr 1990 folgt die mittlere Windgeschwindigkeit Deutschlands einem Trend zu geringeren Geschwindigkeiten.



Für ganz Deutschland sind dies - 5 % (entsprechend einer Energieeinbuße von 14 %)³⁹ von 1990 bis 2023. Bär und Kaspar legen keine detaillierte Analyse nach einzelnen Regionen oder Bundesländern vor, bemerken aber für 2023 eine leicht positive Abweichung vom vieljährigen Mittel der Jahre 1950-1990 im Süden Deutschlands und Richtung Norden und Osten eine im Vergleich dazu relative Abschwächung.

Eine zweite Auswertung von gemessenen Winddaten in Deutschland⁴⁰ kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass mindestens die Windgeschwindigkeiten im Nordosten Deutschlands von 1988 bis 2023 merklich, d.h. um 10 - 17 % (entsprechend einer Energieeinbuße von 27-43 %) abgenommen haben, – während sie im Südwesten leicht zunahmen. Etliche einzelne Messstationen z.B. in MV verzeichneten sogar erheblich größere Abnahmen. Die Autoren interpretieren die Daten eher vorsichtig, sehen aber auch den massiven Ausbau der Windkraftanlagen im Norden mit ihrer in Lee windabschwächenden Wirkung als eine Ursache. Daneben würden aber auch die Häufigkeitsverhältnisse bestimmter Großwetterlagen mit einiger Wahrscheinlichkeit die Entwicklung der Windgeschwindigkeiten mit beeinflussen, so ihre Interpretation.

Eine dritte Analyse legen die Meteorologen vom Wetterdienst „Donnerwetter“⁴¹ vor. Sie berichten ebenfalls von einer deutlichen Abnahme der Windgeschwindigkeiten für die meisten Orte im norddeutschen Binnenland. Für Osnabrück etwa wird der Rückgang seit den 1960er Jahren mit 13 % (entsprechend einer Energieeinbuße von 34 %) angegeben. Auf der offenen See, z.B. in Norderney oder Helgoland sehen die Meteorologen eine leichte Zunahme der Windgeschwindig-

³⁸ https://www.dwd.de/DE/leistungen/energiewetter_rueckblick/publikationen/bericht_jahresrueckblick-2023.pdf?blob=publicationFile&v=2

³⁹ siehe die sehr prägnante Darstellung des Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und Windenergie durch die Universität Leipzig: <https://home.uni-leipzig.de/energy/energie-grundlagen/15.html>

⁴⁰ <https://eike-klima-energie.eu/2024/04/11/die-entwicklung-der-windgeschwindigkeit-in-deutschland-waehrend-des-aktuellen-klimaoptimums-seit-1988-schlussbetrachtungen/>

⁴¹ https://www.donnerwetter.de/presse/immer-weniger-wind-durch-immer-mehr-windraeder_cid_24106.html

keiten. Ihre Interpretation: Die Inseln liegen vor den Windkraftanlagen, Orte im Binnenland aber oft dahinter (Lee). Ähnliche in Lee von Windkraftanlagen abschwächende Winde werden auch aus anderen Ländern berichtet, etwa aus Dänemark⁴², den USA⁴³, China⁴⁴ und von anderswo⁴⁵. Die kurzfristigen und langfristigen Schwankungen der mittleren Windgeschwindigkeit sind enorm und häufig über große zusammenhängende Landflächen synchron und ähnlich. So lag im Jahr 2024 laut der Daten des europäischen Verbundes der Stromnetzbetreiber (zitiert nach ⁴⁶) die maximal „geerntete“ Windenergie in Deutschland und seinen zehn Nachbarländern bei 105 Gigawatt, das Minimum aber bei unter 5 Gigawatt. Schwankungen zeigten „steile Rampen“, d.h. Schwankungen von 50 % im Laufe eines Tages. Gregor Zcisch hat in seiner Dissertation⁴⁷ den zeitlichen Verlauf der jährlichen Stromproduktion durch Windkraftanlagen für verschiedene Regionen in Europa, Nord- und Westafrika und Teile Asiens untersucht. Als meteorologische Basisdaten für die Berechnung der potentiellen Stromerzeugung aus Windenergie wurden die Reanalysedaten ERA-15 des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts London⁴⁸ benutzt. Ihn interessierte besonders die Frage, ob bei Flauten-bedingten Stromausfällen in einer Region dann gleichzeitig angrenzende Regionen mit eigener Windstromproduktion „einspringen“, d.h. die Flautenregion mit versorgen können. Am Beispiel der Großregion Nordsee zeigte er, dass die längerfristigen zeitlichen Verläufe der potentiellen Stromerzeugung aus Windenergie bei allen vier angrenzenden Regionen deutlich korreliert sind. D.h., daß sich die längerfristigen Produktionsschwankungen in einer der Regionen nicht durch die gleichzeitige Nutzung der Windenergie in einer der anderen Anrainerregionen ausgleichen lassen (G.Z., S. 72ff. u. 409). Stromausfälle durch Flauten können aber durch die Nutzung der Windenergie weiter entfernter Regionen ausgeglichen werden, – in diesem Fall Mittelsibirien und Westafrika, die 4000 bis 5000 km entfernt liegen. Voraussetzung für das praktische Gelingen solcher Flautenkompensationen sind (i) exzellent funktionierende Stromnetze über die volle Distanz und (ii) eine in Westafrika und Mittelsibirien aufgebaute und nutzbare adäquate Windkraftleistung. Dabei ist mit Übertragungsverlusten in Höhe von ca. 1 % pro 100 km⁴⁹ für Wechsel-/Drehstrom zu rechnen (bei Erdkabeln noch ca. 25 % mehr). Verluste bei Hochspannungsgleichstrom-Netzen werden mit ca. 0,3 % auf 100 km⁵⁰ angesetzt, plus < 2 % für Gleich- und Wechselrichter. Ähnlich wie die Transportnetze für fossile Brennstoffe sind auch große Stromnetze nicht zu schützen gegen Angriffe z.B. bei geopolitischen Konflikten.

Fazit: Es sieht ganz danach aus, dass auch Wind keine unbegrenzte Ressource ist. Je kleiner der Temperaturunterschied zwischen Tropen und der nördlichen Hemisphäre wird (wie gegenwärtig im Zuge der „Klimaerwärmung“ beobachtbar), desto weniger Windenergie steht zur Verfügung. Zudem werden in Deutschland bereits mit hoher Dichte Windkraftanlagen betrieben, die einen signifikanten Teil der maximal möglichen Windenergie „ernten“. Je mehr Windkraftanlagen aufgebaut werden, desto stärker ist die Abschwächung des nutzbaren Windes (Lee-Wirkung). Analysen der Windgeschwindigkeiten über die letzten 35 Jahre deuten darauf hin, dass diese in Nordostdeutschland deutlich abgenommen haben. Wind und seine nutzbare Energie schwanken extrem stark, innerhalb eines Jahres und auch im langjährigen Vergleich. Stromausfälle durch Flauten

⁴² https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/400503926/ENSreport_V4.0_1May2025.pdf

⁴³ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1602253113>

⁴⁴ <https://www.nature.com/articles/s41598-017-16073-2>

⁴⁵ siehe Referenzen 89-93 in: https://www.scrip.org/pdf/JPEE_2019073017585165.pdf

⁴⁶ Björn Peters (2025) Schluss mit der Energiewende, ISBN 978-3-98617-082-0; S. 45

⁴⁷ <https://kobra.uni-kassel.de/bitstreams/32e0770f-1652-4efe-a681-dee00c413a6f/download>

⁴⁸ <http://www.ecmwf.int/>

⁴⁹ <https://web.archive.org/web/20090107045320/http://www.netzausbau-niedersachsen.de/downloads/verlustvergleichwahlemecklarfinalv2.pdf>

⁵⁰ https://www.energie-lexikon.info/hochspannungs_gleichstromuebertragung.html

können durch Windstromproduktion aus großer Entfernung kompensiert werden. Dafür braucht es funktionierende Stromnetze und mit Deutschland vergleichbare Stromerzeugungskapazitäten in diesen entfernten Regionen. Weiterer Zubau an Windkraftanlagen in Deutschland löst das Flautenproblem bzw. das damit verbundene Problem der Versorgungssicherheit hingegen eher nicht. In einzelnen Jahren wie 2023³⁸ gelingt aber immerhin teilweise die Kompensation der Flautenausfälle durch gleichzeitig produzierten Solarstrom tagsüber. Eine 100%ige Versorgungssicherheit (24h, 7 Tage die Woche) ist so aber schwer zu garantieren.

2.2. Kleine Geschichte der Nutzung von Windkraft

Frühe Windmühlen sind mindestens seit dem 7. Jahrhundert in Persien und China bekannt. Die persische Windmühle war eine Vertikalwindkraftanlage, d. h. eine Windmühle mit vertikal stehender Rotordrehachse. Einsatzgebiete waren v.a. das Mahlen von Getreide und Pumpfunktionen. In Deutschland gab es 1880 ca. 20000 Mühlen. Die oft unberechenbare Windenergie wurde im ausgehenden 19. Jahrhundert dann durch die Energie aus fossilen Trägern (Kohle und insbesondere Erdöl) ersetzt. Der erste Einsatz von Windkraft für die Elektrizitätsgewinnung geht auf Josef Friedländer (1883, Österreich), James Blyth (1887, Schottland) und Poul la Cour (1891, Dänemark) zurück. Die Grenzen der Windkraft erforschte u.a. Albert Betz, der auch das nach ihm benannte B. Gesetz (1919, Deutschland) formulierte. Danach können Windkraftanlagen maximal nur etwa 59 % der im Wind vorhandenen Energie nutzen.

Einen ersten Boom läutete Kalifornien mit einem Steuerabschreibungsmodell⁵¹ für Solaranlagen (1976) und Windkraftanlagen (1981) als Reaktion auf die Ölkrise 1973 ein. In Deutschland markierte der „Growian“ (1983, stillgelegt: 1987), eine Mühle mit einer Nabenhöhe von 100 m, einen Meilenstein. Der erste Windpark in Deutschland nahm 1987 den Betrieb auf. 1991 verhalf das Stromeinspeisungsgesetz und 2000 das EEG⁵² der Windenergie in Deutschland dann zu entscheidenden Marktvorteilen, weil es Stromnetzbetreiber verpflichtete, Windkraftstrom vorrangig und zu festgelegten Preisen (Anlagen ≤ 100kW) abzunehmen (§19 EEG) und eine Anschlußpflicht für Anlagen formulierte. Die Pflicht ist bedingungslos. Der Netzbetreiber muss den Strom aufnehmen, auch wenn das Netz gut versorgt ist. Einzige Ausnahme: das Einspeisemanagement bei akuter Netzüberlastung. Doch auch dann wird die Einspeisung nur temporär gedrosselt – nie dauerhaft verweigert. Bis 2022 wurde die vom Staat ausgezahlte Einspeisevergütung auf die Endverbraucher umgelegt (EEG-Umlage). Private Haushalte zahlten so z.B. alleine in 2017 eine Summe in der Größenordnung von 47 Milliarden Euro (6,88 ct/KWh).⁵³ Die Gesamtsumme für die Energiewende ist für private Haushalte jedenfalls etwas höher als es der damalige Umweltminister J. Tritten angab, als er 2004 versprach „Die Energiewende ist nicht teurer als eine Kugel Eis“. Insgesamt steht eine Summe von 10 Billionen Euro im Raum.⁵⁴ Dadurch und durch staatliche Interventionen hat sich die Windkraft in Deutschland schließlich so gut etabliert, dass im Jahr 2024 etwa 25 % des Strombedarfs abgedeckt wurden. Weltweit zeichnet Windkraft gegenwärtig allerdings für nur etwa 8 % des Strombedarfs verantwortlich.

2.3. Konstruktion moderner Windkraftanlagen und Ressourcenverbrauch

Unterschieden wird zwischen den (häufigeren) horizontalen und vertikalen („persischen“ s.o.) Windkraftanlagen.⁵⁵ Bei horizontalen Varianten steht die Rotorachse annähernd parallel zur Erd-

⁵¹ <https://www.osti.gov/biblio/6975428>; https://ebrary.net/218436/sociology/wind_rush_california

⁵² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-gesetz>

⁵³ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152973/umfrage/eeg-umlage-entwicklung-der-strompreise-in-deutschland-seit-2000/>

⁵⁴ <https://eike-klima-energie.eu/2024/06/27/wie-die-kugel-eis-der-energiewende-10-billionen-10-000-000-000-000-euro-kostet/>

⁵⁵ https://erneuerbare-energien-aktuell.de/windenergie/vertikale-windkraftanlagen/#elementor-toc_heading-anchor-3

oberfläche, bei vertikalen senkrecht. Vertikale Anlagen sind i.d.R. leiser und unabhängig von der Windrichtung. Sie benötigen geringere Startwindstärken (1,5-3 m/s) als horizontale Anlagen (3-4 m/s), haben einzeln aber einen geringeren Wirkungsgrad (20-40%). Eine aktuelle Studie zeigt allerdings, dass sie in großen Windparks bei bestimmten Anordnungen deutlich effizienter als andere Windanlagen sein können.⁵⁶ Im folgenden sollen i.W. die weitaus häufigeren horizontalen Anlagen besprochen werden. Hauptkomponenten⁵⁷ sind (i) Fundament, (ii) Turm/Mast, (iii) Maschinenhaus und (iv) Rotor. Dazu kommt der Stromanschluss über Stromtrassen. Der Materialeinsatz beim Bau von Windkraftanlagen ist erheblich, siehe Dokument WD8-3000-039/23 des Deutschen Bundestags.⁵⁸ Für Off-shore-Anlagen sind die verbauten Rohstoffmengen nochmals deutlich größer.

- (i) Bei On-shore-Anlagen sichert i.d.R. ein Stahl-Beton-Fundament die Standfestigkeit. Bei Off-shore-Anlagen sind verschiedene Gründungen möglich, u.a. Betonsenkkästen, Pfahlstrukturen und die ohne Rammarbeiten auskommenden Bucketfundamente. Das Stahlbetonfundament einer modernen Windkraftanlage (z.B. E-126 v. Enercon; 5M von REpower) hat typischerweise einen Durchmesser von 30 Metern und eine Tiefe von bis zu 4 Meter.⁵⁹ Dazu kommen bei einer Tiefgründung noch zusätzlich ca. vierzig 15 Meter lange Betonpfeiler. Insgesamt werden im Fundament > 3.500 Tonnen Beton und 60-180 Tonnen Stahl verbaut.
- (ii) Der Stahlbetonturm z.B. E-126 v. Enercon; 5M von REpower ist 135 Meter hoch und wiegt 2.800 Tonnen. Er wird i.d.R. aus 35 Ringen mit einem Durchmesser von bis zu 16,5 Meter zusammengesetzt. Alternativ werden heute auch reine Stahltürme verwendet, die aus ca. 300 Tonnen Stahl bestehen und mit 2-3 Tonnen Lack beschichtet sind.⁶⁰
- (iii) Das Maschinenhaus (Gondel), welches auf den Turm gesetzt wird, wiegt 50-120 Tonnen. Es ist typischerweise etwa 18 Meter lang, sechs Meter breit und sechs Meter hoch. Darin wird der Generator, mit einem Gewicht von ca. 220 Tonnen untergebracht. Generator und Zuleitungen benötigen ca. 5 Tonnen Kupfer. Generatoren ohne Getriebe brauchen Permanentmagneten, die die seltenen Erden Neodym (ca. 600 kg pro Anlage), Dysprosium und Praseodym enthalten. Häufig sind heutzutage aber auch Windenergieanlagen mit Getriebe und einem sog. „doppelt gespeisten Asynchrongenerator“ in Verbindung mit verstellbaren Rotorblättern. Dadurch werden die mechanischen Belastungen bei Windböen reduziert, um den Preis einer Ertragseinbuße und der Abgabe von Wärme an die Umwelt.
- (iv) Die Rotoren mit Nabe und einem Gewicht von 320 Tonnen, werden am Generator befestigt. Moderne Rotorblätter sind aus faserverstärkten Kunststoffen aufgebaut.⁶¹ Im inneren befindet sich meist ein leichteres, druckfestes Kernmaterial wie z.B. Balsaholz (aus tropischen Regenwäldern Süd- und Mittelamerikas) oder Kunststoff-Schaum. Außen wird ein Decklack (Polyurethan, Epoxidharz) aufgetragen. Rotorblätter, besonders ihre Vorderkanten, unterliegen der Erosion⁶² (siehe auch S.24 „Insektenschlag“⁶³ bzw. S.33 „Abrieb“), d.h. dem Verschleiß v.a. im Bereich der Blattspitze. Daher bringen die Hersteller dort noch zusätzliche Schutzschichten

⁵⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812100344X>

⁵⁷ <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/>

⁵⁸ <https://www.bundestag.de/resource/blob/969874/272e734275778e7916ca00794af4604c/WD-8-039-23-pdf.pdf>

⁵⁹ http://bi-berken.de/resources/Dimensionen+Windkraftanlagen_.pdf

⁶⁰ <https://ra-spiegelberg.de/welche-rohstoffe-werden-fuer-den-bau-einer-windkraftanlage-wea-benoetigt-und-in-welchen-mengen-eine-uebersicht/>

⁶¹ <https://www.cpmax.com/de/rotorwiki.html>

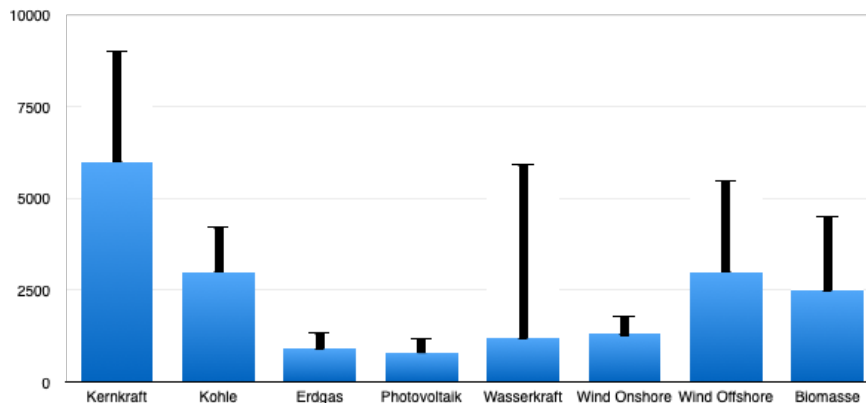
⁶² <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5974> ; <https://link.springer.com/article/10.1007/s40735-021-00472-0> ; <https://www.vereinwir.ch/wp-content/uploads/2025/06/Basistext-Mikropartikel-PFAS-BPA-1.pdf>

⁶³ <https://docs.wind-watch.org/Interference-of-Flying-Insects-and-Wind-Parks.pdf>

auf. Arbeiter bei Herstellern von Windkraftrotoren berichten immer wieder von berufsbedingten Kontaktallergien u.a. durch Epoxidharze⁶⁴, – trotz Schutzmaßnahmen –, die zur Berufsunfähigkeit führen können.

2.4. Gestehungskosten im Vergleich

Verschiedene Energieerzeugungsmethoden unterscheiden sich in den Anfangsinvestitionskosten⁶⁵, die je nach Bedingungen schwanken können. Onshore-Windkraft (1300-1800 US-\$ pro kW) gehört zu den Energieerzeugungsarten mit relativ niedrigen Gestehungskosten pro installierte kW und liegt direkt hinter Erdgas und Photovoltaik, die aber noch günstiger sind. Offshore-Windkraftanlagen werden mit 3000-5000 US-\$ pro kW angegeben und liegen deutlich darüber in der Größenordnung von Kohle- bzw. Wasserkraftwerken.



Die Gestehungskosten geben keine Auskunft über die Kosten für den Betrieb. Bei Windkraftanlagen⁶⁶ sind das jährlich nicht unter 4 % der Anfangsinvestitionssumme, bei PV-Kraftwerken⁶⁷ addieren sich jährlich zu ca. 2 % der Investitionskosten für Wartung/Versicherung noch Pachtkosten. Dazu kommen evtl. noch Rückstellungen für den Rückbau am Ende der Laufzeit, – für Onshore-Windkraftanlagen sollen es etwa 30 000 Euro für die gesamte Laufzeit sein.

2.5. Windkraftanlagen – Energiebilanz, Emissionen, Wasser- und Flächenverbrauch

Der Bau von Windkraftanlagen verbraucht erhebliche Mengen Energie. Das Umweltbundesamt ⁶⁸ gibt die Dauer der energetischen Amortisation mit 4,5-10,7 Monaten (Offshore) bzw. 2,5-7,6 (Onshore) an, in der die Energiemenge produziert wird, die zur Herstellung der Windkraftanlage erforderlich war. Viele andere Quellen zum Thema übernehmen teils ohne eigene Recherche diese Zahlen. Die schon erwähnte Growian-Anlage hatte 1983 eine Laufzeit von 4 Jahren. Als „normale“ Laufzeit von Windrädern wird heute hingegen oft 25 Jahre angegeben. In dieser Zeit wird demnach im Mittel etwa 40 Mal mehr Energie erzeugt als für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Anlage nötig sind (idealisiert gerechnet, ohne Verluste z.B. durch Insektenschlag). Angegeben wird ferner eine CO₂-Bilanz von 7 - 9 Gramm pro kWh.⁶⁹ Die gleiche Quelle gibt für Wasserkraft 4 Gramm pro kWh und für Photovoltaik 33 Gramm pro kWh an. Erdgas liegt bei 442 Gramm pro kWh, Kernkraft wird hier nicht verzeichnet, neuere Quellen sehen sie aber bei 3 - 4 Gramm pro

⁶⁴ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cod.70138>; <https://academic.oup.com/bjd/article/187/6/988/6972576?login=false>

⁶⁵ <https://www.dabonnchp.com/de/news/power-plant-cost-per-mw.html>

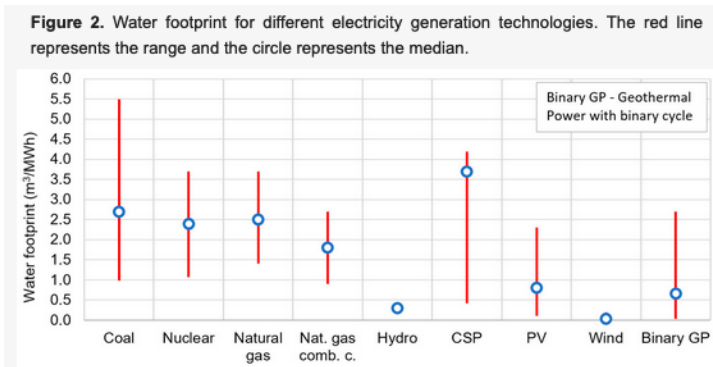
⁶⁶ <https://taranis-windsolar.de/kosten-einer-windkraftanlage/>

⁶⁷ <https://www.req.de/magazin/pv-freiflaechenanlage-kosten>

⁶⁸ https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf

⁶⁹ <https://www.enercity.de/magazin/unsere-welt/energiebilanz-windenergieanlagen>

kWh.⁷⁰ Ein nicht so häufig betrachtetes Kriterium im Vergleich verschiedener Stromerzeugungsmethoden ist der Verbrauch von Frischwasser pro Elektrizitätsenergiemenge (water footprint) während des Betriebes und des Baus der Anlagen. M. Bosnjakovic et al. (2024)⁷¹ haben die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zusammengetragen. Die in der nachfolgenden Abbildung zusammengefassten Daten sind eine grobe Richtschnur, da der Wasserverbrauch jeweils von einer Reihe Faktoren abhängig ist. Windparks verbrauchen mit 0,67 m³/MWh am wenigsten Wasser, Biomasse-basierte Stromerzeugung hat mit 85 m³/MWh den höchsten Wert.



M. Bosnjakovic et al. (2024): Wasserverbrauch pro Strommenge verschiedener Erzeugungsmethoden

Der Flächenverbrauch pro produzierte Energiemenge einer Energieerzeugungsmethode führt insbesondere dort zu Konflikten, wo Ackerland, Wald oder auch Habitate für Pflanzen- und Tierarten entwertet werden oder ganz verloren gehen.⁷² Die Berechnung ist nicht einheitlich. Realistische Flächenbedarfe inkludieren notwendige Abstände zwischen einzelnen Anlagen (Windkraft) und auch den Flächenbedarf für die Produktion von Brennstoff oder der Anlagen selbst.

Schon früh hatte die britische Regierung vergleichende Zahlen veröffentlicht.⁷³ Angegeben wurde für das Kernkraftwerk „Hinkley Point B“ ein Flächenbedarf von 0,07 m² pro MWh/a. Für Windparks gab die Behörde einen mittleren Wert von 39 m² pro MWh/a an, für terrestrische Photovoltaikanlagen gut 20 m² pro MWh/a. Seitdem haben v.a. auch Photovoltaik- und Windanlagen an Leistungsfähigkeit zugelegt. Aktuellere Zahlen sind der Zusammenstellung in der Tabelle auf der nächsten Seite zu entnehmen und können als Anhaltspunkt für die gegenwärtige Situation gelten. Für Offshore-Windparks gibt eine Zusammenstellung (2015)⁷⁴ einen Wert von 1 MWh/a pro 1170 m² an. Für Offshore-Windparks in der Nordsee gibt eine Publikation aus dem Jahr 2025⁷⁵ einen Wert von 718 TWh pro 100000 km² Fläche an, entsprechend 1 MWh/a pro 139 m².

2.6. Windkraftanlagen – Nennleistung pro Kopf und Fläche im internationalen Vergleich

In Bezug auf den pro Kopf erzeugten Windkraftenergieertrag⁷⁶ lag Deutschland 2024 hinter Dänemark (3,42 kWh), Norwegen (2,59 kWh), Irland (2,16 kWh) und den Niederlanden (1,82 kWh) weltweit auf Platz 5 mit einer Leistung von 1,66 kWh, noch deutlich vor den USA (1,31 kWh) und China (0,70 kWh).

⁷⁰ <https://www.sfen.org/rgn/les-emissions-carbone-du-nucleaire-francais-37g-de-co2-le-kwh/>;
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.70008>

⁷¹ <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/11/257>

⁷² <https://www.cpre.org.uk/news/two-thirds-of-mega-solar-farms-built-on-productive-farmland/>

⁷³ Aktuell als Auszug noch sichtbar unter: https://www.reddit.com/r/climateskeptics/comments/1pbc7a/uk_govt_reveals_incredible_land_waste_from_solar/

⁷⁴ <http://www.ageu-die-realisten.com/archives/1473/>

⁷⁵ <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0321528>

⁷⁶ <https://ourworldindata.org/grapher/wind-electricity-per-capita>

Energieerzeugung	Ourworldindata 2022 [§] [m ² pro MWh]	Böhm (BMEL 2023)* [m ² pro MWh]	<i>Flächenverbrauch pro produzierte Energienmenge</i>
Hydropower < 360 MW	33		
Hydropower > 660 MW	14		
PV (Silizium), terest.	19	29	
PV (Silizium), Dach	3		
Wind on-shore	8,4 - 247	22,4 ^{\$}	
Biomasse (Silomais)		442	
Kohle inkl. CCS	21		
Gas inkl. CCS	1,3		
Kernkraft	0,3		

[§] <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>

* <https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/462/682>

^{\$} = maximale Bebauung im Windpark.

In puncto installierter Onshore-Leistung pro Landesfläche rangiert Deutschland (0,178 W/m²) sogar auf Platz 1 vor den Niederlanden (0,167 W/m²) und Dänemark (0,111 W/m²) und deutlich vor Großbritannien (0,063 W/m²), China (0,054 W/m²), den USA (0,016 W/m²) und Norwegen (0,015 W/m²). Damit liegt die installierte Windkraftleistung an Land v.a. in Deutschland, den Niederlanden und Dänemark im Bereich der von Miller et al. (2011) berechneten maximalen Windenergie pro Fläche von 0,88 W/m² bzw. der maximal nutzbaren Windenergie pro Fläche von 0,52 W/m². China hat seine Windkraftanlagen v.a. im Nordwesten und Norden⁷⁷ konzentriert und dürfte dort auf eine Onshore-Leistung pro Landesfläche kommen, die ebenfalls in der Größenordnung der von Miller et al. berechneten maximal zur Verfügung stehenden Windenergie liegt ([siehe Anhang 2.6.](#)).

2.7. Windkraftanlagen – Produktivität im internationalen Vergleich

Die Produktivität einer Windkraftanlage, d.h. die jährliche Menge Strom (in TWh) pro GW installierte Nennleistung, ist von verschiedenen Faktoren abhängig, u.a.:

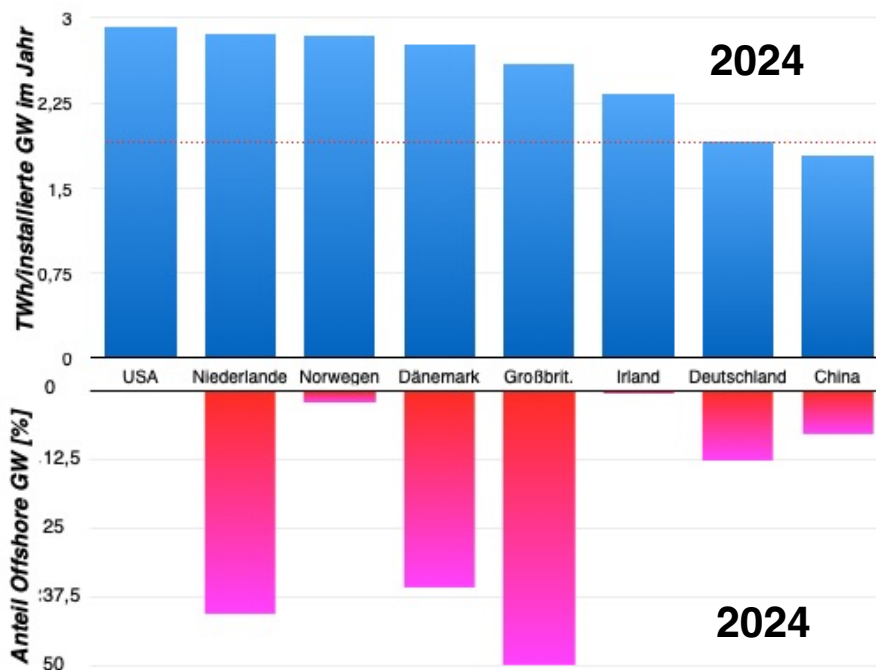
- Stärke und Konstanz des Windes am Standort
- Rauigkeitslänge, d.h. die Beschaffenheit der Umgebung (u.a. Offshore oder onshore)
- Anwesenheit anderer Windkraftanlagen
- Abschaltzeiten wegen Reparaturen/Wartungen
- Abschaltzeiten wegen Stromüberangebot im Netz (z.B. bei Hellbrisen)
- Leistungsverluste, z.B. durch Beläge auf Rotoren (Insekten, Eis) oder durch Erosion

Die Gesamtproduktivität aller Windkraftanlagen eines Landes ist von Nation zu Nation sehr unterschiedlich. Die IEA Wind TCP, ein internationaler Zusammenschluss von 22 Ländern hat seit Jahren die Daten zusammen getragen, die im folgenden für einen Vergleich herangezogen werden. Von den 8 aufgeführten Nationen weist Deutschland seit Jahren und so auch 2024 die zweitniedrigste Produktivität der Windkraftanlagen auf (siehe nächste Seite/ [Anhang 2.7.](#)). Nur China hat einen noch leicht schlechteren Ertrag an jährlich produziertem Strom pro GW installierte Windkraftleistung. In der Auswertung der deutschen Daten der Jahre 2019-2024 durch lineare Regression deutet sich ferner eine leicht abnehmende Tendenz an. Eine vertiefte Analyse der, – im internationalen Vergleich –, relativ schlechten Leistungsbilanz deutscher Windkraftanlagen würde den Rahmen dieser kleinen Schrift sprengen.

Einfache Erklärungsversuche wie unterschiedliche Off-/Onshore-Kapazitäten (siehe Diagramm a.d. nächsten Seite) oder das Alter der Anlagen greifen jedenfalls nicht. Es ist sicher interessant, zu untersuchen, ob häufigeres Abschalten der Anlagen wegen Stromüberangebot in bestimmten

⁷⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125002394>

Ländern oder nachlassender Wind als Folge einer hohen Windkraftanlagendichte pro Fläche in einigen Weltregionen eine Erklärung liefern könnte.



Paradoxerweise gibt es trotz der relativ schlechten Produktivität der Windkraftanlagen in Deutschland gleichzeitig ein Problem der zeitweisen Stromüberproduktion bei Hellbrisen. Hans-Werner Sinn⁷⁸ zeigt in seiner Analyse, dass der Anteil an Wind- und Solarenergie an der Energieversorgung auf zusammen etwa 50 % begrenzt werden muss, wenn keine Energie oder Energieinfrastruktur verschwendet werden soll. Voraussetzung dieses hohen Anteils sei allerdings, dass Dänemark, Norwegen, Österreich und die Schweiz mit Deutschland in Sachen Pumpkraftwerke weit über das jetzige Maß hinaus kooperieren. Auf der anderen Seite zeigen J. Dengler und B. Peters⁷⁹ in ihrer Analyse, dass eine lückenlose Energieversorgung durch Wind- und Solarenergie, wie sie im etwas optimistischen Projekt „Klimaneutrales Deutschland 2045“⁸⁰ dargelegt ist, auch mit Batterie- u. Wasserstoffspeichertechnologien insbesondere in längeren Phasen mit Dunkelflauten kaum (wirtschaftlich) zu meistern ist.

3. Windkraft – Spezielle Aspekte

3.1. Windkraftanlagen – Ruhestromverbrauch

Windkraftanlagen produzieren nicht nur Strom, sie benötigen auch welchen, – selbst im „Ruhezustand“ (Standby-Modus). Dies ist z.B. der Fall, wenn Anlagen wegen zu geringem oder zu starkem Wind oder aufgrund fehlender Netzkapazität abgeschaltet werden. Technische Steuerungen, Temperaturen von Betriebsflüssigkeiten (Öle, Kühlmittel) müssen ja weiterhin in Betrieb bleiben. Bei geringem oder zu starkem Wind (< 4 m/s, > 25 m/s) werden Windkraftanlagen aber auch aktiv in den Leerlauf- bzw. Trudelbetrieb versetzt. Dabei werden bei Anlagen mit Pitch-

⁷⁸ <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2017.05.007>

⁷⁹ <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/12/5295>

⁸⁰ https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045/Klimaneutrales-Deutschland-2045.pdf

regelung die Blätter in Segelstellung gedreht, Anlagen mit Stallregelung als Ganzes (Rotor mit Gondel) aus dem Wind gedreht. Öffentlich zugängliche Daten zum Ruhestromverbrauch von Windanlagen sind eher mühsam zu finden. Als Richtwerte können vielleicht Informationen eines internen Datenblatts des Herstellers Vestas⁸¹ dienen. Für gängige Modelle (Vestas V150/V162/V172) wird darin ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 55 000 kWh pro Jahr und Anlage angegeben. Setzt man für eine einzelne Anlage der Vestas V150 eine erzeugte Jahresstrommenge⁸² von 7 bis 15 Millionen kWh pro Jahr an, entspricht der Ruhestromverbrauch nur 0,79 bis 0,37 % des Jahresertrags. Unvorteilhaft ist aber einerseits, dass der Ruhestrom dann gebraucht wird, wenn flächendeckend in einer Region Flaute herrscht, alle Anlagen dort also keinen Strom produzieren. Andererseits „macht auch Kleinvieh Mist“. In einem Bundesland wie Niedersachsen (ca. 6200 Windkraftanlagen) entsteht ein Stromverbrauch von rund 170 000 000 kWh pro Jahr, wenn man den durchschnittlichen Eigenstrombedarf pro Anlage mit nur 27 500 kWh pro Jahr ansetzt, also der Hälfte der Vestas-Angaben (es gibt ja auch kleinere Anlagen).

Die Leistung von Windkraftanlagen geht drastisch nach unten, wenn sich Material (z.B. Eis oder tote Insekten wie früher auf PKW-Windschutzscheiben) auf Rotorblättern ablagert oder diese erodieren. Insektenschlag alleine kann bis zu 50 % Leistungsverlust verursachen.⁸³ Es gibt Anlagen, die mindestens über Enteisungssysteme verfügen, die bei Anlagentypen wie Enercon E-70 und E-82 zu Einbußen von etwa 3 - 4 % im Ertrag dieser Anlagen führen sollen.⁸⁴

3.2. Windkraftanlagen – Beitrag zur Erderwärmung

Eine große Zahl wissenschaftlicher Publikationen⁸⁵ belegt, dass Windkraftanlagen auf nicht beabsichtigte und komplexe Weise in Austauschprozesse von Energie, Masse und Feuchtigkeit zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre eingreifen und so das Mikroklima verändern und zu einer Temperaturerhöhung führen. Eine etwas sperrige Theorie zur Erwärmung durch Windabschwächung ist in Kramm et al. 2019 (v.a. Gleichungen 3.1-3.5)⁸⁶ dargestellt. Die Frage ist nun, welche Temperaturerhöhungen bestehende und geplante Anlagen verursachen können und ob diese Erhöhungen vernachlässigbar oder aber in der Größenordnung des Temperaturziels der Weltklimakonferenz liegen, das eine Erwärmung um maximal 1,5 °C vorgibt.⁸⁷

In einem Fachbeitrag⁸⁸ erschienen in der Zeitschrift „Joule“ von 2018 kommen L. M. Miller und D. W. Keith von der Harvard Universität zu dem Schluss, dass Windkraftanlagen prinzipiell zwar für eine emissionsärmere Stromerzeugung geeignet sind, allerdings gleichzeitig klimatische Veränderungen wie z.B. wärmere Temperaturen im weiteren Umfeld der Windparks hervorrufen.

⁸¹ <https://windkraft-bockenem.de/eigenverbrauch-von-windkraftanlagen-im-standby-modus/>

⁸² <https://www.eenews.ch/de/publireportage/article/46057/ig-windkraft-3-vestas-v150-mit-je-einer-leistung-von-4-2-mw-die-modernste-windrader-niederosterreichs-stehen-in-gross-schweinbarth;>
<https://stromrechner.com/wie-viel-strom-produziert-ein-windrad/>

⁸³ <http://www.nature.com/articles/35083698>

⁸⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Rotorblattenteisungssystem>

⁸⁵ siehe z.B.: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095927323007168?](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095927323007168?via%3Dihub)
[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724024162;](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724024162) [https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1000493107;](https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1000493107) [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X;](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X) https://www.researchgate.net/publication/258686379_Impacts_of_wind_farms_on_land_surface_temperature

⁸⁶ <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=94108>

⁸⁷ Laut Pariser Abkommen vom 12. Dezember 2015 auf der Weltklimakonferenz soll der globale Temperaturanstiegs auf 1,5 °C begrenzt werden.
<https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>

⁸⁸ [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X?](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1)
[ref=cra_js_challenge&fr=RR-1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1)

Resultat der Untersuchung: Die gemessene Erwärmung der Luft übersteigt die vermiedene Erwärmung durch verringerte Emissionen kurz- und mittelfristig. Erst auf einer Zeitachse von ca. 100 Jahren ist damit zu rechnen, dass die Reduzierung der Treibhausgasemissionen den Wärmeeffekt der Windkraftanlagen ausgleichen kann: „*Wind's warming can exceed avoided warming from reduced emissions for a century*“. Grundlage der Untersuchungen waren 28 im Betrieb befindliche Windparks in den USA. Sie rechneten für den aktuellen Strombedarf der USA hoch, dass sämtliche dafür notwendigen Windkraftanlagen zu einer Erwärmung der kontinentalen Oberflächentemperatur um 0,24 °C führt. Die Berechnungen wurden für Windparks mit einer Energiedichte von 0,5 MW/km² durchgeführt. Moderne Windparks mit größerer Energiedichte heizen die Atmosphäre aber stärker auf. Die Erwärmung ist nachts größer (+ 0,66 °C) als tagsüber. Die Autoren erklären dies damit, dass der atmosphärische Mischeffekt durch Windkraftanlagen nachts relativ größer ist, weil dann eben nicht wie tagsüber andere, z.B. sonnengetriebene Mischeffekte durch Konvektion eine ähnliche Rolle spielen. Nicht nur die Windkraftregionen selbst sind betroffen, sondern auch benachbarte Areale. Miller & Keith stellen nicht nur fest, dass der Aufheizeffekt durch Windkraftanlagen relativ groß ist im Vergleich zur Erwärmung, die durch eine Dekarbonisierung der US-Stromerzeugung mit Wind vermieden würde. Bei gleicher Leistung errechnen Miller & Keith auch, dass Photovoltaikanlagen nur ein Zehntel der Klimawirkungen zeigen, d.h. kaum Erwärmungseffekte.

Miller & Keith stehen mit ihren Befunden nicht alleine da. Eine große Zahl anderer Studien bestätigt die Erwärmung durch Windkraftanlagen. Zum Großteil wurden aber deutlich größere Temperaturerhöhungen gemessen. Einige Studien davon sollen nur kurz erwähnt werden. S. Baidya Roy & J. J. Traiteur (2010)⁸⁹ publizierten in der renommierten Fachzeitschrift PNAS, leewärts von Windkraftanlagen eine nächtliche Erwärmung um 1 °C. Die Autoren schlugen Areale auf der Erde vor, die vorteilhafter in Bezug auf geringere Erwärmung sein könnten, weil dort die Hintergrund-Turbulenz höher ist, aber mit möglichen Folgen für den Ertrag.⁹⁰

J. M. Walsh-Thomas et al. (2012)⁹¹ beobachten in ihren Untersuchungen eine Erwärmung um 2 °C, – auch noch bis zu einem Abstand von 2km leewärts der Windkraftanlagen. Eine erhöhte Temperatur ist laut dieser Arbeit bis zu einem Abstand von 12 km messbar.

L. Zhou et al. (2012)⁹² ermitteln eine Jahreszeiten-abhängige nächtliche Erwärmung von 0,72 °C (Sommer) bzw. 0,46 °C (Winter).

D. A. Rajewski et al. (2013)⁹³ sehen in ihren Untersuchungen entlang der Grenzen des Windparks eine nächtliche Erwärmung um 1 bis 1,5 °C.

C. M. Smith et al. (2013)⁹⁴ stellen eine nächtliche Erwärmung unmittelbar leewärts der Anlagen um 1,9 °C fest.

Eine neuere Arbeit von H. Seo et al. (2025)⁹⁵ zeigt, dass auch Offshore-Windparks zu einer Erwärmung führen können. Die Autoren ermittelten eine Erwärmung um 0,3 bis 0,4 °C an der Meeresoberfläche und zusätzlich eine dünnere PEPHÄRE und eine veränderte vertikale Durchmischung von Meeresschichten, mit unklaren Auswirkungen auf die Biosphäre. Bei den beschriebenen Aufheizeffekten ist es durchaus wahrscheinlich, dass bei den beschriebenen klimatischen Auswirkungen von Windkraftanlagen auch die Vegetation beeinflusst

⁸⁹ <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1000493107>

⁹⁰ <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2025-42/wes-2025-42-RR1.pdf>

⁹¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112004455>

⁹² <https://www.nature.com/articles/nclimate1505>

⁹³ <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/94/5/bams-d-11-00240.1.xml>

⁹⁴ https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034006/pdf?utm_source=sciencedirect_contenthosting&getft_integrator=sciencedirect_contenthosting

⁹⁵ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adw7603>

wird. X. Wu et al. (2023)⁹⁶ untersuchten genau dies in Nordchina (Grasland), weil dort mögliche Einflüsse durch Landwirtschaft minimal sind und daher die Messergebnisse nicht verfälschen konnten. In 11 von 16 Arealen mit Windparks stellten sie ein reduziertes Wachstum des Grases (negativer „Normalized Difference Vegetation Index“, NDVI) fest, das umso geringer war, je leistungsstärker der Windpark war. Die Vegetation zeigte damit geringere Kohlenstoffspeicherefunktion, die aber für die Reduktion von CO₂ in der Atmosphäre wünschenswert wäre. Eine neuere Studie von N. Su et al. (2024)⁹⁷ zum Pflanzenwachstum an 101 Windparks im Grasland der inneren Mongolei kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Windparks steigerten die nächtlichen Temperaturen, verringerten die Evapotranspiration (Verdunstung von Wasser aus Tier-/Pflanzenwelt und Boden-/Wasseroberflächen), inhibierten Pflanzenwachstum, verringerten die primäre Produktivität und reduzierten den „Leaf Area Index“ (LAI).
Fazit: Die berichteten Erwärmungen durch den Betrieb von Windkraftanlagen liegen alle in der Größenordnung des Temperaturziels von 1,5 °C, sind also relevant, wenn die Vermeidung eines weiteren Anstiegs der Erddurchschnittstemperatur diskutiert wird. Die Daten zum Pflanzenwachstum legen zudem nahe, dass auch die Biosphäre durch Windkraftanlagen negativ beeinflusst werden kann.

3.3. Windkraft und Natur- und Artenschutz

Windkraftanlagen in Form von Windparks mit vielen Einzelanlagen beanspruchen große Flächen. Nach Angaben des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (zitiert nach ⁹⁸) sind Onshore-Anlagenabstände um ca. das vierfache des Anlagenrotordurchmessers D üblich, was einerseits aus der Begrenztheit der Planungsflächen sowie andererseits aus wirtschaftlichen Überlegungen resultieren soll. Der Windkraftanlagenhersteller Daewoo gibt einen Abstand von 5 D an. Bei großen Windparks ist der Abstand größer (7 - 10 D). Die Abstände gelten oft sowohl in transversaler als auch in longitudinaler Richtung.

Für andere Nutzung dauerhaft verloren und versiegelt ist aber nur die Grundfläche des Fundaments der Einzelanlage mit ca. 500 qm und die Kranstellfläche mit ca. 1.800 qm, sowie die Zuwegung (insgesamt < 1 % der Windparkfläche). Die Flächen dazwischen werden oft als Acker- oder Grünland genutzt. Zu beachten sind aber die Studien zur Wachstumshemmung bei Pflanzen in Arealen um Windkraftanlagen herum, vorausgesetzt die Daten aus Grasland in China sind übertragbar.⁹⁹ Gelegentliche Berichte über verringerte Milchproduktivität bei Kühen in der Nähe von Windkraftflächen¹⁰⁰ konnten dem Vernehmen nach bisher nicht wirklich bestätigt werden. Dagegen wurde berichtet, dass die Fleischqualität bei Schweinen und Ziegen signifikant schlechter in der Nähe von Windkraftanlagen ist.¹⁰¹ PFAS- u.a. Emissionen z.B. durch Erosion der Rotorblätter (siehe: Medizinische Aspekte) könnten dafür sprechen, um Windkraftanlagen herum jedenfalls keine Lebensmittel zu produzieren, jedenfalls nicht nach ökologischen Standards.

Windparks im Wald. Laut Umweltbundesamt wird für 2 % der Windkraftanlagen in Deutschland Wald gerodet. Das ist auch deshalb möglich geworden, weil die Ampelkoalition 2023 im Paragraph 2 des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes (EEG2023) dem Bau und der Errichtung von Anlagen eine Bedeutung von "überragendem öffentlichen Interesse" zuerkannt und Zulassungsprozeduren vereinfacht hat. Pro Anlage fallen 0,5 bis 1 Hektar gerodete Fläche an, die teilweise wieder aufgeforstet wird, u.U. mit Ertragseinbußen (siehe: Rauigkeitslänge³⁵). Zusätzlich können

⁹⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095927323007168?via%3Dihub>

⁹⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724024162>

⁹⁸ <https://www.dirk-hottmann.com/anordnung-der-windenergieanlagen-in-onshore-windparks/>

⁹⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095927323007168?via%3Dihub>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724024162>

¹⁰⁰ <https://www.anses.fr/en/content/disorders-two-cattle-farms-highly-unlikely-be-due-wind-turbines>

¹⁰¹ <https://reference-global.com/download/article/10.1515/aoas-2015-0051.pdf>; <https://reference-global.com/download/article/10.2478/aoas-2014-0003.pdf>

Ausgleichsmaßnahmen erfolgen. Laut der Fachagentur Wind und Solar¹⁰² wurden bisher 1165 Hektar, d.h. etwa 0,01 % der gesamten Waldfläche in Deutschland für Windkraft gerodet. Was zunächst unbedeutend erscheint, schaut bei näherer Betrachtung durchaus etwas anders aus. Wald-Windkraft konzentriert sich v.a. in windreichen Wäldern der Mittelgebirge. Wiederaufforstungen dauern Jahrzehnte. Außerdem schrumpft der Wald: Schädlinge, Trockenperioden und Stürme vernichten immer mehr Wald, – bisher ca. 600 000 von 11,5 Millionen Hektar. Der deutsche Wald ist schon jetzt extrem zerschnitten. Laut Untersuchungen von Pierre Ibisch¹⁰³, Professor für Sozialökologie der Waldökosysteme an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung in Eberswalde gibt es in Deutschland 2 Millionen Wald-Fragmente und 98 Prozent dieser Fragmente sind kleiner als einen Quadratkilometer. Windkraftanlagen würden dieses Problem verschärfen. Besonders alarmierend sei die extreme Hitze, die sich an heißen Sommertagen auf den geschotterten Zuwegungen und Standflächen der Windkraftanlagen entwickelt. Diese Hitze würde dem Waldboden Feuchtigkeit entziehen und zur Austrocknung führen. Die Folge: weniger CO₂-Speicherung (Vegetationsindex) und geringere Kühlwirkung auf das Mikroklima. Areale mit weniger fragmentiertem intakten Wald zeigen hingegen geringere Temperaturen an heißen Sommertagen und sind vitaler, so das Ergebnis der Ibisch-Studie. Ergebnisse einer Computermodellierung der ETH Zürich¹⁰⁴ besagen, dass Wälder mittelfristig zu einem Kühleffekt um bis zu 0,25 °C beitragen. Kurzfristig, am Anfang einer Hitzewelle, ist Grasland aufgrund seiner höheren Verdunstung für die Kühlung wichtiger. Wald geht konservativer mit dem Wasserhaushalt um, was aber auch eine komplexere Ökologie möglich macht. Wie auch an anderen Orten können durch Eingriffe wie Windparks im Wald sensible Arten und ihre schützenswerten Lebensräume gefährdet werden¹⁰⁵, – dies gilt auch für Fledermäuse.¹⁰⁶ Aus diesen Gründen vertritt der Umweltverband BUND die Position, dass nicht mehr als 0,1 % der Waldfläche für Windkraft genutzt werden soll. Windkraftstandorte im Wald wurden vom BUND als Naturschutzverband also nicht prinzipiell abgelehnt, dies aber auch nicht detailliert begründet.

Windkraftanlagen und Artenschutz. Nach §§ 44 Abs. 1 Nr. 2 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) ist es verboten, wildlebende Tiere der streng geschützten Arten und der europäischen Vogelarten während der Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderungszeiten erheblich zu stören, zu verletzen oder zu töten. Als "erheblich" wird eine Störung angesehen, wenn sich durch sie der Erhaltungszustand der lokalen Population einer Art verschlechtert. Dies kann beispielsweise dann der Fall sein, wenn Vogelpaare durch Störungen von ihren Gelegen vertrieben werden und die Eier aufgegeben oder Jungvögel daraufhin verenden.

Windkraftanlagen können auf verschiedene Weise Lebewesen und ihre Habitate gefährden, etwa durch direkte Kollision oder durch Störung von Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderungsarealen oder durch Vertreibung. Schon die Senkung der Attraktivität von Habitaten ist also als Störung im Sinne des Gesetzes zu verstehen. Durch Um- oder Überfliegen können ferner Tiere auf dem Zug geschwächt werden. Nicht nur einzelne Arten können

¹⁰² <https://www.fachagentur-wind-solar.de/veroeffentlichungen/mediathek/detail/entwicklung-der-windenergienutzung-auf-forstflaechen>

¹⁰³ <https://opus4.kobv.de/opus4-hnee/frontdoor/index/index/docId/390>; <https://essopenarchive.org/doi/full/10.22541/essoar.175917332.20161014/v1>

¹⁰⁴ <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03331-3>

¹⁰⁵ <https://publikationen.deutschwildtierstiftung.de/product-page/windenergie-im-lebensraum-wald-pdf>

¹⁰⁶ <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.14249>; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36681078/>

so beeinträchtigt werden. Ein Teil der Fachliteratur belegt auch einen signifikanten Verlust an Vogel-Biodiversität durch Windkraftanlagen (siehe etwa: R. May et al. (2020)¹⁰⁷.

Sog. kollisionsgefährdete Brutvogelarten. Vorschriften zur bundeseinheitlichen Signifikanzprüfung beziehen sich auf 15 kollisionsgefährdete Brutvogelarten (Einzelbrutpaare)¹⁰⁸, die abschließend in Anlage 1 Abschnitt 1 zum Bundesnaturschutzgesetz festgelegt werden. Diese 15 Arten gehen i.W. auf das sog. Helgoländer Papier zurück, das Mitarbeiter einiger Vogelschutzwarten 2007 auf einer begrenzten Datenbasis erarbeitet hatten und das nicht gleichzusetzen ist mit einer umfassenden Studie unter Einschluss aller möglichen Arten. Die Arten im Helgoländer Papier sind: Baumfalke, Fischadler, Rohrweihe, Rotmilan, Schreiadler; Schwarzmilan, Seeadler, Steinadler, Uhu, Wanderfalke, Weißstorch, Wiesenweihe, sowie Kornweihe, Wespenbussard und Sumpfhohleule. Bei diesen Arten besteht demnach ein erhöhtes Tötungs- und Verletzungsrisiko. Unabhängig davon hat eine Prüfung von Ansammlungen/Rastplätzen (auch von Brutkolonien) von Vögeln und die Prüfung auf Fledermäuse zu erfolgen. Mittlerweile ist eine überarbeitete Fassung¹⁰⁹ des Helgoländer Papiers in der Anwendung. Wenn es um das Kollisionsrisiko als Beeinträchtigung der Vogelwelt durch Windkraftanlagen geht, so gibt es neben Faktoren wie Standortwahl und Rotorfarbgebung einen weiteren Hebel, der in Pilotprojekten vielversprechende Resultate lieferte: die Radar-gesteuerte Abschaltung der Anlagen. Am Beispiel des Gotthard Wind Parks¹¹⁰ konnte gezeigt werden, dass das Kollisionsrisiko extrem reduziert werden kann, bei moderatem Ertragsverlust durch Abschaltung (654 Stunden im Jahr 2023).

Andere betroffene Brutvogelarten. Beileibe nicht nur die 15 sog. kollisionsgefährdeten Brutvogelarten (in Form einzelner Brutpaare) sind durch Windkraftanlagen betroffen. Eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Publikationen¹¹¹ belegt, dass auch viele andere Arten gefährdet sind oder gestört werden. Darunter sind auch Kiebitz¹¹², Großer Brachvogel¹¹³ und Auerhuhn¹¹⁴. Dabei

¹⁰⁷ R. May et al. (2020) Global life-cycle impacts of onshore wind-power plants on bird richness, Environ. Sustain. Indicators 8:100080; <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100080>

¹⁰⁸ Standardisierter Bewertungsrahmen zur Ermittlung einer signifikanten Erhöhung des Tötungsrisikos im Hinblick auf Brutvogelarten an Windenergieanlagen (WEA) an Land, Umweltministerkonferenz 11.12.2020; <https://www.bmu.de/faq/welche-windkraftsensiblen-arten-werden-mit-der-geplanten-aenderung-des-bnatschg-adressiert-und-welche-nicht>

¹⁰⁹ <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energiewende/windenergie/06358.html>; http://www.vogelschutzwarten.de/downloads/lagvsw2015_abstand.pdf

¹¹⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479726004391>

¹¹¹ Eine kleine Auswahl: <https://lewiscountywa.gov/media/oldSite/default/files/users/commdev/Appendix%203.4-5%20Part%201.pdf>; <https://abcbirds.org/article/review-begins-for-permitting-incident-take-of-california-condors-at-wind-energy-facility/>; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cobi.12569/abstract>; <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100080>; <https://abcbirds.org/wind-energy-threatens-birds/>; https://www1.eere.energy.gov/wind/pdfs/birds_and_bats_fact_sheet.pdf; <https://www.nature.com/articles/s41598-018-22178-z>; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cobi.12569>

¹¹² <https://www.nul-online.de/magazin/archiv/article-2537459-202007/kiebitz-und-windkraftanlagen-.html>

¹¹³ https://www.lb-naturschutz-nrw.de/fileadmin/redaktion/Fachthemen/energie_klimaschutz/Anlage_2_Windenergiesensible_Brutvogelarten_052017.pdf

¹¹⁴ https://www.researchgate.net/publication/348778835_Wind_energy_facilities_affect_resource_selection_of_capercaillie_Tetrao_urogallus

sind die Effekte nicht nur (tödliche) Kollisionen, sondern Störungen und Habitatverluste, sowie ein messbarer Verlust der Vogel-Biodiversität¹¹⁵, was wiederum das gesamte Ökosystem destabilisiert.

Rastvögel. Nicht nur Brutvögel sind durch Windkraftanlagen gefährdet, sondern auch Rastvögel. Die regelmäßig stattfindenden Wintervogelzählungen liefern gebietsspezifische Informationen, welche Arten betroffen sein können und sind bei den zuständigen Landesämtern (MV: LUNG) zu erfragen. U.a. können vorkommende Arten und ihre Schlaf- und Äsungsräume identifiziert werden und damit auch die Flächen, die täglich überflogen werden und WEA-frei bleiben sollten.

Vogelzugkorridore. Mit dem Thema Rastvögel verbunden ist das Thema Vogelzug. Eine neuere Studie¹¹⁶ identifizierte in Europa mehrere Regionen, in denen Vögel besonders durch Windkraftanlagen und Stromtrassen gefährdet sind. Zu diesen Gefahren-Hotspots gehört laut Studie auch die deutsche Ostseeküste. Als besonders gefährdete Vögel nennen die Forscher u.a. große Wasservögel, Möwen, Störche, sowie Eulen und andere Greifvögel. Auch das Kartenportal des Landes M-V¹¹⁷ weist Gebiete nach der „Relativen Dichte Vogelzug“ aus, wobei die Zone A die höchste Dichte aufweist und WEA-frei bleiben sollte.

Fledermäuse. Fledermäuse sind nachweislich ebenfalls vom Betrieb von Windkraftanlagen betroffen. Nicht nur direkte Kollisionen töten die Tiere. Die von Windkraftanlagen verursachte Verwirbelung der Luftströmung über mehrere Kilometer („Wake Effect“) führt u.a. zum sog. Barotrauma¹¹⁸, d.h. bedingt durch den Druckabfall hinter den Rotorblättern zum Platzen der Lungen und inneren Organe der Fledermäuse. Die Tiere findet man dann scheinbar unverletzt am Boden, es sei denn Prädatoren habe diese schon geholt. Hochrechnungen gehen davon aus, dass bis zu 200.000 Tiere jährlich an deutschen Windenergieanlagen verunglücken.¹¹⁹ Dazu kommen Störungen anderer Art und Habitatverluste. Auch bei manchen Fledermausarten kommt ein „Zug“ über große Distanzen vor. Windparks in diesen Korridoren¹²⁰ verbieten sich von allein, da sie die ziehenden Fledermäuse gefährden.¹²¹ Der Große Abendsegler (*Nyctalus noctula*) mit Flughöhen von ein paar Metern bis mehrere Hundert Meter wird als das häufigste Schlagopfer¹²², – auch tagsüber¹²³ –, angegeben. Betroffen sind aber auch Langstreckenzieher wie die Zweifarbfledermaus, Zwergfledermaus und die Rauhaufledermaus, sowie Teilstreckenzieher wie z.B. Mückenfledermaus, Breitflügelfledermaus und Mopsfledermaus. Über die direkte Lebensgefährdung hinaus können Windkraftanlagen die Nahrungssuche empfindlich stören. Die Erreichbarkeit und Funktionalität der Jagdgebiete wird durch notwendige Begleitumstände von Windkraftanlagen wie Lärm (versch. Frequenzen), Vibrationen, Leuchtfeuer, Verwirbelungen bis in erhebliche Höhen und großflächige Bewegungen (Rotoren) derartig beeinflusst, dass sie nicht mehr geeignet sind und gemieden werden und damit als Habitate verloren gehen. Flugrouten

¹¹⁵ R. May et al. (2020) Global life-cycle impacts of onshore wind-power plants on bird richness, *Environ. Sustain. Indicators* 8:100080; <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100080>; T. Laranjeiro et al. 2018, Impacts of onshore wind energy production on birds and bats: recommendations for future life cycle impact assessment developments. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23:2007-2023

¹¹⁶ J. G. Gauld (2022) Hotspots in the Grid: Avian Sensitivity and Vulnerability to Collision Risk from Energy Infrastructure Interactions in Europe and North Africa, *Journal of Applied Ecology* (2022). DOI: [10.1111/1365-2664.14160](https://doi.org/10.1111/1365-2664.14160)

¹¹⁷ <https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/script/index.php>

¹¹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982208007513>

¹¹⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320712002091>

¹²⁰ https://www.researchgate.net/publication/313473217_Seasonal_migrations_of_north-eastern_populations_of_Nathusius%27_bat_Pipistrellus_nathusii_Chiroptera

¹²¹ <https://link.springer.com/article/10.1007/s10344-015-0903-y>

¹²² <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6304056/>

¹²³ <https://www.trektellen.nl/species/records/0/0/1090>

werden durch Windkraftanlagen unterbrochen und damit auch die Zahl aktiver Quartiere reduziert oder die Tiere genötigt, Umwege zu fliegen.

In Beteiligungsverfahren ist es von Vorteil, mit genauen Informationen zu vorhandenen Arten und ihren Habitaten zu argumentieren. Diese Informationen liegen oft den zuständigen Landesämtern und unteren Naturschutzbehörden vor und können per Anfrage oder zur Not über Akteneinsicht nach IFG oder UIG erhalten werden.

Reh- und Rotwild. Rotwild zeigt v.a. in der Bauphase ein deutlich erhöhtes Stresslevel, Gewöhnungseffekte an den Betrieb sollen nach einem Jahr sichtbar werden.¹²⁴ Auch Rehwild zeigt demnach eine erhöhte Ausschüttung von Stresshormonen, v.a. bei größeren Windparks.

Insekten. Auch für andere Arten als Vögel und Fledermäuse erscheinen immer häufiger wissenschaftliche Publikationen, die nahelegen, dass Windkraftanlagen diese Arten signifikant stören können. Gerade vor dem Hintergrund einer großen Studie in Deutschland, die belegt, dass 76 % der Biomasse aller fliegenden Insekten in Norddeutschen Schutzgebieten allein von 1989 bis 2016¹²⁵ verloren gegangen sind, sind Berichte über den negativen Einfluß von Windkraftanlagen auf Insekten sehr ernst zu nehmen, insbesondere auch weil in Schutzgebieten der Einfluß von Agrochemie als Ursache für ein Insektensterben eher weniger prominent sein dürfte. Eine umfassende, aktuelle Studie stammt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)¹²⁶. Die Studie macht konservative Annahmen: (i) die Insektendichte wird abhängig von der Höhe nach C.G. Johnson¹²⁷ u.a. beschrieben, – angenommen wird in Höhe der Rotoren eine Dichte von 3 Tieren à 1 mg pro 1000 m³, (ii) das Luftvolumen, das zusammen durch alle Rotoren im Jahr fließt, wird mit 8 Millionen Kubikkilometer angesetzt, (iii) basierend auf (i) kreuzen 24000 Tonnen Insekten pro Jahr Windräder, (iv) es wird angenommen, dass nur 5 % der das Windrad passierenden Insekten sterben. Die Studie kommt zum Schluß, dass jedes Jahr mindestens 1200 Tonnen Insekten durch Windenergieanlagen verloren gehen und diese Menge durchaus relevant für die Populationsstabilität ist. Der Autor fordert experimentelle Folgeuntersuchungen, die bis heute aber nicht stattgefunden haben. Indirekte Bestätigung erfährt diese Studie durch eine andere bereits erwähnte Publikation¹²⁸, wonach bis zu 50 % des Ertrages von Windkraftanlagen durch abgesetzte Insektenreste auf Rotoren verloren gehen. Windkraftanlagen zumal in relativ insektenreichen Gebieten wie Feucht- und anderen Schutzgebieten sollten demnach vermieden werden, da (i) große Mengen an reproduktionsfähigen Insekten getötet werden und damit für die Reproduktion der Art sowie als Nahrungsquelle für andere Arten nicht mehr zur Verfügung stehen, und (ii) der Ertrag von Windkraftanlagen durch „Insektenschlag“ drastisch vermindert wird. Kritik an der Studie des DLR kommt ausgerechnet vom ältesten Naturschutzverband Bayerns, dem LBV.¹²⁹ Er bestreitet nicht die Zahl von 1200 Tonnen durch Windkraft zu Tode kommenden Insekten pro Jahr. Er verweist aber auf eine Publikation von M. Nyffeler et al. (2018)¹³⁰, nach der abgeschätzt für Deutschland jährlich 450000 Tonnen ‚Insekten‘ durch Vögel verspeist werden und folgert, dass 1200 Tonnen nicht ins Gewicht fallen. Das Argument sticht kaum bei genauer Betrachtung. Nyffeler et al. zählen beileibe nicht nur Insekten, sondern die gesamte von Vögeln gefressene Biomasse

¹²⁴ <https://www.pirsch.de/jagdwissen/wildbiologie/windkraft-und-wildtiere-ein-gruenes-dilemma-38451>

¹²⁵ C.A. Hallmann (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. PLoS ONE 12 (10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

¹²⁶ F. Trieb (2018) Interference of flying insects and wind parks. www.dlr.de/tt/fluginsekten

¹²⁷ <https://www.jstor.org/stable/1760>; <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah4379>; https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00003018; siehe auch: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X2030515X?via%3Dihub>

¹²⁸ G.P. Corten et al. (2001) Aerodynamics: Insects can halve wind- turbine power, Nature 412, 41–42; <http://www.nature.com/articles/35083698>

¹²⁹ <https://www.lbv.de/naturschutz/standpunkte/insektensterben/insektensterben-und-windkraft/>

¹³⁰ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-018-1571-z>

zusammen, also Eier, Larven, Puppen und adulte Tiere, sowie auch viele Nicht-Insekten wie Spinnen (!). Migrierende Insekten kann man sich hingegen überwiegend als beflügelte, ausgewachsene, d.h. fortpflanzungsfähige Tiere vorstellen, d.h. eine Selektion genau der Tiere, die für die Reproduktion der Arten wichtig sind. Eine Reduktion dieser Gruppe kann, wie die DLR-Studie aussagt, also durchaus „relevant für die Populationsstabilität“ sein. Das Thema verdient also unbedingt umfassende Feldstudien, für die sich Naturschutzverbände wie der LBV u.a. durchaus stark machen könnten.

Nicht unterschlagen werden soll an dieser Stelle, dass nicht nur mechanischer „Insektenschlag“ sondern auch Infraschall, wie er von Windkraftanlagen ausgeht, nachweislich Insekten schädigen kann. M.A. Mullen¹³¹ berichtet z.B. schon 1974 von Entwicklungsstörungen bei Mehlmotten durch Infraschall bei 10 Hz. Infraschall als Methode zur Bekämpfung von Insekten wurde 2009 zum Patent angemeldet.¹³² Bienen kommunizieren u.a. bei 12-13 Hz, – potentielle Störungen durch äußeren Infraschall von Windkraftanlagen sind hier aber noch nicht im Detail untersucht.

Marine Lebewesen. Hydrodynamische Modellierungsstudien u.a. von N. Christiansen et al. (2022)¹³³ legen nahe, dass Offshore-Windkraftanlagen den Wind deutlich abschwächen, Strömungen, Temperaturen und Salzgehalt in der Umgebung der Anlagen sowie die Struktur der Wasserschichten verändern. Dadurch kommt es zu Veränderungen des Meeresökosystems. Es verändert sich z.B. über große Flächen die Konzentration von Phytoplankton.¹³⁴ Es wundert also nicht, dass eine große Zahl von Arbeiten die Beeinträchtigung mariner Lebewesen durch Windkraftanlagen zum Thema haben. Eine Sammlung von ca. 4500 großenteils wissenschaftlichen Publikationen findet sich etwa unter der Plattform „Tethys“ des Pacific Northwest National Laboratory (USA).¹³⁵ Dabei geht es sowohl um nachgewiesene Beeinträchtigungen von marinen Lebewesen durch Windkraftanlagen, als auch um Möglichkeiten der Minderung dieser Störungen. Themengebiete sind u.a. „Fledermaus- und „Vogelinteraktionen mit Offshore Wind Energie“, „Störungen von Lebewesen in der Bodenzone des Meeres (Benthos) durch Fundamente, Anker und Kabel“, „Einführung neuer Strukturen und ihr Effekt auf die Fischökologie“, „Effekt elektromagnetischer Felder auf marine Lebewesen“ und „Unterwasserlärmeffekte auf marine Lebewesen“. Letzteres beginnt schon während der Suche nach geeigneten Arealen für das Aufstellen von Offshore-Anlagen mittels Sonar, das offenbar zu einem temporären Gehörverlust bei Walen führen kann.¹³⁶ Eine Arbeit von A. Gerasoulis (2024)¹³⁷ stellt einen Zusammenhang zwischen diesen Sonararbeiten und dem Stranden/Sterben von Walen her. Während des Baus von Offshore-Anlagen entsteht dann ebenfalls enormer Unterwasserlärm etwa durch Rammarbeiten¹³⁸, der mit bis zu 205 dB¹³⁹ (Abstand: 100 m) angegeben wird und kilometerweit wahrnehmbar ist.

¹³¹ <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00605005>

¹³² <https://patents.google.com/patent/CN101940198A/en>

¹³³ <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2022.818501/full?ref=pesacheck-staging.dev.codeforafrica.org>

¹³⁴ <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2022.1008005/full>; <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00625-0>

¹³⁵ <https://tethys.pnnl.gov/>

¹³⁶ <https://www.wind-watch.org/documents/sonar-vessel-noise-survey/>

¹³⁷ <https://www.wind-watch.org/news/2024/07/15/link-between-offshore-wind-survey-activity-and-spike-in-whale-deaths/>

¹³⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X10000044>; <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/4/847>

¹³⁹ Zum Vergleich: an Land liegt die Schmerzschwelle für menschliche Ohren bei 120-140 dB(A), dem Startlärm eines Eurofighters.

Das stört z.B. Meeressäuger wie den Schweinswal, der auf mehr als 20 km Distanz flüchtet.¹⁴⁰ Die Fa. Hydrotechnik Lübeck hat daher vor einigen Jahren das Verfahren des Blasenvorhangs entwickelt, mit dem der Rammlärm immerhin um 20 dB auf 1 % des Ursprungslevels reduziert werden kann.¹⁴¹ Schwimmende Anlagen benötigen keine so laute Rammtechnik, haben aber andere Nachteile.¹⁴² Auch Lärm aus laufendem Betrieb der Anlagen kann auf vielfältige Weise Arten beeinträchtigen.¹⁴³ Dabei könnte Infraschall eine besondere Rolle spielen. Wale (und etliche andere Tiere) kommunizieren mittels sehr niedriger Frequenzen, Blauwale z.B. v.a. bei 10 - 40 Hz.¹⁴⁴ Äußerer Infraschall könnte die Kommunikation und Orientierung der Tiere beeinflussen, zumal wenn er unnatürlich gepulst daher kommt. Eine Zusammenstellung einer großen Zahl von Publikationen, die sich nicht nur auf Vögel beziehen, hat Bird Life 2023 veröffentlicht.¹⁴⁵ Neben vielen Publikationen, die sich mit negativen ökologischen Auswirkungen von Windkraftanlagen auch auf marine Organismen beschäftigen, gibt es auch einige Publikationen, die Positives vermelden. K. M. Werner et al. (2024)¹⁴⁶ berichten in ihrer von WindMW und RWE unterstützten Studie, dass Fundamente auf dem Meeresboden als künstliche Riffe insbesondere für Kabeljau dienen können. Eine vom Bundesverband Windenergie Offshore (BWO) beauftragte Studie¹⁴⁷, die von den Unternehmen DanTysk Sandbank, EnBW AG, Iberdrola, Ørsted, RWE, Skyborn Renewables, Vattenfall und WindMW GmbH finanziert wurde, berichtet von zwei (!) halbseitig Kamera-überwachten Einzelanlagen an Land. Die Ergebnisse der sehr limitierten Untersuchung werden als allgemeingültig interpretiert, – auch für Offshore-Anlagen: Danach sollen Zugvögel zuverlässig Windkraftanlagen meiden, Kollisionen seien selten. K. C. Detloff vom NABU¹⁴⁸ hat dazu eine kritische Besprechung publiziert und kommt darin zu dem Schluß, dass in der BWO-Untersuchung tatsächliche Effekte auf marine Ökosysteme verharmlost werden. In der Tat kommen andere Studien¹⁴⁹, die akribisch tote Tiere unter den Anlagen auszählen, zum Schluß, dass Windkraftanlagen v.a. in Vogelzugkorridoren ein erhebliches Vogelschlagrisiko bergen, das aber durch Radar-abhängige Abschaltungen ganzer Windparks deutlich reduziert werden kann.

3.4. Windkraftanlagen und medizinische Aspekte

Zu möglichen gesundheitlichen Belastungen für Menschen, die in der Nähe von Windkraftanlagen wohnen, listet das Umweltbundesamt hörbaren Schall, tieffrequenten Schall (einschließlich Infraschall), Schattenwurf, Lichtemissionen, Eiswurf und Belästigungseffekte durch „subjektive

¹⁴⁰ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/025002>

¹⁴¹ <https://www.bbc.com/future/article/20231106-the-big-bubble-curtains-protecting-porpoises-from-wind-farm-noise>

¹⁴² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X2500534X#s0065>

¹⁴³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122006852#cebib0010>; https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Galparsoro-et-al-2022_0.pdf

¹⁴⁴ <https://biologyinsights.com/what-frequency-do-whales-communicate-at/>

¹⁴⁵ <https://www.birdlife.org/wp-content/uploads/2023/09/Background-paper-ecological-impacts-of-offshore-wind-on-the-marine-environment.pdf>

¹⁴⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165783624000018#sec0035>

¹⁴⁷ <https://bwo-offshorewind.de/pressemitteilung-studie-zeigt-zugvoegel-meiden-windenergieanlagen-fast-vollstaendig/>

¹⁴⁸ <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/meere/offshore-windparks/faktencheck.html>

¹⁴⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479726004391>

Bewertung“ auf, worunter wohl auch die schlichte Sichtbarkeit¹⁵⁰ und der ästhetische Eindruck¹⁵¹ fällt, wobei letzterer nicht einfach als „subjektiv“ zu bagatellisieren ist. Immerhin geben Verordnungen einer ganzen Reihe von Landschaftsschutzgebieten als Schutzziel immer wieder an, die Schönheit der Natur zu sichern und den landschaftlichen Charakter einer unverbauten Küstenlandschaft zu erhalten bzw. wiederherzustellen (z.B. LSG Salzhafl). Da viele Störeffekte auch auf den Menschen in der Regel mit größerem Abstand zu Windkraftanlagen abzunehmen scheinen, ist ein Mindestabstand wichtig. Die Frage ist, wie groß muss dieser sein?

Mindestabstand zu Wohnbebauung. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) gibt für alle Windkraftanlagen ab einer Höhe von 50 Metern einen Mindestabstand von rund 600 Metern zu Siedlungen vor, – ohne Differenzierung nach Größe, Leistung oder Schalldruck. Weitere bundesweit einheitliche Regelungen gibt es nicht. Einzelne Bundesländer haben z.T. weitergehende Mindestabstandsregelungen eingeführt. In Bayern galt bis 2022 die 10H-Regel, wonach der Abstand von Windkraftanlagen zu Wohnbebauung das zehnfache der Anlagenhöhe betragen muss, bei 200 m Höhe also 2 km. Die Regel wurde 2022 abgeschafft, – nicht aufgrund von neuen medizinischen Erkenntnissen zur Sicherheit der Anlagen –, sondern um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu „forcieren“. Je nach Region liegen typische Abstände heute zwischen 700 und 1.000 Metern. Diese Abstände sind nach Aussagen des Energiekonzerns ENBW so bemessen, dass „das Wohnen in den Aspekten Gesundheit, Schallschutz und Naturverträglichkeit aktuellen Vorgaben zufolge als unproblematisch eingestuft wird“. ¹⁵² Laut Umweltbundesamt¹⁵³ würden Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Wohngebieten aber auch den Ausbau der Windenergie ins Stocken bringen. Die vorhandenen Flächen würden sich bereits bei einem pauschalen Abstand von 1.000 Metern um 20 bis 50 Prozent reduzieren, bei 2000 m Mindestabstand blieben bundesweit nur drei Prozent der potenziellen Leistung. O-Ton des UBA: „Ein Ausbau der Windkraft wäre damit kaum ausreichend möglich“. Derartige Formulierungen klingen danach, als ob politisch der Windkraftausbau höher als Umweltverträglichkeit (und Gesundheitsrisiken) eingestuft wird. Umweltverträglichkeit, ein Konzept mit dem das UBA vertraut ist, basiert auf dem Gedanken, dass solche Projekte einer besonders strengen Prüfung unterzogen werden sollen, bei denen negative Auswirkungen auf die Natur (und den Menschen) nicht ausgeschlossen werden können. In diesem Zusammenhang sind Aussagen von Prof. K. Mattson (Uppsala University)¹⁵⁴ interessant, der aufgrund des Forschungsstandes einen Sicherheitsabstand von 5 bis 10 Kilometer zu Windkraftanlagen fordert, um Risiken zu minimieren.

Störeffekte durch Schall (inkl. Infraschall). Windkraftanlagen sind Industrieanlagen, die Tag und Nacht Lärm verursachen. Der Hersteller Vestas gibt für sein beliebtestes Modell V150 4.2MW¹⁵⁵ einen maximalen Wert von 104,9 dB(A) an, was etwa einem Formel-1-Wagen, einer Diskothek oder einer Kreissäge entspricht. Derartige Lärmpegel werden bei längerer Einwirkung als gesundheitsgefährdend eingestuft. Im Abstand von etwa 400 m ist je nach Situation aber deutlich weniger Lärmpegel, oft < 45 dB(A) hörbar. Die Beurteilung der Geräuschsituation bei Planung und Betrieb von Windenergieanlagen erfolgt im Einzelfall und nach der „Technischen Anleitung zum Schutz

¹⁵⁰ <https://docs.wind-watch.org/Freiberg-2019.pdf>

¹⁵¹ <https://www.naturschutz-energiewende.de/lesetipp/aesthetik-trifft-energiewende/>; <https://www.sueddeutsche.de/kultur/oekologie-architektur-energiewende-klima-1.5371971?reduced=true>; <https://www.art-elena.com/projects/wind-art/>

¹⁵² <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/windkraft/windkraft-faktencheck/mindestabstand-von-windenergieanlagen.html>

¹⁵³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/mindestabstaende-bei-windenergieanlagen-schaden-der>

¹⁵⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=nDwsd32SDEY&t=32s>

¹⁵⁵ <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/onshore-wind-turbines/4-mw-platform/V150-4-2-MW>

gegen Lärm – TA Lärm“.¹⁵⁶ Jede Windenergieanlage bzw. jeder Windpark muss deren Immissionsrichtwerte einhalten. Für allgemeine Wohngebiete gelten tags (6:00 bis 22:00 Uhr) 55 dB(A) und nachts (22:00 bis 6:00 Uhr) 40 dB(A). Immerhin dürfen einzelne Geräuschspitzen diese Richtwerte am Tag um bis zu 30 dB(A) und nachts um bis zu 20 dB(A) überschreiten! Windkrafthersteller bieten zuweilen schallreduzierte Betriebsmodi an, die ca. 10 dB(A) leiser sind, aber zu Ertragseinbußen führen. Alle Angaben beziehen sich auf die, für das menschliche Ohr hörbaren Frequenzen (dB(A)-Skala). Noch nicht ausreichend berücksichtigt wird bei der Beurteilung nach TA-Lärm, dass Lärmpegel und Frequenzspektrum eines Windparks vom Windpark-Layout (ausgerichtete oder gestaffelte Einzelanlagen) relativ zum Wind deutlich variieren und auch von Pegel und Spektrum der Einzelanlagen abweichen können.¹⁵⁷

Schon früh gab es durch N. Kelley et al. (1985) in ihrem Bericht für das US State Department Hinweise auf negative gesundheitliche Auswirkungen von Windkraftanlagen. Interessanterweise gaben Betroffene oft an, den Lärm zu „spüren“ statt ihn zu hören. Kelley schlußfolgerte, dass die Hauptursache pulsierender Infraschall (< 20 Hz) und niedrig-frequenter Schall (< 100 Hz) war, die für den Menschen i.d.R. nicht hörbar sind. V.a. Infraschall kleiner Frequenz, d.h. großer Wellenlänge (20 Hz entspricht $340/20 = 17$ m Wellenlänge) hat in der Tat spezielle Eigenschaften. Er legt sehr große Strecken praktisch ohne Energieverlust zurück, wird kaum absorbiert und auch kaum durch Objekte mit Dimensionen kleiner der Wellenlänge signifikant abgeschwächt, um große Objekte herum gelenkt und zu einem großen Teil von der Erdoberfläche zurückgeworfen.¹⁵⁸ Infraschall dringt sowohl in Wohnungen ein (siehe [Anhang 3.4.](#)) als auch in Körpergewebe. Moderne Windkraftanlagen emittieren Infraschall, oft im Bereich von 0,1 bis 10 Hz.¹⁵⁹ Je länger die Rotorblätter, je kleiner ist die Frequenz. Je größer die Nennleistung einer Anlage, desto stärker der Infraschall.¹⁶⁰ Im Unterschied zu natürlich auftretendem Infraschall ist der Infraschall von Windkraftanlagen permanent und gepulst: Die Passage der Rotorflügel am Mast führt zu Kontraktionen der dazwischen befindlichen Luftsäule und damit zu Pulsen (Maxima und Minima) des Luftdrucks. Schon 2010 stellten Salt & Kaltenbach¹⁶¹ u.a. fest, dass die üblichen A-gewichteten Lärm-messungen Infraschall viel schwächer abbilden, als C-, G- oder ungewichtete Messungen und nicht geeignet sind, physiologische Reaktionen zu bewerten. Zitat: „*An example showing the effect of A-weighting the turbine sound spectrum data of Van den Berg (2006) is shown in Figure 4. The low-frequency components of the original spectrum, which resulted in a peak level of 93 dB SPL at 1 Hz, are removed by A-weighting, leaving a spectrum with a peak level of 42 dBA near 1 kHz.*“ Die Bewertung von Infraschallwirkungen muss folglich unabhängig von der Hör- beziehungsweise Wahrnehmungsschwelle des Menschen erfolgen. Letztere sind i.d.R. als Schallpegel definiert, die 50 % beziehungsweise 90 % der Menschen nicht mehr hören, und spiegeln die individuelle Empfindlichkeit der Wahrnehmung im Innenohr (Cochlea) wider, nicht aber unbedingt die Wirkung auf den Körper. Infraschall-bedingte Einwirkung auf den Körper wird i.W. über grundsätzlich andere

¹⁵⁶ <https://www.bundestag.de/resource/blob/959576/6dbc5acbe73ec46dadcf725a90f5c76e/WD-8-096-20-pdf-data.pdf>; der kritische Bereich unter 8 Hz wird aber von der TA Lärm ausgeklammert: <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/wissenschaft/wissenschaftliche-grundlagen-fuer-eine-bewertung-gesundheitlicher-risiken-infraschall>

¹⁵⁷ <https://arxiv.org/pdf/2508.13128>

¹⁵⁸ <https://quartzmountain.org/article/how-infrasound-travels-through-air>; <https://news.cnrs.fr/articles/infrasound-sound-waves-that-nothing-can-stop>

¹⁵⁹ https://docs.wind-watch.org/coherent_wt_measurement.pdf

¹⁶⁰ <https://doi.org/10.1121/1.3543957>

¹⁶¹ <https://docs.wind-watch.org/Salt-Kaltenbach-BSTS-2011.pdf>; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20561575/>

„molekulare Sinnesorgane“ wahrgenommen.¹⁶² Seit Anfang der 80er Jahre ist bekannt, dass Zellen druckempfindliche „Schalter“ in Form von Ionenkanälen wie PIEZO1 (Druckbereich: 0,5-50 Hz)¹⁶³ oder TRPV4 (≈16 Hz) besitzen, die auf Infraschall-Stimuli ganze Kaskaden von zellulären Reaktionen auslösen („Mechanotransduction“). Als Reaktion nachgewiesen ist u.a. intrazelluläre Calciumaufnahme, oxidativer Stress und veränderte intrazelluläre Kommunikation und zuweilen auch ein programmierter Zelltod (Apoptose). Die ausgelösten Effekte sind abhängig vom Schalldruck, einer etwaigen Pulsation, der Frequenz des Infraschalls und seiner Dauer. Im Herz-Kreislauf-System löst intensive Infraschall-Exposition krankhafte Veränderungen wie Fibrose, Schädigung von Herzmuskelzellen und Blutdruck- und Herzfrequenzänderungen aus, im Gehirn kann es zu entzündlichen Prozessen und Verschlechterung der Gedächtnisleistung kommen. *Die Infraschall-empfindlichen molekularen Schalter (PIEZO1, TRPV4 u.a.) sind nicht dafür bekannt, politische Überzeugungen zu haben. Wenn also behauptet wird¹⁶⁴, dass man kritische Menschen nur von den Vorzügen der Windkraft überzeugen und im Zulassungsverfahren ordentlich beteiligen muss, damit sie keine negativen Auswirkungen von Windkraftanlagen mehr spüren, wird dies dem unwillkürlichen Mechanismus dieser Schalter nicht gerecht.* Bestimmte Infraschall-Frequenzen können zusätzlich auch noch Resonanzphänomene bei Organen und Körperhöhlungen hervorrufen, die dafür einen weniger starken Stimulus benötigen. Auch der seit 2012¹⁶⁵ bzw. 2014¹⁶⁶ und danach immer wieder¹⁶⁷ nachgewiesene Zusammenhang zwischen Windkraftanlagenbetrieb und Schlafstörungen bei Menschen, die im Abstand von ≤ 1500 m zu Windkraftanlagen wohnen, wird auf (gepulsten) Infraschall zurückgeführt. Eine Sammlung von 480 Artikeln zu gesundheitlichen Folgen von Windkraftanlagen, sowie Gerichtsurteile dazu haben die Windkraftkritiker von Wind Concerns (Alberta, USA) zusammengestellt.¹⁶⁸ Eine Übersicht über Quellen vor 2014 gibt E. Rosenbloom.¹⁶⁹ Aktuelle wissenschaftliche Übersichtsartikel aus den Jahren 2021-2026 zu den physiologischen Folgen von Infraschall, – auch von Windkraftanlagen –, finden sich [hier](#).¹⁷⁰ Bis heute kommen verschiedene Publikationen zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen was potentielle gesundheitliche Gefahren durch Windkraftanlage angeht. Dabei ist die Debatte stark emotional aufgeladen und auch von Interessengruppen geprägt. Erkenntnisse aus der Forschung

¹⁶² <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/wissenschaft/wissenschaftliche-grundlagen-fuer-eine-bewertung-gesundheitlicher-risiken-infraschall>; https://www.researchgate.net/publication/371517232_Impairment_of_the_Endothelium_and_Disorder_of_Microcirculation_in_Humans_and_Animals_Exposed_to_Infrasound_due_to_Irregular_Mechano-Transduction

¹⁶³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0149763426000175>

¹⁶⁴ <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0150.pdf>

¹⁶⁵ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23117539/>

¹⁶⁶ <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/2e7b5156-8049-4036-8781-b8b7c3106c3d/content>

¹⁶⁷ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25982992/>; <https://docs.wind-watch.org/lshitake-long-term-health-effects.pdf>; <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111156>; u.a.

¹⁶⁸ <https://www.windconcerns.com/wind-turbine-health-the-studies/>; <https://www.windconcerns.com/turbine-sickness-how-far-away-is-safe/>; <https://www.windconcerns.com/supreme-court-win-on-noise-disturbance/>

¹⁶⁹ https://wind-watch.org/w/index.php/Health_Effects_of_Noise_from_Large_Wind_Turbines

¹⁷⁰ <https://doi.org/10.3390/app16031553>; <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/wissenschaft/wissenschaftliche-grundlagen-fuer-eine-bewertung-gesundheitlicher-risiken-infraschall>; <https://doi.org/10.54647/cm321372>; https://journals.lww.com/endi/fulltext/2021/06030/wind_turbines_and_adverse_health_effects_applying.1.aspx

der letzten Jahre, insbesondere auch zu „Mechanotransduction“, werden leider immer noch nicht genügend berücksichtigt.

Einige (ältere) Berichte kommen zu dem Schluß, dass negative gesundheitliche Folgen durch Lärm von Windkraftanlagen nicht belegt sind, u.a. die „Massachusetts Wind Turbine Health Impact Study (2012)“¹⁷¹, die 90 dB bei 5 Hz als obere Grenze für Windkraftanlagen angibt und diese Bedingungen als nicht wahrnehmbar, d.h. wirkungslos darstellt, gleichzeitig aber Schlafstörungen als Folge anerkennt. Vestas selbst gibt aber für V150 4.2MW 104.9 dB an (s. S.27). Ein wissenschaftlicher Artikel (peer-reviewed) vom Februar 2026¹⁷² mit Messungen des Infraschalls an Windparks in Schweden (Windpark „Målarberget“ mit 27 Anlagen vom Typ Vestas V150-4.2 und Windpark „Lervik“ mit 7 Anlagen vom Typ SG170-6.6) zeigt, dass im Abstand von 1085 m je nach Wetter zwischen 95.2 und 99.0 dB anstehen, im Abstand von 2924 m immer noch 88.7 bis 96.3 dB. Ähnliche Befunde liefert auch das französische PIBE-Projekt.¹⁷³ Eine viel zitierte Studie ist die kanadische „Wind Turbine Noise and Health Study (2012)“.¹⁷⁴ Im Ergebnis der Studie heißt es, dass nicht beobachtet wurde, dass Windkraftanlagen einen Effekt auf Cortisol-Konzentrationen im Haar, Blutdruck, Ruhepuls und Schlaf hatten. Die Autoren schlossen allerdings eine allgemeine Gültigkeit ihrer Resultate aus und verwiesen auf den aktuellen Literaturstand. Interessanterweise gaben die Autoren außerdem an, Infraschall von Windkraftanlagen (Nennleistung damals: 660 kW bis 3 MW) im Einzelfall noch im Abstand von 10 km gemessen zu haben. Die kanadische Studie hat erhebliche, inhaltliche Kritik erfahren. Eine 39-seitige Zusammenfassung der einzelnen Kritikpunkte hat Denise Wolfe 2014 vorgelegt.¹⁷⁵ Darüberhinaus merken M. Dastan et al. (2026)¹⁷⁶ zurecht an, dass die kanadische Studie (i) den aktuellen Stand der Forschung zur „Mechanotransduction“ nicht berücksichtigt, (ii) ausschließlich kleinere Windkraftanlagen (660 kW to 3 MW) behandelt und (iii) zudem nur A- bzw. C-gewichtete Lärmmessungen angestellt hat, die den Infraschallpegel zu niedrig messen (s.o.).

Untersuchungen aus Dänemark¹⁷⁷ (Poulsen et al., mehrere Publikationen 2018 und 2019) fanden keine statistischen Zusammenhänge zwischen der Schallemission aus Windanlagen und bestimmten Erkrankungen (Schäden des Herz-Kreislauf-Systems, Diabetes, Bluthochdruck und Fehlgeburten) bei Anwohnern. W.Roos et al. (2021)¹⁷⁸ zeigen in einer kritischen Besprechung, dass u.a. auch in dieser dänischen Studie der Infraschall aus den Windanlagen generell gar nicht erfasst wurde und dass durch ihn möglicherweise verursachte Gesundheitsrisiko damit nicht Gegenstand der Analyse war. W.Roos et al. zeigen auf der anderen Seite detailliert auf, welche Gesundheitsgefahren von Windkraftanlagen ausgehen können und stellen auch die zugrunde liegenden physiologischen Wirkmechanismen dar. Sie kommen u.a. zu dem Schluß, dass das Pulsieren des Infraschalls, d.h. fluktuierende, abrupte Druckänderungen wichtiger Teil der

¹⁷¹ <https://www.mass.gov/doc/wind-turbine-health-impact-study-report-of-independent-expert-panel/download>

¹⁷² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X25006280?via%3Dihub#s0100>

¹⁷³ https://www.researchgate.net/publication/391148128_Overview_of_the_results_of_the_PIBE_project_Predicting_the_Impact_of_wind_turbine_noise

¹⁷⁴ <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/health-risks-safety/radiation/everyday-things-emit-radiation/wind-turbine-noise/wind-turbine-noise-health-study-summary-results.html>

¹⁷⁵ <https://www.windconcernsontario.ca/wp-content/uploads/2014/11/HC-DeniseWolfeIWT-Noise-Study-Comments-Final-26Nov2014.pdf>

¹⁷⁶ <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/3/1553>

¹⁷⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018303726>; <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6768316/>

¹⁷⁸ <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/wissenschaft/wissenschaftliche-grundlagen-fuer-eine-bewertung-gesundheitlicher-risiken-infraschall>

negativen Wirkung von Windkraftanlagen ist und sehen aus ärztlicher Sicht ein substantielles Gesundheitsrisiko für Infraschall-exponierte Personen.

Auch die WHO hat sich mit den neuen WHO-Lärmrichtlinien für Europa¹⁷⁹ vom 10.10.2018 der Problematik des Windkraftanlagenlärms angenommen und stuft ihn als eine bedeutsame Lärmquelle neben Fluglärm und anderem Verkehrslärm ein. In der Richtlinie heißt es: „Zu lange fehlte in den europäischen Planungsrichtlinien und Lärmschutzverordnungen die Befassung mit den negativen gesundheitlichen Auswirkungen nach dem Bau von Windkraftanlagen, v.a. bezogen auf Lärm unterhalb von 200 Hz (...) Für die durchschnittliche Lärmbelastung (WINDTURBINEN) empfiehlt die GDG (Leitlinienentwicklungsgruppe) unter bestimmten Bedingungen, den von Windkraftanlagen erzeugten Lärmpegel auf unter 45 dB Lden¹⁸⁰ zu senken, da Lärm oberhalb dieses Grenzwerts mit negativen gesundheitlichen Effekten verbunden ist.“ Unabhängig von der Art der Lärmquelle empfiehlt die WHO für Schlafzimmer nächtlich einen Lärmgrenzwert von 30 dB(A). Hier müsste die WHO sich aber eigentlich auf ungewichtete Dezibel beziehen.

Auf dem aktuellen Wissensstand ist kaum zu bestreiten, dass Windkraftanlagen signifikante Pegel an Infraschall (> 90 dB im Abstand 1000 bis 3000 m) emittieren. Mit Analysen nach den Bradford Hill-Kriterien¹⁸¹ konnte ferner ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Windkraftanlagen und negativen gesundheitlichen Auswirkungen wahrscheinlich gemacht werden. Der Zusammenhang zwischen niedrig-frequentem Lärm und u.a. Herz-Kreislaufkrankungen und anderen Störungen wird in verschiedenen Übersichtsarbeiten¹⁸² beschrieben und belegt. Diskutiert wird zur Zeit, ab welchem Schallpegel mit gravierenden gesundheitlichen Folgen zu rechnen ist und welche zusätzlichen Effekte die Pulsation des Infraschalls von Windkraftanlagen bzw. Windparks hervorruft. Selbst ohne Pulsation zeigen wissenschaftliche Studien zuletzt noch im April 2026¹⁸³, dass Versuchspersonen, die nur für 5 Minuten durch Infraschall von 17 Hz und 75–78 dB beschallt wurden, – also weit unter den von Windkraftanlagen über Tage und Wochen emittierten > 90 dB –, deutliche physiologische und psychologische Effekte zeigten.

Elektromagnetische Felder. Zu diesem Thema gibt es nur sehr begrenzt Literatur.¹⁸⁴ Knopper et al. (2014) geben an, dass die wissenschaftliche Evidenz elektromagnetische Felder von Windkraftanlagen als Ursache für Gesundheitsprobleme nicht belegt.

Schlagschatten. Rotoren von Windkraftanlagen absolvieren je nach Windstärke eine volle Drehung in > 5-7 Sekunden. Ihr sich mitbewegender Schlagschatten übt auf die Flächen hinter der Anlage einen Stroboskop-ähnlichen Effekt aus, – bei niedrig stehender Sonne über große

¹⁷⁹ <https://www.welt.de/wirtschaft/article181940094/Laute-Windraeder-schaden-der-Gesundheit.html>; <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

¹⁸⁰ „dB Lden is the sound pressure level averaged over the year for the day, evening and nighttime periods, with a +5 dB penalty for the evening and +10 dB for the night“, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/overview-aviation-sector/noise#aviation-noise-in-context>

¹⁸¹ https://journals.lww.com/endi/fulltext/2021/06030/wind_turbines_and_adverse_health_effects_applying.1.aspx

¹⁸² https://www.researchgate.net/publication/374959139_Impact_of_infrasound_and_low_frequency_noise_on_human_health_and_well-being_Part_I_Review_of_experimental_studies; <https://www.nature.com/articles/s41598-024-56250-8>; <https://www.nature.com/articles/s41598-021-97107-8>; <https://principia-scientific.com/the-hidden-health-risks-of-wind-turbine-infra-sound/>; <https://stm.bookpi.org/MRIA-V8/article/view/15054>

¹⁸³ <https://www.frontiersin.org/journals/behavioral-neuroscience/articles/10.3389/fnbeh.2026.1729876/full>

¹⁸⁴ <https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/pds/advance/2019%20Public%20Health%20Position%20Statement%20on%20Human%20Health%20Effects%20of%20Wind%20Turbines.pdf>

Strecken. Über die damit verbundenen Beeinträchtigungen für Mensch und andere Lebewesen gehen die Meinungen weit auseinander. Zwei Studien sehen potentielle Gefahren durch Schlagschatten als Auslöser von Anfällen bei photosensitiver Epilepsie, kommen aber zu dem Schluß, dass die relativ niedrigen Rotationsgeschwindigkeiten moderner Windanlagen als Trigger wohl nicht ausreichen.¹⁸⁵ Deutsche Zulassungsverfahren sind immerhin angehalten, diese Problematik mit zu berücksichtigen.¹⁸⁶ Siehe auch die Information der Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg.¹⁸⁷

Störende Warnlichter für den Luftverkehr. Windanlagen sind prinzipiell Hindernisse für den Luftverkehr und müssen daher in der Nacht gekennzeichnet werden, üblicherweise mit roten Blinklichtern, die Anwohner und andere Lebewesen stören. Dabei blinken die Lichter in >90 % der Zeit unnötig, weil kein Luftfahrzeug in der Nähe ist. Eine Verbesserung bedeutet die seit ca. 2015 existierende „bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung“ (BNK), bei der der Himmel per Radar nach Luftfahrzeugen abgesucht und nur bei sich nähernden Flugobjekten das Blinken aktiviert wird. Geeignete Radarsysteme¹⁸⁸ sind mit ca. 100 000 Euro allerdings relativ teuer, Alternativen unter Nutzung von Transpondersignalen werden immer noch mit 30 000 Euro veranschlagt. Der Gesetzgeber hält diese Kosten grundsätzlich aber für zumutbar, auch weil er die Akzeptanz von Windkraftanlagen in der Bevölkerung verbessern möchte. Mit dem Energiesammelgesetz hat er spätestens ab dem 01.01.2025 die Pflicht eingeführt, Windenergieanlagen an Land und im Küstenmeer mit einer bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung auszustatten. Die Bundesnetzagentur (BNetzA) kann Anlagenbetreiber aber auf deren Antrag hin von dieser Pflicht befreien.

Chemische Emissionen. Rotoren von Windkraftanlagen unterliegen der Erosion. Eine schöne Zusammenfassung gibt D.A. Katsaprakakis et al. (2021).¹⁸⁹ Ursachen sind v.a. Blitzeinschläge, Materialermüdung, Anströmkantenbeschädigungen (u.a. durch Insektenschlag¹⁹⁰ und Vogelschlag) und Schäden durch Vereisung, Hagel, Regen¹⁹¹ und UV-Strahlung. Dabei ist Delamination ein Problem. Durch die Trennung der Schichten der Verbundstoffe entstehen Risse, es werden so sukzessive immer mehr Partikel freigesetzt. Da an den Rotorspitzen Spitzengeschwindigkeiten von 250 – 400 km/h erreicht werden, ist die Erosion dort am größten.¹⁹² Daher bringen die Hersteller dort noch zusätzliche Schutzschichten auf. Nach Schätzungen der Key Wind Energy GmbH, soll der jährliche Abrieb einer einzelnen Anlage bei 3,38 kg liegen.¹⁹³ Eine Information des Bundestags (2020)¹⁹⁴ geht dagegen von bis zu 45 kg pro Jahr und Anlage aus. Herrscht hier schon eine gewisse Uneinigkeit in den Auffassungen vor, so wird zur Zeit aber v.a. divergent diskutiert, (i) welche Stoffe emittiert werden und (ii) v.a. welche Konzentrationen in der Umwelt erreicht werden, – getreu der Einsicht von Paracelsus: Die Menge macht das Gift. Das bekannte Gutachten von T.

¹⁸⁵ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18397297/>; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19919663/>

¹⁸⁶ <https://www.leka-mv.de/schattenwurf-von-windenergieanlagen/>

¹⁸⁷ <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/en/erneuerbare-energien/schattenwurf>

¹⁸⁸ <https://www.bbh-blog.de/alle-themen/schluss-mit-dem-roten-blinken-neues-zur-pflicht-zur-bedarfsgesteuerten-nachtkennzeichnung-von-windenergieanlagen/>

¹⁸⁹ <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5974>

¹⁹⁰ <https://docs.wind-watch.org/Interference-of-Flying-Insects-and-Wind-Parks.pdf>

¹⁹¹ <https://link.springer.com/article/10.1007/s40735-021-00472-0>

¹⁹² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121000501>

¹⁹³ [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/Aktuelles/Faktenchecks/20240801_BWE-Faktencheck - Erosion an Rotorblaettern.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/Aktuelles/Faktenchecks/20240801_BWE-Faktencheck_-_Erosion_an_Rotorblaettern.pdf)

¹⁹⁴ <https://www.bundestag.de/resource/blob/817020/27cf214cfbeaac330d3b731cbbd8610b/WD-8-077-20-pdf-data.pdf>

Mock¹⁹⁵ für eine Anhörung 2023 im Landtag NRW beschreibt u.a. die Freisetzung von Mikropartikeln und ihre potentiellen gesundheitlichen Folgen. Laut Gutachten können diese Partikel „gem. UBA Krebs (...) auslösen“, „die schützende Blut-Hirn-Schranke überwinden und ins Gehirn vordringen (...) Dort lagern sie sich offenbar in bestimmten Nervenzellen ab, den Mikroglia, beeinflussen die Immunabwehr und führen zu lebensgefährlichen Entzündungen“. Zitiert werden allerdings Resultate i.W. von Tierexperimenten mit Mikropartikeln, die nicht unbedingt von Windkraftanlagen herrühren. Diese Befunde müssen also nicht unbedingt in jedem Aspekt übertragbar sein, aber mindestens zur Vorsicht mahnen. E. Hengstmann et al. (2025)¹⁹⁶ beschreiben 228 chemische Substanzen, die potentiell von (offshore) Windparks freigesetzt werden, darunter viele gesundheitsschädliche Substanzen wie Mikroplastik¹⁹⁷, Bisphenol-A und PFAS. Bisphenol-A ist ein endokriner Disruptor¹⁹⁸ und potentiell karzinogen. PFAS (Per- und Polyfluoralkylsubstanzen)¹⁹⁹ sind sog. Ewigkeitschemikalien mit einem breiten Spektrum an Anwendungen und negativen medizinischen Wirkungen.²⁰⁰ Gasförmige PFAS sind Kältemittel, aber auch starke „Treibhausgase“, die die Ozonschicht der Erde angreifen. PFAS entziehen sich einer einfachen Dosis-Wirkungsbetrachtung, weil sie sehr lange nicht abgebaut werden und z.B. im Boden akkumulieren, d.h. mit der Zeit in ihrer Konzentration ansteigen können. Die EU hat 2024 mit einer Verordnung²⁰¹ ein weitgehendes PFAS-Verbot beschlossen, das ab April 2026 gilt. Befürworter des Windkraftausbaus in Lindenrain²⁰² argumentieren, dass PFAS nur in geringen Mengen in Windkraftanlagen vorkommen und eher beim Recycling als im laufenden Betrieb freigesetzt werden. Auch würden die Freisetzungen im gesamten Energiesektor nur ca. 0,08 % der weltweiten PFAS-Emissionen ausmachen und neue Anlagen Ersatzstoffe verbauen. Kritiker halten dagegen, dass es keine genauen Zahlen zur quantitativen Emission durch einzelne Windkraftanlagen (Standort-abhängig) gibt, so dass eine seriöse Abschätzung der erreichten Konzentrationen in der Umwelt unmöglich ist und Gefahren jedenfalls nicht ausgeschlossen werden können. U.a. wird eine belgische Quelle²⁰³ zitiert, die die Entstehung von chemischen Emissionen in der Praxis beschreibt, sowie interessante Dokumente aus dem wallonischen Parlament vorstellt. Neben der Rotorerosion werden auch andere Teile von Windkraftanlagen als Quelle für Emissionen im Betrieb diskutiert, etwa Schaltanlagen, die das starke „Treibhausgas“ Schwefelhexafluorid freisetzen sollen.²⁰⁴ Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten in den Turbinen stellen weitere potenzielle Quellen dar, sowie Opferanoden²⁰⁵ bei Offshore-Anlagen. Emissionen

¹⁹⁵ <https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST18-292.pdf>

¹⁹⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X2500390X>

¹⁹⁷ https://ravensburg.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/32/2024/04/S4F-RV_Faktencheck-Windkraft-Altendorfer-Wald_Mikroplastik_240411-vorl.pdf

¹⁹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389421020653>

¹⁹⁹ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.2c00502>;

²⁰⁰ <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/impacts-of-pfas-polymers>

²⁰¹ <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/eu-verordnung-schrittweise-pfas-verbote-ab-2026/>

²⁰² <https://pro-windkraft-lindenrain.de/aussage-5-windkraftanlagen-setzen-pfas-frei-und-belasten-boden-wasser-und-menschen-teilweise-richtig/>

²⁰³ <https://eike-klima-energie.eu/2025/01/24/chemische-verschmutzungen-durch-windkraftanlagen/>

²⁰⁴ <https://windkraft-bockenem.de/umweltgift-in-windraedern-warum-ein-klimakiller-zur-energiegewende-beitragen-soll-umschau-mdr/>

²⁰⁵ https://www.bsh.de/EN/TOPICS/Research_and_development/Current_projects/OffChEm/Anlagen/Downloads/Zusammenfassung-des-Projekts-OffChEm.pdf?blob=publicationFile&v=2

werden aber nicht nur für den Betrieb, sondern auch für die Produktion von Windkraftanlagen²⁰⁶ und ihre Entsorgung am Ende ihrer Laufzeit²⁰⁷ beschrieben, wenn ein Recycling nicht möglich sein sollte. Aber auch hier werden kaum genaue Zahlen präsentiert. Bisher landen alte Rotorblätter in den USA auf Deponien, in Europa zumeist zerkleinert als Ersatzbrennstoff in Zementöfen und Müllverbrennungsanlagen. Die ersten recycelbaren Rotorblätter für große Offshore-Anlagen werden derzeit in Dänemark hergestellt. Ab 2030 will der Anlagenbauer Siemens Gamesa nur noch recyclebare Rotorblätter verkaufen.²⁰⁸

4. Zusammenfassung

Die sukzessive Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde wird als problematisch angesehen, v.a. weil dadurch (i) Wetterextreme häufiger auftreten, mit hohen Schadenssummen; (ii) das Artensterben beschleunigt wird, (iii) negative gesundheitliche Effekte v.a. für ältere Menschen befürchtet werden und (iv) die verfügbare Landmasse durch Meeresspiegelenerhöhung schrumpfen könnte. Für das globale Phänomen der sog. „Klimaerwärmung“ wird von vielen ursächlich überwiegend der menschengemachte Ausstoß von sog. „Treibhausgasen“, – zuvorderst CO₂ aus fossilen Brennstoffen verantwortlich gemacht. Andere wissenschaftliche Theorien²⁰⁹ zu anderen bzw. zusätzlichen Ursachen der „Klimaerwärmung“ finden in der öffentlichen Diskussion kaum Beachtung.

Im Wesentlichen zwei Wege werden als Lösung einer menschengemachten Erwärmung gesehen, (i) die Einsparung von Energie und (ii) die Energiegewinnung ohne den Einsatz von fossilen Brennstoffen. Ein Blick in die Entwicklung des weltweiten Energieverbrauchs der letzten 10 Jahre zeigt, dass die Idee der globalen Energiesparsamkeit nicht wirklich erfolgreich ist und sogar immer mehr Energie verbraucht wird, auch weil Schwellenländer und ärmere Länder „nachziehen“. Zusätzlich sind, – vorhersehbar –, neue energieverbrauchende Technologien hinzugekommen (z.B. KI²¹⁰). Sporadische Reduktionen des Energieverbrauchs (wie zuletzt in Deutschland) sind wohl eher durch akute wirtschaftliche Schwäche erklärbar und dadurch, dass z.B. Deutschland auf verschiedene Weise energieintensive Industrien reduziert hat und sich auf Produktionen in anderen Ländern verlässt, v.a. in China. Bei der Einsparung fossiler Brennstoffe gehen verschiedene Länder unterschiedliche Wege. Frankreich setzt v.a. auf Atomkraft, Norwegen auf Wasserkraft,

²⁰⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822000209#sec4>

²⁰⁷ <https://energyeducation.se/massive-toxic-wastes-from-wind-power-plants/>

²⁰⁸ <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home.html>

²⁰⁹ Reduktion kühlender Effekte durch Erniedrigung der Aerosolkonzentration: https://dl.booksee.org/foreignfiction/609000/57a1c66b48361ee32a54f91542104360.pdf/_as/%255BGr%25C3%259FI_Hartmut%255D_Klimawandel%28BookSee.org%29.pdf; <https://www.nature.com/articles/s43247-026-03457-4>; Reduktion des Erd-Albedo und Varianz der Bestrahlungsstärke durch die Sonne: <https://www.mdpi.com/2673-7418/4/3/17>; Varianz der Sonnenaktivität, der kosmischen Strahlung und Wolkenbildung: [https://ftp.space.dtu.dk/pub/Henrik/FB/Marsh2000\(Climate\).pdf](https://ftp.space.dtu.dk/pub/Henrik/FB/Marsh2000(Climate).pdf); Varianz in Sonnenaktivität und Sonnen- u. Erdmagnetfeldern: <https://www.nature.com/articles/ngeo2225>; Brände: <https://ctif.org/de/news/was-ist-der-natuerliche-klimawandel-im-gegensatz-zum-vom-menschen-verursachten-klimawandel>; bestimmte Wälder auf der Nordhalbkugel: <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2026/03/nicht-jeder-wald-kuehlt-die-erde.html>; Unbeabsichtigter Aufheizeffekt durch Windkraftanlagen: https://www.researchgate.net/publication/258686379_Impacts_of_wind_farms_on_land_surface_temperature; Grundschieppnetz-Fischerei: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2026.108135>

²¹⁰ <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/>

Länder wie Dänemark und Deutschland auf Windkraft (plus Photovoltaik), noch andere Länder wie China oder die USA auf eine Mischung verschiedener Energieerzeugungsmethoden. Die meisten Länder werden aber wohl bis auf weiteres den größten Teil ihrer Energie auf Basis fossiler Brennstoffe erzeugen.

Ein verhältnismäßig kleiner Energieverbraucher wie Deutschland (1,8 % des weltweiten Energieverbrauchs, 1,3 % des weltweiten Treibhausgasausstoßes) hat kaum einen nennenswerten Einfluß auf den Weltenergieverbrauch und den globalen Ausstoß sog. Treibhausgase, selbst wenn er seinen eigenen Verbrauch und seine Emissionen in erheblichem Maße verringert. Im Unterschied zu Europa, das 2030 schon 55 % weniger Emissionen als 1990 verursachen will, gab China, der größte Energieverbraucher und Treibhausgasemittent der Welt, bekannt, erst 2030 den Emissionshöchststand erreichen zu wollen.

Die deutsche Politik hat in den letzten Jahrzehnten einen Weg vorgezeichnet, der u.a. auf den großflächigen Ausbau der Windkraft (plus PV) setzt. In puncto installierter Onshore-Leistung pro Landesfläche liegt Deutschland ($0,178 \text{ W/m}^2$) auf Platz 1 vor Dänemark ($0,111 \text{ W/m}^2$) und deutlich vor Großbritannien ($0,063 \text{ W/m}^2$), China ($0,054 \text{ W/m}^2$), den USA ($0,016 \text{ W/m}^2$) und Norwegen ($0,015 \text{ W/m}^2$). Dabei kommt der deutsche Ausbau pro Fläche schon deutlich in die Nähe der theoretisch ermittelten maximal nutzbaren Windenergie von $0,52 \text{ W/m}^2$, was bereits jetzt schon zu einer Abschwächung der mittleren Windenergie in bestimmten Regionen Deutschlands führen dürfte und möglicherweise für die im internationalen Vergleich sehr geringe erzeugte jährliche Strommenge pro GW installierte Nennleistung in Deutschland (und China) mitverantwortlich ist.

Für die Stromerzeugung mittels Windkraft spricht, dass für sie der geringste Wasserverbrauch pro erzeugter Strommenge, die drittgeringste Treibhausgasemission pro erzeugter kWh nach Kernkraft und Wasserkraft und für Onshore-Windkraft die drittniedrigsten Kosten für den Bau von Anlagen hinter denen für Gas- und Photovoltaikkraftwerken angegeben wird. **Als gravierende Nachteile können geltend gemacht werden**, dass:

- mit dem Betrieb von Windkraftanlagen eine signifikante Erwärmung der Atmosphäre einhergeht, die in der Größenordnung des formulierten Klimaziels ($+ 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$) liegt und mindestens kurz- und mittelfristig die Effekte der CO_2 -Einsparungen aufhebt;
- mit dem Betrieb von Windkraftanlagen überwiegend negative ökologische Effekte auf verschiedene Artengruppen publiziert wurden, – Effekte, die das Potential haben, das Artensterben über die alleinigen Folgen der Klimaerwärmung hinaus zu beschleunigen;
- durch den Betrieb von leistungsfähigen Windkraftanlagen gesundheitliche Folgen für die Bevölkerung auch bei eingehaltenen Mindestabständen wahrscheinlich, jedenfalls aber nicht ausgeschlossen sind.
- mit Windkraft ein Flächenverbrauch einhergeht, der deutlich höher als bei Kernkraft- und auch Gaskraftwerken liegt und Sekundärnutzungen zwischen den Fundamenten einzelner Windräder u.U. einschränkt;
- mit der Konzentration auf wetterabhängige Energieerzeugung wie es Windkraft nun einmal ist, die Schwankungen in der Stromproduktion erheblich sind und damit die Ansprüche an die Stromnetze deutlich gestiegen sind, mit Konsequenzen wie Instabilitäten, hohem Managementaufwand und der Notwendigkeit, sehr kosten- und zeitintensiv²¹¹ die Stromnetze auszubauen und gerade im Falle von Erdkabeln auch teuer zu unterhalten;

²¹¹ https://t3n.de/news/stromnetz-batteriespeicher-betrieb-1731162/?utm_source=firefox-newtab-de-de

- im Sinne einer Versorgungssicherheit zu jeder Zeit auch weit entfernte Produktionsorte (s. „Desertec“) für „erneuerbare“ Energien über Stromnetze angebunden werden müssten, unter Inkaufnahme von nicht unerheblichen Übertragungsverlusten;
- mit der Konzentration auf wetterabhängige Energieerzeugung parallel für eine Basisstromversorgung (auch für den Windkraft-Ruhestrom insbesondere bei Dunkelflauten) zu sorgen ist, die – Stand heute – zumindest teilweise über Batteriespeicher und Gasspeicherung mit sehr mäßigen Wirkungsgraden erfolgen soll und deren Fähigkeit, längere Ausfallzeiten überbrücken zu können, noch gezeigt werden muss;
- bei Hellbrisen²¹², das Land mit Strom überversorgt ist und Teile der Windparks²¹³, – wie jetzt schon oft –, abgeschaltet werden müssen, was zu wirtschaftlichen Kannibalisierungseffekten führen dürfte, d.h. der immer größeren Minderung des Ertrags einzelner bestehender Kraftwerke, je mehr neue Anlagen hinzukommen;
- auch Windkraft eine endliche Ressource ist, die nach Berechnungen zumindest in Deutschland schon teilweise ausgeschöpft sein könnte. Dies dürfte mindestens zum Teil mit dem Wind-abschwächenden Effekt bestehender Windkraftanlagen zu tun haben. Dies würde auch eine Erklärung für den Befund bieten, dass deutsche Windkraftwerke im internationalen Vergleich pro installierte GW Leistung relativ geringe Stromerträge liefern.

Fazit: Der umfassende Ausbau der Windenergie in Deutschland geschieht, ohne dass wesentliche Fragen und Risiken geklärt sind. Es kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden, dass sich insbesondere Deutschland als Vorreiter der Windkraft auf einem fatalen Irrweg befindet.

²¹² Unter Hellbrisen versteht man Zeiten, in denen sowohl die Sonne scheint, als auch kräftiger Wind bläst und somit die Stromerzeugung maximal ist. Dunkelflauten sind das genaue Gegenteil: weder durch Photovoltaik noch durch Windkraftanlagen wird nennenswert Strom produziert, wobei letztere auch noch einen Ruhestromverbrauch haben, der auf andere Weise aufgebracht werden muss.

²¹³ Es sind v.a. Windkraftanlagen, die heruntergefahren werden müssen, weil viele PV-Anlagen nicht abgeschaltet werden können. Die Abschaltung von Stromerzeugern oder die Abführung von Stromüberschüssen in Hellbrisenzeiten ist wichtig, weil es u.U. sonst im Netz zu Überspannungen und Schäden kommen kann. Alternative ist, den Strom – mit Verlusten – zu speichern. Dies müsste dann aber nicht nur für Stunden, sondern für viele Tage machbar sein und würde Batterie- oder Pumpspeicher brauchen, die Deutschland nicht im entferntesten besitzt.

Anhang 1.1.: Energieverbrauch und Wirtschaftsleistung

	Ew-Zahl ³	Primärenergieverbrauch			Strom	BIP	Wachstum [% BIP] ⁷	
		2024 ¹ [TeraWh]	Veränderung 2014/24 [%]	2024 ¹ Pro-Kopf [kWh]	2024 ⁴ [TeraWh]	2024 ⁶ [Bill. \$]	2023	2024
Welt	8162,0	176737	+18	21654	26868	111,1 ⁸	4,43 ⁸	3,90 ⁸
China	1419,3	48987	+ 41	34514	8990	18,75	5,41	4,98
USA	345,4	26529	+ 2	76800	4145	29,30	2,89	2,80
Indien	1450,9	11336	+ 48	7813	1532	3,91	9,19	6,48
Russland	144,8	9049	+ 12	62485	1024	2,17	4,08	4,34
Japan	122,5	4795	-12	38745	913	4,02	1,48	0,08
Brasilien	212,0	3919	+ 10	18486	645	2,18	3,24	3,40
Indonesien	283,5	2985	+ 61	10529	328	1,4	5,05	5,03
Iran	91,6	3590	+ 29	39204	350	0,42	5,04	3,04
Kanada	39,7	3886	+ 39	97785	564	2,24	1,53	1,53
Südkorea	51,6	3616	+ 11	69922	558	1,88	1,36	2,03
Saudi-Arabien	34,0	3290	+ 12	96883	363	1,24	0,54	1,81
Deutschland	83,5	3195	-14	37793	464	4,68	- 0,27	- 0,24
Frankreich	66,6	2520	-10	37866	410	3,16	0,94	1,17
Türkei	87,4	2093	+ 44	23928	305	1,36	5,11	3,18
Großbritannien	69,2	1937	-14	28016	280	3,64	0,40	1,10
Vietnam	101,0	1476	+ 100	14618	257	0,46	5,07	7,09
Qatar	3,1	654	+ 26	214520	55	0,22	1,19	2,77
Portugal	10,3	270	-8	25922	51	0,31	2,61	1,93
Norwegen	5,6	556	+ 3	99634	130	0,48	0,07	2,10
Dänemark	6,0	196	-4	32832	36	0,42	2,50	3,68

¹ <https://ourworldindata.org/energy>

² <https://ourworldindata.org/search?topics=Energy>

³ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/bevoelkerung-arbeit-soziales/bevoelkerung/Weltbevoelkerung.html>, <https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/>

⁴ <https://energiestatistik.enerdata.net/strom/strom-heimisches-verbrauch-data.html>

⁶ Worldometers: <https://www.worldometers.info/de/bip/bip-pro-land/?source=imf®ion=worldwide&year=2024&metric=nominal>

⁷ Wirtschaftswachstum: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Wirtschaftswachstum

1.2. Primärenergieverbrauch, Stromverbrauch und -erzeugung¹

	Energieverbrauch		Stromverbrauch		Strom/ Energie		Stromerzeugung 2023 [%]				
	2014 [TeraWh]	2024 [TeraWh]	2014 [TeraWh]	2024 [TeraWh]	2014	2024	Fossil	Solar	Wind	Hydro	Nukl
Welt	172124	176737	20979	26868	12,2	15,2	60,1	5,6	8,0	14,4	9,2
China	34729	48987	5059	8990	14,6	18,4	64,2	6,3	9,6	13,3	4,7
USA	25996	26529	2895	4145	11,1	15,6	58,9	5,6	9,9	5,6	18,2
Indien	7653	11336	1034	1532	13,5	13,5	75,5	6,6	5,1	8,2	2,7
Russland	8058	9049	877	1024	10,9	11,3	61,8	0,2	0,7	17,6	19,3
Japan	5432	4795	965	913	17,8	19,0	65,8	10,3	1,1	7,1	8,9
Brasilien	3576	3919	516	645	14,4	16,5	8,9	6,9	13,5	60,2	2,1
Indonesien	1857	2985	213	328	11,5	11,0	82,0	0,2	0,1	6,4	–
Iran	2787	3590	236	350	8,5	9,7	94,6	0,2	0,2	3,4	1,6
Kanada	4009	3886	522	564	13,0	14,5	18,9	1,4	6,0	58,6	13,7
Südkorea	3269	3616	502	558	15,4	15,4	61,5	5,3	0,6	0,4	30,3
Saudi-Arabien	2932	3290	301	363	10,3	11,0	99,3	0,3	0,4	3,9	–
Deutschland	3710	3195	528	464	14,2	14,5	49,0	11,1	25,9	3,2	1,3
Frankreich	2798	2520	443	410	15,8	16,3	7,9	4,5	10,4	10,8	63,9
Türkei	1454	2093	217	305	14,9	14,6	57,1	6,7	10,9	19,9	–
Großbritannien	2256	1937	309	280	13,7	14,5	36,2	4,9	30,7	1,7	13,8
Vietnam	724	1476	144	257	19,9	17,4	50,6	9,7	4,2	34,3	–
Qatar	517	654	36	55	7,0	8,4	99,7	–	–	–	–
Portugal	292	270	47	51	16,1	18,9	25,7	12,6	29,0	24,7	–
Norwegen	542	556	120	130	22,1	23,4	1,2	0,2	9,2	89,1	–
Dänemark	204	196	32	36	15,7	18,4	11,3	9,9	57,6	0,1	–

¹ Stromerzeugung 2023. Rest: Biomasse/Müll. <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/>

Anhang 1.3.: Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen

	Energie		CO ₂ ⁹		GHG-Emission ¹⁰	Carbon intensity	Energy intensity
	2024 ¹ [TeraWh]	Veränderung 2014/24 [%]	CO ₂ -Emission 2024	CO ₂ -Emission Differenz zu 2014	[MtCO ₂ eq/ Jahr] (2024)	CO ₂ /E [kg CO ₂ / kWh] (2024)	E/BIP [kWh/ \$] (2022)
Welt	176737	+18	34599	+10,5 %	53206.401	0,20	1,30
China	48987	+ 41	11950	+ 29 %	15536.122	0,25	1,65
USA	26529	+ 2	4416	- 13 %	5.912.618	0,18	1,36
Indien	11336	+ 48	3219	+ 49 %	4.371.169	0,28	0,96
Russland	9049	+ 12	1659	+ 9 %	2.575.655	0,20	2,31
Japan	4795	-12	891	- 24 %	1.063.336	0,20	1,05
Brasilien	3919	+ 10	436	- 13 %	1.299.180	0,12	1,17
Indonesien	2985	+ 61	873	+ 88 %	1.323.778	0,27	0,79
Iran	3590	+ 29	736	+ 31 %	1.054.765	0,22	2,22
Kanada	3886	+ 39	521	- 5 %	768.059	0,14	2,25
Südkorea	3616	+ 11	527	- 9 %	668.245	0,16	1,69
Saudi-Arabien	3290	+ 12	626	+ 14 %	838.877	0,21	1,73
Deutschland	3195	-14	531	- 26 %	674.358	0,18	0,88
Frankreich	2520	-10	249	- 15 %	378.120	0,10	0,86
Türkei	2093	+ 44	388	+ 26 %	579.507	0,25	0,83
Großbritannien	1937	-14	280	- 32 %	386.696	0,16	0,77
Vietnam	1476	+ 100	388	+ 181 %	584.258	0,25	1,55
Qatar	654	+ 26	97	+ 26 %	162.745	0,19	1,48
Portugal	270	-8	32	- 27 %	53.170	0,13	0,89
Norwegen	556	+ 3	33	- 15 %	53.760	0,07	1,11
Dänemark	196	-4	22	- 33 %	38.265	0,14	0,65

¹ <https://ourworldindata.org/energy>

² <https://ourworldindata.org/search?topics=Energy>

³ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/bevoelkerung-arbeit-soziales/bevoelkerung/Weltbevoelkerung.html>, <https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/>

⁹ <https://energiestatistik.enerdata.net/co2/emissionen-co2-daten-von-brennstoff-verbrennung.html>

¹⁰ Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M. et al., *GHG emissions of all world countries - 2025 Report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/9816914_JRC143227. [MtCO₂= Million Tonnes of carbon dioxide]

Anhang 1.4.: Verteilung wichtiger Ressourcen weltweit

Erdöl Produzenten 2025 ²

Land	Anteil Welt-Förderung [%]
USA	20
Saudi-Arabien	11
Russland	11
Kanada	6
China	5
Irak	5
VAEmirate	4
Brasilien	3
Iran	3

Erdgas Produzenten 2024 ³

Land	Anteil Welt-Förderung [%]
USA	25
Russland	16
Iran	6
China	5
Katar	4
Kanada	4
Australien	4
Norwegen	3
Saudi-Arabien	3

Erdöl Reserven 2025

Land	Nachgew. Reserven [Mrd. Barrel]
Venezuela	300
Saudi-Arabien	267
Iran	209
Irak	145
Russland	108
Kuwait	101
VAEmirate	98
USA	69
Libyen	48

Stahl Produzenten 2023⁴

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	54
Indien	7
Japan	5
USA	4
Russland	4
Südkorea	3
Deutschland	2

Aluminium Produzenten 2024⁵

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	66
Indien	7
Russland	6
Kanada	5
VAEmirate	4
Bahrain	2
Australien	2

Uran Produzenten 2022⁶

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
Kasachstan	43
Kanada	15
Namibia	11
Australien	9
Usbekistan	7
Russland	5
Niger	4

² <https://www.ig.com/de/trading-strategien/die-weltweit-groessten-oelproduzenten-201030>

³ <https://www.ig.com/de/trading-strategien/die-groessten-erdgasproduzenten-der-welt--260226>

⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlindustrie/Tabellen_und_Grafiken

⁵ <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/aluminum-production-by-country>

⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Uran/Tabellen_und_Grafiken

Silizium Prod. 2023⁷

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	76
Brasilien	7
Norwegen	6
Frankreich	4
Russland	2
USA	1
Kanada	1
Bosnien-H.	1

Germanium Prod. 2021⁸

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	73,9
Kanada	16,2
Russland	2,8
Belgien	2,8
Deutschland	1,7
Japan	1,1
USA	1,1
Ukraine	0,6

Gallium Prod. 2024⁹

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	98,4
Russland	0,8
Japan	0,4
Südkorea	0,4

Indium Prod. 2020¹⁰

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	56,3
Südkorea	21,9
Japan	6,9
Kanada	6,9
Frankreich	4,0
Belgien	2,1
Peru	1,3
Russland	0,5

Lithium Prod. 2024¹¹

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
Australien	37
Chile	20
China	17
Simbabwe	9
Argentinien	7
Brasilien	4
Kanada	2
USA	1

Seltene Erden Prod. 2024¹²

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	69
USA	11
Myanmar	8
Nigeria	3
Thailand	3
Australien	3
Indien	0,7
Russland	0,6

⁷ <https://www.proplanta.de/karten/kritische-rohstoffe-silizium-uebersichtskarte1690384373.html>

⁸ <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Germanium>

⁹ <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/gallium-production-by-country>

¹⁰ <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-indium.pdf>

¹¹ <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-lithium.pdf>

¹² <https://de.qz.com/seltene-erden-nach-Indern>

Kobalt Prod. 2024¹³

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
DR Kongo	75
Russland	3
Kanada	2
Philippinen	2
Australien	1
Kuba	1
Papua NG	1
Madagaskar	1

Raffinerie-Kupfer 2024¹⁴

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	45
Chile	8
DR Kongo	7
Japan	6
Russland	4
USA	3
Südkorea	2
Indien	2

PV Module Prod. 2021¹⁵

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	74,7
Rest Asien	15,4
Indien	2,8
Europa	2,8
USA	2,4
Rest	1,9

Zement Prod. 2023¹⁶

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	48,8
Indien	9,5
Vietnam	2,6
USA	2,1
Türkei	1,8
Iran	1,5
Brasilien	1,5
Indonesien	1,4

Chem.Pharm Industrie 2025¹⁷

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
China	41,8
USA	12,3
Deutschland	4,4
Japan	2,9
Indien	2,9
Schweiz	2,4
Südkorea	2,4
Frankreich	2,3

Helium Prod. 2024¹⁸

Land	Anteil Welt-Produktion [%]
USA	42,6
Qatar	33,2
Russland	9,5
Algerien	5,8
Kanada	3,2
China	1,6
Polen	1,6
Südafrika	< 0,3

¹³ <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cobalt-production-by-country>

¹⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=MIAJDLCqpIE>

¹⁵ <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-by-country-and-region-2021>

¹⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6%C3%9Ften_Zementhersteller#Weltproduktion

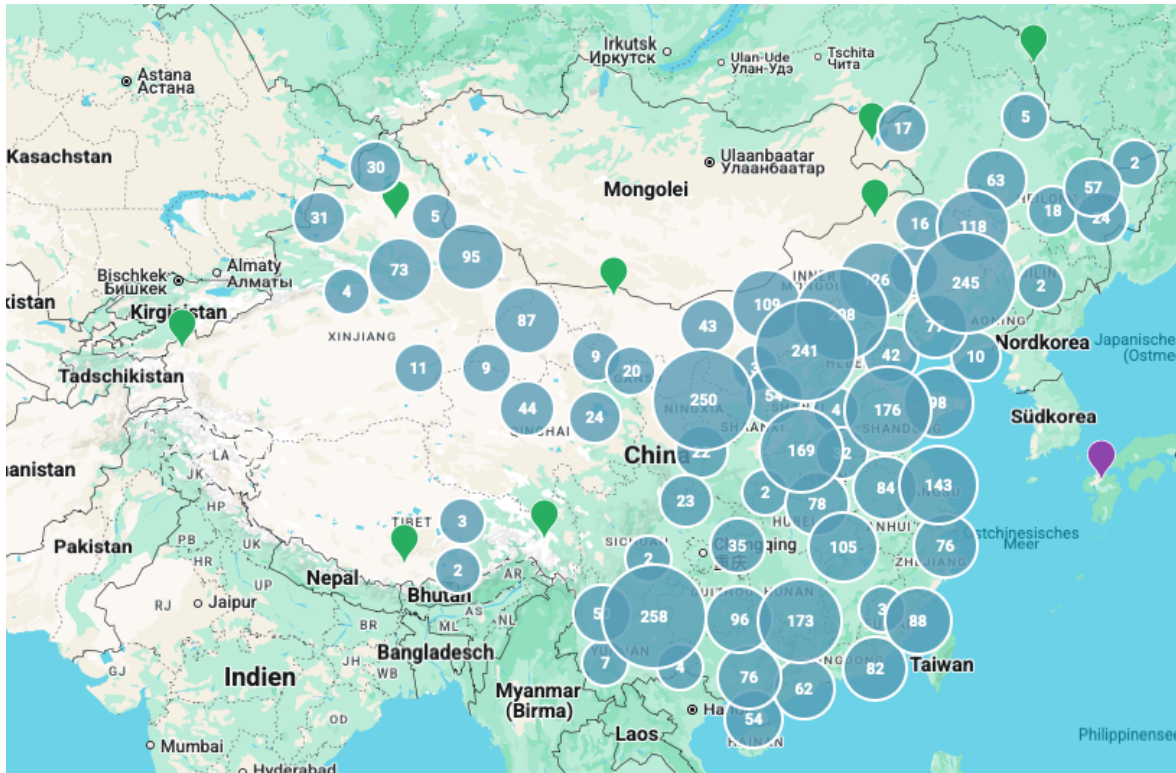
¹⁷ <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/2025-ranking-fuer-2024.pdf>

¹⁸ <https://statranker.org/economy/resources-mining/top-helium-producing-countries-in-the-world-2025-ranking/>

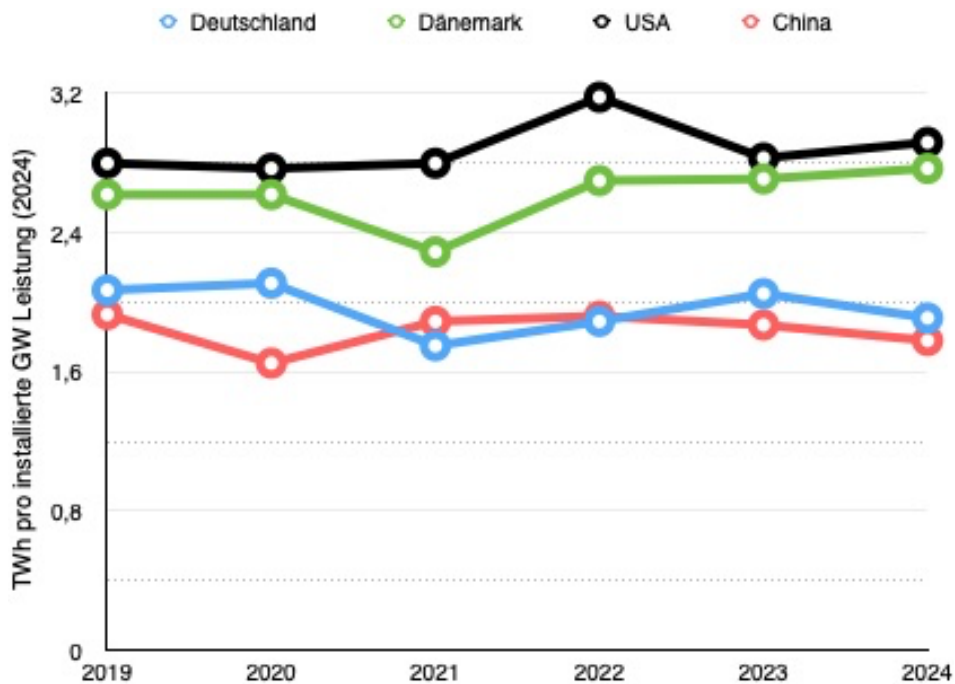
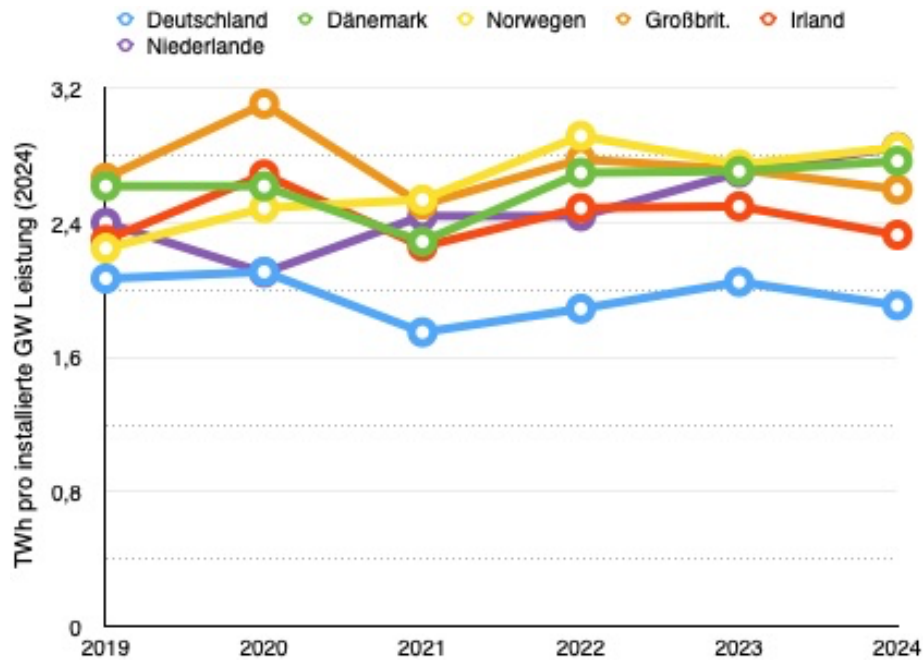
Anhang 2.6.: Karte der Windkraftanlagen in China

China hat seine Windkraftanlagen stark im Nordwesten und Norden konzentriert, v.a. in den Provinzen der Inneren Mongolei, Xinjiang, Hebei, and Gansu.

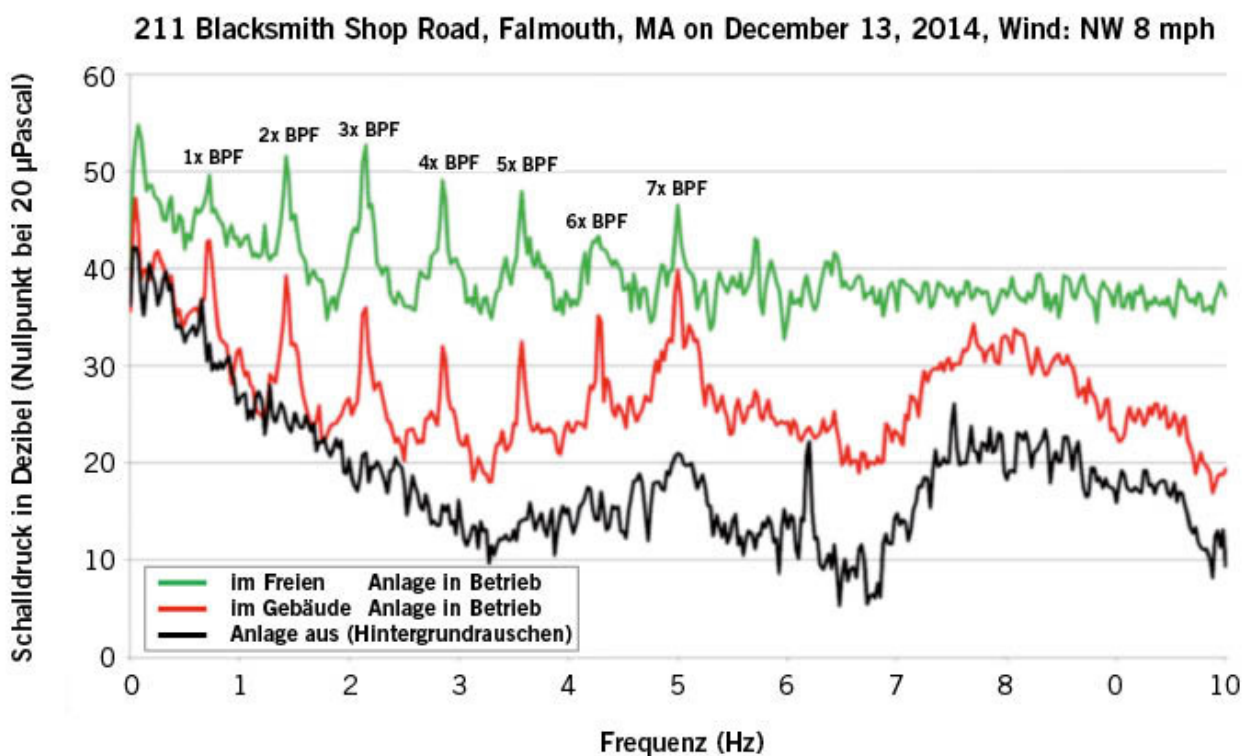
Die folgende Karte findet sich unter: https://www.thewindpower.net/country_maps_en_9_china.php



Anhang 2.7.: Produktivität der gesamten Windkraftanlagen eines Landes im internationalen Vergleich 2019-2024



Anhang 3.4.: Infaskall-Emission zweier kleiner Windkraftanlagen (Vestas 1,65MW)



Frequenz-Muster des Infraschalls aus zwei Windenergieanlagen. **Grüne Linie:** außerhalb des Gebäudes. Erkennbar sind die Grundfrequenz der Rotation bei ca. 0,7 Hz (1x BPF) und sechs Peaks der Oberschwingungen (2x BPF ... 7x BPF). **Rote Linie:** Im Haus ist der Gesamtschalldruck deutlich niedriger, Frequenz und Amplitude der genannten Infraschallpeaks bleiben jedoch unverändert. Der durch den Wind selbst verursachte Schalldruck ist im Gebäude vermindert, nicht aber die von der Anlage emittierten Pulse. **Schwarze Linie:** Hintergrundrauschen bei abgeschalteter Anlage. Windanlagen: Fa. Vestas, 1,65 MW, Entfernung 421 m und 792 m. BPF: blade pass frequency (Häufigkeit der Flügel-Passage am Mast). Quelle: M. Bahtiaran, A. Beaudry, Noise Control Engineering, Billerica, USA 2015 (zitiert nach: <https://www.asu-arbeitsmedizin.com/wissenschaft/wissenschaftliche-grundlagen-fuer-eine-bewertung-gesundheitlicher-risiken-infraschall>)