



---

**Ausarbeitung**

---

**Ressourcenbedarf für den Ausbau der Windenergie an Land**

**Ressourcenbedarf für den Ausbau der Windenergie an Land**

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 070/23  
Abschluss der Arbeit: 31.08.2023  
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft

---

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Methodische Vorbemerkung</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Aktueller Stand und Ausbauziele der Windenergie</b>	<b>6</b>
3.1.	Bestand	6
3.2.	Ziele für den Windenergieausbau an Land	8
3.2.1.	Installierte Leistung	8
3.2.2.	Flächenbedarf	10
3.3.	Parameter der Windenergieplanung	11
3.4.	Projizierte Anzahl an Windkraftanlagen	13
<b>4.</b>	<b>Ressourcenbedarf von Onshore-Windkraftanlagen</b>	<b>16</b>
4.1.	Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken	16
4.2.	Aufbau von Windkraftanlagen	20
4.3.	Ressourcenzusammensetzung	20
4.4.	Ressourcenmengen	22

## 1. Einleitung

Windkraftanlagen (WKA) nehmen eine wichtige Rolle in der Stromerzeugung in Deutschland ein. Im Jahr 2022 hatten Windkraftanlagen einen Anteil von 24,1 % an der Stromerzeugung in Deutschland.<sup>1</sup> Unterschieden wird dabei zwischen Windkraftanlagen an Land und im Wasser (so genannte Onshore- und Offshore-Anlagen).<sup>2</sup> Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)<sup>3</sup> sieht vor, dass die installierte Leistung von Windkraftanlagen an Land von **aktuell 59 GW** (Stand erstes Halbjahr 2023)<sup>4</sup> auf 115 GW in 2030, 157 GW in 2035 und auf **160 GW** im Jahr **2040** steigen soll.<sup>5</sup> Diese Ziele sind in § 4 Nr. 1 EEG 2023 verankert.

WKA bestehen üblicherweise aus einem im Boden verankerten Stahlbeton-Fundament, einem Turm aus Beton – oder Beton und Stahl – sowie der Gondel, in der sich die Elektronik und Elektronik der stromerzeugenden Anlage befinden, sowie drei Rotorblättern.<sup>6</sup> Angesichts der Mengen und Verfügbarkeiten verschiedener **Materialien**, die für den Bau einer Windkraftanlage erforderlich sind, stellt sich die Frage, welche Ressourcenmenge für die Windenergieausbauziele an Land in Deutschland benötigt wird.

Aus offenen Quellen sind **keine Studien** ersichtlich, die diese Frage beantworten. Dies kann mit der begrenzten und möglicherweise irreführenden Aussagekraft solcher Zahlen zusammenhängen: Zu viele Annahmen und Durchschnittswerte mit hohen Abweichungen beeinflussen die Berechnung, so dass eine solche Schätzung in hohem Maße unsicher wäre: Welche Anzahl an WKA ist für die installierte Leistung in den jeweiligen Windregionen möglich und notwendig? Welche Art WKA mit welcher Leistung und mit welchem Materialeinsatz soll genutzt werden? Welcher Stand der Technik gilt (heute und in den zukünftigen Jahren)? Wie viele alte WKA werden ersetzt werden? Etc.

Daher analysiert diese Ausarbeitung – nach einer methodischen Vorbemerkung – einzelne Komponenten und Parameter für eine solche Schätzung. Sie bietet einen Überblick über den derzeitigen Bestand und die Ausbauziele von Windkraftanlagen in Deutschland, die Parameter bei der

---

1 Statistisches Bundesamt (2023), Pressemitteilung Nr. 090 vom 09.03.2023, [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23\\_090\\_43312.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html).

2 Vgl. hierzu etwa Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) (2018), Windenergie Report Deutschland 2018, [https://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD\\_2018.pdf](https://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD_2018.pdf).

3 [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/BJNR106610014.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html).

4 Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 12.

5 Guidehouse (2022), Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030, Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2-%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer, [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=14).

6 Zum Aufbau einer Windkraftanlage vgl. bereits die Kurzinformation: Wissenschaftlichen Dienste (2023), Materialien in Windkraftanlagen, WD 8 - 3000 - 039/23.

---

Abschätzung von Windflächen und der Anzahl von WKA sowie den Bedarf an Rohstoffen für den Bau von WKA an Land. Zu Beginn wird die begrenzte Aussagekraft des Ressourcenbedarfs für die Ausbauziele erläutert.

## 2. Methodische Vorbemerkung

Soweit ersichtlich gibt es **keine Studien**, die die Frage adressieren, welche Ressourcenmenge für den Ausbau der Windenergie an Land **in Deutschland** benötigt wird. Die Ressourcen lassen sich daher nur auf Basis einzelner Komponenten abschätzen, die einbezogen werden müssten:

- Zu den **Zielgrößen** des Windkraftausbaus existieren unterschiedliche Studien und politische Vorgaben, die sich auf vorrangig drei verschiedene Basisgrößen des Ausbaus beziehen:
  - Die für den zukünftigen Strombedarf **benötigte installierte Leistung**,
  - den daraus abgeleiteten **Flächennutzungsbedarf**,
  - und die daraus abgeleitete **Anzahl** der dafür benötigten **WKA**.
- Zur Berechnung der WKA-Anzahl und des Flächenbedarfs sind Modelle nötig, die die **technischen Parameter** einzelner WKA-Anlagen (individuelle Leistungs- und Größendimensionen) sowie Parameter zur **Planung und zum Betrieb** von Windparks einbeziehen, u.a.:
  - Topografie und damit verbundene lokale Windgeschwindigkeiten über das Jahr verteilt (sog. Anteil an Volllaststunden),
  - Anordnung und Abstände zwischen den WKA,
  - Abstände zu anderen Windparks,
  - Abstände zu Ortschaften,
  - Konflikte mit Naturschutzgebieten,
  - etc.
- Es müssen aber nicht nur neu installierte WKA berücksichtigt werden, sondern auch das **Repowering** (Ersetzen alter Anlagen mit neueren und effizienteren WKA) sowie die Stilllegung alter Anlagen.
- Liegen Modelle und Annahmen zu den Ausbauzielgrößen vor, sind die **Ressourcenbedarfe** der WKA hinzuzuziehen. WKA bestehen bezogen auf die Gesamtmasse zu einem großen Teil aus Zement für das Fundament, aber auch aus Kupfer und anderen Edelmetallen. Verbundwerkstoff-Strukturen werden für die Herstellung der Fundamente, Türme und Rotorblätter benötigt. Generell werden die Angaben der benötigten Rohstoffe im Kraftwerksbau oftmals auf eine Mengeneinheit pro erzeugter Energieeinheit gemittelt (z.B. Tonnen/kWh), um die Vergleichbarkeit herzustellen zu anderen Energieerzeugungstechnologien bzw. unterschiedlichen Größenklassen innerhalb einer Energieerzeugungstechnologie.

- 
- Mit dem Bedarf an Ressourcen ist zugleich auch der **Recycling**-Anteil der Anlagen verbunden. Der künftige Mengenbedarf an Rohstoffen zur Errichtung von WKA kann bei einem höher werdenden Recycling-Anteil der Anlagen die Bedarfsmenge an primären Rohstoffen reduzieren.
  - Die letzte Komponente einer Ressourcenbetrachtung umfasst den **technischen Fortschritt** sowie marktliche **Skalierungs- und Substitutionseffekte**, die sich durch Forschung und Entwicklung, Massenproduktion, Markthochläufe und Preisschwankungen auf dem Weltmarkt ergeben. Beispielsweise können sich neue Antriebstechniken in den Windturbinen in reduzierten Mengen verwendeter seltener Metalle oder in der Steigerung des Effizienzgrades bei gleichbleibender Windgeschwindigkeit auswirken. Weiterentwicklungen kommen auch in der Fertigungstechnik und im Recycling zum Tragen. Entwicklungsfortschritte können an sämtlichen Prozessen dieser Ressourcenbetrachtung ansetzen.

Eine Aussage, welche Ressourcenmenge für den Ausbau der Windenergie benötigt wird, basiert daher auf vielen, sehr breit gestreuten Durchschnittswerten und Annahmen. Zudem sind alle Angaben lediglich eine Momentaufnahme. Damit ist ein prognostizierter Ressourcenbedarf ein äußerst fragiles Konstrukt, das mit hoher Unsicherheit behaftet wäre.

Es ist jedoch sinnvoll, die einzelnen Komponenten und ihre Parameter als Stellschrauben zu betrachten. Das erleichtert das Verständnis, wie unterschiedliche Variablen zusammenspielen.

### 3. Aktueller Stand und Ausbauziele der Windenergie

#### 3.1. Bestand

Über den gegenwärtigen Ist-Zustand zur Stromgewinnung aus Windenergie an Land in Deutschland berichtet regelmäßig die Beratungs- und Zertifizierungsgesellschaft „Deutsche WindGuard“. Demnach gibt es zum 30. Juni 2023 ein Gesamtbestand von 28.517 Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland mit einer Gesamtleistung von 59.343 MW (siehe folgende Abbildungen):<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 3.

		Leistung	Anzahl
<b>Entwicklung H1 2023</b>	Brutto-Zubau	1.565 MW	331 WEA
	davon Repowering	396 MW	80 WEA
	Stilllegung	239 MW	198 WEA
	Netto-Zubau	1.325 MW	133 WEA
<b>Kumuliert 30.06.2023</b>	Kumulierter Bestand	59.343 MW	28.517 WEA

Abbildung 1: Status des Windenergieausbaus in Deutschland (Stand 30. Juni 2023)<sup>8</sup>

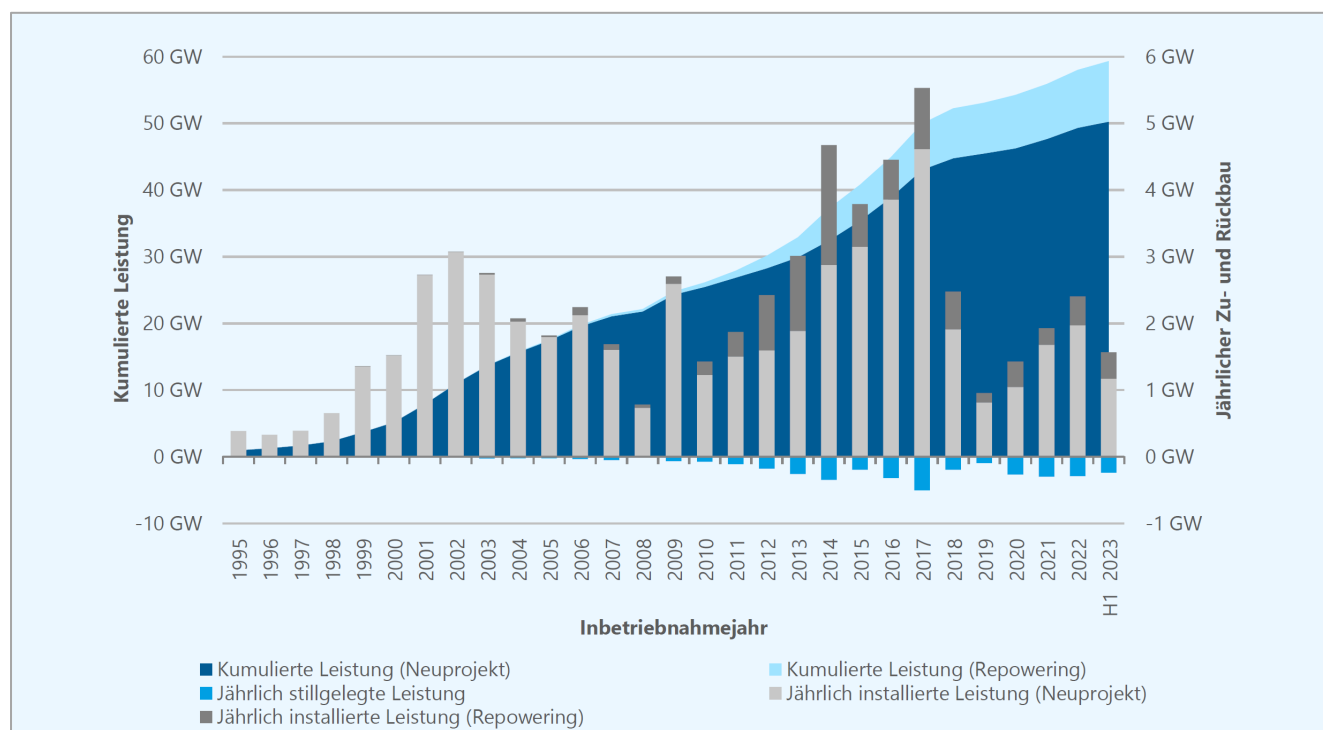


Abbildung 2: Jährliche Entwicklung der Windenergieleistung an Land in Deutschland<sup>9</sup>

8 Ebd.

9 Ebd.

### 3.2. Ziele für den Windenergieausbau an Land

#### 3.2.1. Installierte Leistung

Eine Dokumentation der Wissenschaftlichen Dienste aus dem Jahr 2022<sup>10</sup> erläutert die Entstehung des Zwei-Prozent-Ziels, die Zielleistungswerte installierter Leistung, die Nutzbarkeit der ausgewiesenen Flächen sowie die prozentualen Beitragswerte der einzelnen Bundesländer an ihrer Landesfläche für die Windenergie an Land:<sup>11</sup>

In der Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030,<sup>12</sup> die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erstellt wurde, sollten die notwendigen Flächenbedarfe für den weiteren Ausbau der Windenergie an Land bis 2030 und darüber hinaus quantifiziert werden.<sup>13</sup> Dabei wird davon ausgegangen, dass die installierte Leistung von Windenergieanlagen an Land von **aktuell 59 GW** (Stand ersten Halbjahr 2023)<sup>14</sup> auf 115 GW in 2030, 157 GW in 2035 und auf **160 GW im Jahr 2040** steigen solle.<sup>15</sup>

Diese Ziele sind in § 4 Nr. 1 EEG 2023 übernommen worden, um den Anteil der erneuerbaren Energien an der deutschen Stromversorgung zu erhöhen. In § 4 Nr. 1 EEG heißt es:

#### „§ 4 Ausbaupfad

Die Ziele nach § 1 sollen erreicht werden durch

1. eine Steigerung der installierten Leistung von Windenergieanlagen an Land auf
  - a) 69 Gigawatt im Jahr 2024,

---

10 Wissenschaftliche Dienste (2022), Zur benötigten Anlagenzahl für den Ausbau der Windenergie an Land, WD 8 - 3000 - 062/22 und WD 5 - 3000 - 101/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/920010/1b3b64814f254ca223d8a9eb85b7ea24/WD-8-062-22-WD-5-101-22-pdf-data.pdf>, Kapitel 3.2.

11 Die folgenden Textstellen wurden in Teilen aus der genannten Arbeit entnommen und aktualisiert.

12 Guidehouse (2022), Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030, Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2-%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer, [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=14).

13 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#flaeche>.

14 Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 12.

15 Guidehouse (2022), Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030, Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2-%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer, [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flaechenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=14).



- b) 84 Gigawatt im Jahr 2026,
- c) 99 Gigawatt im Jahr 2028,
- d) 115 Gigawatt im Jahr 2030,
- e) 157 Gigawatt im Jahr 2035 und
- f) 160 Gigawatt im Jahr 2040

sowie den Erhalt dieser installierten Leistung nach dem Jahr 2040 [...]“

Die Deutsche WindGuard hat in einer Analyse unter Berücksichtigung bestehender Ausschreibungsvolumina berechnet, welche jährliche Zubaumenge angestrebt wird, um die Ausbauziele zu erreichen. Um das Ziel für das Jahr 2024 (69 GW) zu erreichen, sei eine Erhöhung des Gesamtbestandes um 16 % erforderlich.<sup>16</sup>

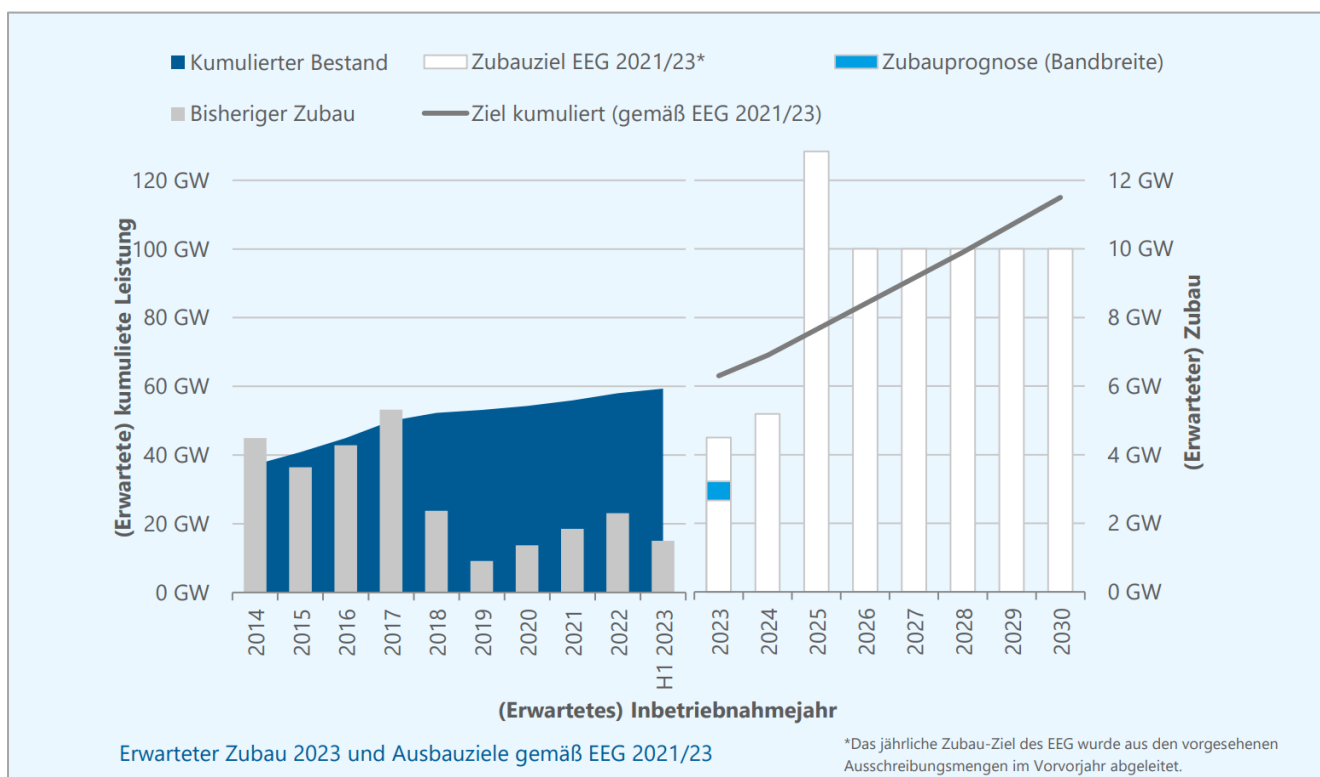


Abbildung 3: Erwarteter Zubau 2023 und Ausbauziele gemäß EEG 2021/23<sup>17</sup>

16 Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 12.

17 Ebd.

### 3.2.2. Flächenbedarf

Mit dem Windenergieflächenbedarfsgesetz<sup>18</sup> wird das Vorhaben der Bundesregierung umgesetzt, 2 % der Bundesfläche für Windenergieanlagen vorzusehen. Das Gesetz legt „Flächenbeitragswerte“ der Länder fest, welche die Flächen dann selbst ausweisen können. Ziel des Gesetzes ist es, bis zum Ende des Jahres 2027 1,4 % und bis Ende 2032 2 % der Bundesfläche für Windkraftanlagen auszuweisen. Diese Werte leiten sich aus den Ausbauzielen des EEG ab und stellen den energiewirtschaftlichen Flächenbedarf dar.<sup>19</sup> Allerdings wird angezweifelt, ob das Zeit-Mengen-Gerüst für die Bundesländer mit den Windenergie-Ausbauzielen des Bundes konform ist.<sup>20</sup>

Die Autoren einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamts haben 2019 eine „Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land“ vorgelegt. Darin wird überprüft, welche Landflächen für WKA nutzbar sind und künftig nutzbar sein könnten. Berücksichtigt wurden dabei unter anderem Einflussfaktoren, wie regulatorische Vorgaben, die Größe von Anlagen, das Vorhandensein von Bestandsanlagen sowie der Netzausbau.<sup>21</sup>

Eine Simulation des Fraunhofer IEE und des Umweltplanungsbüros Bosch & Partner im Auftrag des Bundesverbandes WindEnergie BWE e.V. ergibt, dass ausreichend Flächen zur Verfügung stehen, um das Windenergiepotenzial in Deutschland zu nutzen.<sup>22</sup> Auf den 2 % ließen sich Anlagen mit bis zu **200 GW Leistung** installieren. Allerdings variieren die ansetzbaren Durchschnittswerte des Flächenbedarfs in Hektar pro Megawatt zwischen 3 ha/MW bis 5,2 ha/MW.

Eine Untersuchung der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft e.V. stellt fest, dass das Flächenziel nur bedingt als ein sinnvolles Maß für die Bewertung des Potenzials zur Windenergieerzeugung geeignet ist. Die Leistungsdichte von „Windeignungsgebieten“ variiert stark, sodass die installierbare Leistung auf 2 % der Landesfläche nicht eindeutig ermittelbar ist. Die eingesetzten

---

18 <https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/BJNR135310022.html>.

19 <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/ExterneLinks/wind-an-land-gesetz.html>

20 Reutter et al. (2022), Flächenziele für die Windenergie: Wie zielführend ist das neue Wind-an-Land-Gesetz? Wirtschaftsdienst, 102. Jahrgang, 2022, Heft 9, S. 703-708 <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2022/heft/9/beitrag/flaechenziele-fuer-die-windenergie-wie-zielfuehrend-ist-das-neue-wind-an-land-gesetz.html>.

21 Navigant Energy Germany & Fraunhofer IEE-(Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik) (2019), Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land, Umweltbundesamt, 38/2019, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate\\_change\\_38\\_2019\\_flaechenanalyse\\_windenergie\\_an\\_land.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_38_2019_flaechenanalyse_windenergie_an_land.pdf).

22 Fraunhofer-IEE & Bosch & Partner (2022), Flächenpotenziale der Windenergie an Land 2022, Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE), [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220920\\_BWE\\_Flaechenpotentiale\\_Windenergie\\_an\\_Land.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220920_BWE_Flaechenpotentiale_Windenergie_an_Land.pdf).

Durchschnittswerte ergeben jedoch, dass die Fläche für die Erreichung des angestrebten Leistungsziels des Windausbaus an Land ausreichend sei.<sup>23</sup>

### 3.3. Parameter der Windenergieplanung

Die notwendige Anzahl an WKA lässt sich nur mit hoher Unsicherheit abschätzen. Dies liegt daran, dass die erforderlichen Flächenpotenziale, die technischen Anlagen sowie die Planung eines Windparks individuell aufeinander abgestimmt sein müssen. Modellrechnungen bestehen aus einer Vielzahl an Parametern (siehe folgende Abbildung):<sup>24</sup>

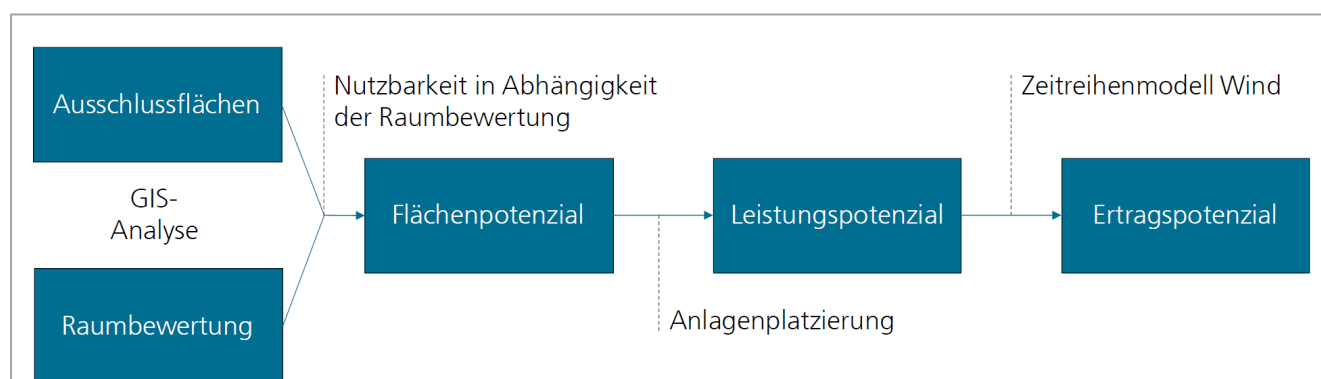


Abbildung 4: Modellierung des Windpotenzials in Deutschland<sup>25</sup>

- **Ausschlusskriterien für ungeeignete Flächen:** Zuerst werden Flächen identifiziert, die aufgrund von harten Tabukriterien und Restriktionen nicht für die Windenergienutzung geeignet sind.
- **Raumbewertung und Nutzungskonflikte:** Die verbleibenden Flächen außerhalb der Ausschlussgebiete werden einer Raumbewertung unterzogen. Dabei werden mögliche Nutzungskonflikte mit der Windenergie abgewogen und bewertet. Diese Bewertung bestimmt den prozentualen Anteil der für Windenergie nutzbaren Flächen.
- **Anwendung des Faktors auf die nicht ausgeschlossenen Flächen:** Der ermittelte prozentuale Anteil wird auf die bewerteten Flächen angewendet, um ein Flächenpotenzial zu ermitteln.

23 Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft e.V. (FfE) (2022), <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2022/02/FfE-Discussion-Paper-2-der-Landesflaeche-fuer-Windenergie-ein-geeignetes-Mass.pdf>, S. 8.

24 Fraunhofer-IEE & Bosch & Partner (2022), Flächenpotenziale der Windenergie an Land 2022, Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE), [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220920\\_BWE\\_Flaechenpotentiale\\_Windenergie\\_an\\_Land.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220920_BWE_Flaechenpotentiale_Windenergie_an_Land.pdf), S. 12.

25 Ebd.

- **Anlagenanzahl und -leistung:** Algorithmen zur Anlagenplatzierung bestimmen unter Berücksichtigung von festgelegten Randbedingungen die Anzahl der auf den Flächen platzierbaren Windenergieanlagen sowie deren Leistung.
- **Ermittlung der installierbaren Leistung:** Unter Einbeziehung von Technologieentwicklung und Standortkriterien wird die auf den Flächen installierbare Leistung berechnet, was zu einem Leistungspotenzial führt.
- **Abschätzung des Energieertrags:** Schließlich wird der potenzielle Energieertrag abgeschätzt, der durch den Ausbau von Windenergieanlagen auf den ermittelten Flächen erzielt werden könnte. Auf Basis von Wetterdaten der vergangenen Jahre werden die durchschnittlichen Vollbenutzungsstunden ermittelt.

Eine Referenzanlage zur Ermittlung der installierbaren Leistung umfasst für eine Modellierung folgende Parameter:<sup>26</sup>

- Nennleistung (MW)
- Rotordurchmesser (m)
- Nabenhöhe (m)
- Spez. Flächenleistung (W/m<sup>2</sup>)
- Abstand Rotorblattspitze zum Grund (m)
- Gesamthöhe (m)

Eine Dokumentation der Wissenschaftlichen Dienste aus dem Jahr 2022 stellt den technischen Fortschritt bei der Anlagennennleistung, der Jahreserträge und der Nabenhöhe dar.<sup>27</sup>

Zusätzlich wird die Flächeneffizienz (und damit die Anzahl an WKA) maßgeblich vom **Abstand zwischen den WKA** innerhalb eines Windparks bestimmt. Sind die WKA zu eng beieinander, bremsen die Windräder den Wind für nachgelagerte Windräder. Sind die Abstände zu weit gewählt, geht Windertragsfläche verloren. Eine Umfrage unter Projektierern ergab Abstände in

---

26 Guidehouse Germany, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) & Stiftung Umweltenergierecht (2023), Flächenverfügbarkeit und Flächenbedarfe für den Ausbau der Windenergie an Land, Abschlussbericht, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/32\\_2023\\_cc\\_flaechenverfuegbarkeit\\_und\\_flaechenbedarfe\\_fuer\\_den\\_ausbau\\_der\\_windenergie\\_an\\_land\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/32_2023_cc_flaechenverfuegbarkeit_und_flaechenbedarfe_fuer_den_ausbau_der_windenergie_an_land_0.pdf), Kap. 2.2.2.

27 Wissenschaftliche Dienste (2022), Zur benötigten Anlagenzahl für den Ausbau der Windenergie an Land, WD 8 - 3000 - 062/22 und WD 5 - 3000 - 101/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/920010/1b3b64814f254ca223d8a9eb85b7ea24/WD-8-062-22-WD-5-101-22-pdf-data.pdf>, Kapitel 2.2.

Hauptwindrichtung von 2,3 bis 5 Rotordurchmessern (RD) und 2,3 bis 3 RD in Nebenwindrichtung.<sup>28</sup>

Weiterhin spielt bei einer Abschätzung zum Bau neuer WKA der Anteil des Repowering älterer Windanlagen eine Rolle. Neu gebaute Anlagen haben eine höhere Durchschnittsleistung gegenüber der durchschnittlich verbauten Leistung der letzten Jahre (bis zu 6 MW gegenüber 4 MW).<sup>29</sup> Im Vergleich zu neuen WKA hat eine stillgelegte durchschnittliche Anlage derzeit eine Leistung von etwa 1,2 MW.<sup>30</sup> Allerdings sind die jeweiligen Windverhältnisse der Standflächen zu berücksichtigen, von denen die optimale Windturbinenleistung und Nabenhöhe abhängig sind.<sup>31</sup>

### 3.4. Projizierte Anzahl an Windkraftanlagen

Es gibt vereinzelt projizierte Zahlen, wie viele WKA es in Deutschland bräuchte, wenn die Leistungszielvorgaben erreicht werden würden. Derzeit gibt es 28.517 Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland mit einer Gesamtleistung von 59.343 MW.<sup>32</sup>

Obwohl sich die derzeitige Installationsleistung vervielfältigen müsste, um die Ausbauziele zu erreichen, würde die Anzahl an gebauten WKA im Vergleich zu heute nicht im selben Maße steigen. Die unterproportional anwachsende Anzahl an WKA ist zurückzuführen auf eine höhere Durchschnittsleistung neuer Anlagen gegenüber der derzeitig verbauten Durchschnittsleistung (6 MW gegenüber 4 MW) und dem Repowering älterer Anlagen.<sup>33</sup>

Aufgrund der vorher beschriebenen Vielzahl an hinzuzuziehenden Parametern gehen die genannten Summen von WKA für die Ausbauziele auseinander.

---

28 Guidehouse Germany, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) & Stiftung Umweltenergierecht (2023), Flächenverfügbarkeit und Flächenbedarfe für den Ausbau der Windenergie an Land, Abschlussbericht, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/32\\_2023\\_cc\\_flaechenverfuegbarkeit\\_und\\_flaechenbedarfe\\_fuer\\_den\\_ausbau\\_der\\_windenergie\\_an\\_land\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/32_2023_cc_flaechenverfuegbarkeit_und_flaechenbedarfe_fuer_den_ausbau_der_windenergie_an_land_0.pdf), S. 43.

29 <https://www.welt.de/wirtschaft/article236363473/Energiewende-Diese-Bundeslaender-sind-Windkraft-Druecker-berger.html>; <https://energiewinde.orsted.de/energiepolitik/wie-viele-windraeder-deutschland-fuer-100-prozent-oekestrom-braucht>.

30 Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 4.

31 Siehe z.B. <https://www.erneuerbareenergien.de/technologie/onshore-wind/grosse-auftraege-fuer-spezialturbinen-bei-vestas-und-nordex>.

32 Deutsche WindGuard (2023), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Erstes Halbjahr 2023, [https://www.windguard.de/files/cto\\_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Halbjahr%202023.pdf](https://www.windguard.de/files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2023/Halbjahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Halbjahr%202023.pdf), S. 3.

33 <https://www.welt.de/wirtschaft/article236363473/Energiewende-Diese-Bundeslaender-sind-Windkraft-Druecker-berger.html>; <https://energiewinde.orsted.de/energiepolitik/wie-viele-windraeder-deutschland-fuer-100-prozent-oekestrom-braucht>.

Das Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende erläutert in einem Kurzbeitrag die rechnerische Flächengröße des Zwei-Prozent-Ziels und die damit verbundene Anzahl an WKA. Demnach müssten **17.500 neue WKA** für 2030 hinzukommen, um 70 Gigawatt zu erzeugen.<sup>34</sup> Diese Rechnung berücksichtigt jedoch nicht das Repowering älterer Anlagen.

Die Untersuchung der Wissenschaftlichen Dienste zu weiteren Studien ergab folgende Übersicht:<sup>35</sup>

In der Kurzanalyse „Wie viele Windräder braucht Deutschland für eine Vollversorgung mit 100 % Erneuerbaren Energien?“ der Interessenorganisation **Energy Watch Group** vom Februar 2022 gehen die Autoren von einem tatsächlichen Windstrombedarf von etwa 250 TWh bei einer installierten Leistung von 92 GW **im Jahr 2030** aus. Der restliche Bedarf werde den Autoren zufolge aus anderen erneuerbaren Energiequellen gespeist. Die Autoren gehen von einem Bedarf von insgesamt **23.903 WKA** aus:

„Bis 2030 wird ein erheblicher Teil der heute aufgebauten Windräder ‚repower‘ werden. Dies bedeutet, dass man wesentlich weniger Windkraftanlagen benötigen wird, um die gleiche heutige Leistung zu erreichen. Geht man davon aus, dass bis 2030 nur die älteren Windkraftanlagen ersetzt werden – diejenigen, bei denen es sich auch wirtschaftlich rentiert – dann werden etwa 15.000 statt der heutigen 30.000 Anlagen die heutige Leistung erbringen. Für den notwendigen Bedarf an neu gebauten und modernisierten Anlagen von 64 GW ergeben sich bei einer durchschnittlichen Leistung von fünf MW pro Anlage 11.140 neue und erneuerte Windkraftanlagen [siehe nachfolgende Tabelle]. In Summe müssten also bei einer vollen Versorgung von ganz Deutschland in allen Energiesektoren (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie) mit 100 % Erneuerbaren Energien bis 2030 etwa 23.903 Windkraftanlagen installiert sein – wesentlich weniger als die heute installierten 30.000. [...]

Auch der Flächenbedarf für die Windkraft hält sich in einem vertretbaren Rahmen. Zwar braucht jedes Windrad der 5-MW-Klasse in einem Windpark deutlich mehr Raum als die früher üblichen kleineren Windkraftanlagen, damit sich die Windkraftanlagen nicht gegenseitig zu viel Wind wegnehmen. Jedoch ist auch der Ertrag dieser modernen Anlagen weitaus höher, sodass jedes MW einer größeren Anlage mit einer kleineren Rotorfläche auskommt. Im Ergebnis ändert sich der durchschnittliche Flächenbedarf nicht eindeutig in die eine oder andere Richtung [...].“<sup>36</sup>

---

34 Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2022), Zum Flächenbedarf der Windenergie, [https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/2022\\_02\\_10\\_KNE-Wortmeldung\\_Zum\\_Flaechenbedarf\\_der\\_Windenergie%E2%80%AF.pdf](https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/2022_02_10_KNE-Wortmeldung_Zum_Flaechenbedarf_der_Windenergie%E2%80%AF.pdf).

35 Die folgenden Textstellen wurden aus der genannten Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2022), Zur benötigten Anlagenzahl für den Ausbau der Windenergie an Land, WD 8 - 3000 - 062/22 und WD 5 - 3000 - 101/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/920010/1b3b64814f254ca223d8a9eb85b7ea24/WD-8-062-22-WD-5-101-22-pdf-data.pdf>, S. 14 ff.

36 Energy Watch Group (2022), Wie viele Windräder braucht Deutschland für eine Vollversorgung mit 100% Erneuerbaren Energien?, <https://www.energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Windkraft-Analyse.pdf>, S. 2.

Die Tabelle der Energy Watch Group gibt Auskunft über die benötigten Anlagen, Flächen und Leistungen von Windenergie an Land im Jahr 2030 für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien:

<b>Benötigte Anlagen 2030 [Anzahl]</b>	<b>23903</b>
<b>davon Altanlagen [Anzahl]</b>	<b>12763</b>
<b>davon Neue + erneuerte Anlagen [Anzahl]</b>	<b>11140</b>
<hr/>	
<b>Benötigte Fläche [km<sup>2</sup>]</b>	<b>6984</b>
<b>Anteil an der Landesfläche Deutschlands</b>	<b>2,0%</b>
<hr/>	
<b>Benötigte installierte Leistung 2030 [GW]</b>	<b>92</b>
<b>davon Altanlagen in 2030 [GW]</b>	<b>28</b>
<b>davon Neue + erneuerte Anlagen [GW]</b>	<b>64</b>
<b>Leistungsdichte 2030 [MW/km<sup>2</sup>]</b>	<b>13</b>
<b>Leistungsdichte Altanlagen [MW/km<sup>2</sup>]</b>	<b>17</b>
<b>Leistungsdichte Neuanlagen [MW/km<sup>2</sup>]</b>	<b>11</b>
<b>Benötigter Windertrag 2030 [TWh]</b>	<b>250</b>

Abbildung 5: Benötigte Anlagen, benötigte Flächen und benötigte Leistung von Windenergie an Land in 2030 für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien<sup>37</sup>

Von den 64 GW neu zu installierenden WKA könnten 28 GW auf bereits genutzten Windenergieflächen gebaut werden, für 36 GW seien neue Flächen notwendig.<sup>38</sup>

Die **Deutsche WindGuard** geht in ihrer Studie „Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land – Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen“ im Oktober 2020 **bis zum Jahr 2030** von rund **12.600 zusätzlichen Anlagen mittlerer Anlagentechnologie** aus.<sup>39</sup>

Der **Bundesverband WindEnergie** benennt im März 2022 seine Vision für **2050** und betont, die Frage, wie viele Anlagen auf Basis des Zwei-Prozent-Flächenziels installiert werden müssten, könne nicht pauschal beantwortet werden, da dies von vielen Faktoren wie Flächengröße oder Flächenzuschnitt abhängt. Rein rechnerisch lasse sich das aber durchaus darstellen. Mit dem Ersatz alter Anlagen auf Bestandsflächen und der Umsetzung des Zwei-Prozent-Flächenziels und unter Berücksichtigung der höheren Nennleistung benötige Deutschland **insgesamt ca. 35.000**

37 Ebd. S. 3.

38 Ebd. S. 1.

39 Deutsche WindGuard (2020), Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land, Bundesverband WindEnergie e.V., <https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf>, S. 39.

**Windenergieanlagen an Land..**<sup>40</sup> Grundlage dieser Annahme ist eine aktualisierte Studie des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, die die Flächenpotentiale der Windenergie an Land ermittelt hat.<sup>41</sup> Die Studie geht davon aus, dass sich auf 2 % der Bundesfläche Anlagen mit einer Leistung von bis zu 200 GW installieren ließen und bei effektiver Nutzung durch einen modernen Anlagenpark ein Jahresertrag von 770 TWh erreicht werden könne. Diese Werte liegen über den Ausbauzielen des EEG 2023.

#### 4. Ressourcenbedarf von Onshore-Windkraftanlagen

Der Ressourcen- und **Energiebedarf** von WKA hängt ebenfalls von unterschiedlichen Faktoren ab: Zum Beispiel von der Größe der WKA, der Leistungsfähigkeit der Turbine, der Generatorarten sowie der Beschaffenheit der Anlagenumgebung.<sup>42</sup> Weitere Unschärfen bei der Berechnung des Rohstoffbedarfs liegen vor allem in der künftigen technologischen Entwicklung der Anlagen selbst sowie dem bestehenden **Recyclinganteil** und der **Recyclbarkeit** der Anlagen.<sup>43</sup>

##### 4.1. Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken

Eine aktuelle umfangreiche Ausarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste analysiert den Ressourcenbedarf zum Bau und teilweise zum laufenden Betrieb verschiedener Stromerzeugungstechnologien.<sup>44</sup> Dabei wird auch die Aussagekraft der Kennzahl „Materialeinsatz pro Energieeinheit“ grundlegend ins Verhältnis gesetzt zu anderen Vergleichsgrößen, wie Kosten der Stromerzeugung bezogen auf die Lebenszykluskosten (**Stromgestehungskosten** bzw. Levelized Costs of Electricity) und die **Baukosten** bezogen auf die Energieerzeugungskapazität (Overnight Costs).<sup>45</sup>

---

40 BWE (2022), Faktencheck: Wie viele Windenergieanlagen braucht das Land?, [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220302\\_Faktencheck\\_Wie\\_viele\\_Anlagen\\_braucht\\_das\\_Land\\_final.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220302_Faktencheck_Wie_viele_Anlagen_braucht_das_Land_final.pdf), S. 5.

41 [https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/2022/flaechenpotenziale\\_windenergie\\_an\\_land.html](https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/2022/flaechenpotenziale_windenergie_an_land.html).

42 Für den Energiebedarf und die Ökobilanz von WKA siehe Sphera Solutions & Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (2023), Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06\\_cc\\_35-2021\\_oekobilanzen\\_windenergie\\_photovoltaik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf).

43 Zum Recycling von WKA siehe Wissenschaftlichen Dienste (2020), Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling und Ökobilanzierung, WD 8 - 3000 - 028/20, <https://www.bundestag.de/resource/blob/706672/83a3afbad-fcc0134c053a14f1be859ab/WD-8-028-20-pdf-data.pdf>; Ökopol, Universität Bremen, Fraunhofer ISI et al. (2017), Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra), [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-21\\_texte\\_68-2017\\_restra\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-21_texte_68-2017_restra_0.pdf), S. 182.

44 Siehe Wissenschaftliche Dienste (2022), Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken, WD 5 - 3000 - 138/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/928968/dbf38fce5ecf9d658119a3c53d912875/WD-5-138-22-pdf-data.pdf>.

45 Die folgenden Textstellen wurden aus der folgenden Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2022), Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken, WD 5 - 3000 - 138/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/928968/dbf38fce5ecf9d658119a3c53d912875/WD-5-138-22-pdf-data.pdf>.



---

Ein weniger weit verbreiteter Ansatz ist der benötigte Ressourcenbedarf pro generiertem kW bzw. MW oder pro möglichem kWh bzw. MWh eines Kraftwerks. Der Materialeinsatz, z.B. von Zement, Aluminium oder Kupfer, wird ins Verhältnis gesetzt zur installierten Erzeugungsleistung oder zur Stromerzeugungsmenge bezogen auf den vollständigen Lebenszyklus.<sup>46</sup>

Der Materialeinsatz spielt sowohl ökonomisch als auch bei der Nachhaltigkeit eine Rolle:

Rohstoffe sind in Zeit steigender Rohstoffpreise und gestörter Lieferketten zum einen ein entscheidender Kostenfaktor.<sup>47</sup> Zum anderen wird die Verfügbarkeit und Sicherung von Rohstoffen zur Energieversorgung immer stärker zum nationalen Sicherheitsaspekt.<sup>48</sup>

Darüber hinaus greifen die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen in die Umwelt ein. Der Ressourcen-/Materialverbrauch der Energieerzeugung ist nach dem UNEP-Bericht<sup>49</sup> eine von fünf Einflussdimensionen für die Umwelt (neben Landverbrauch, Klima, Gesundheit bei Menschen und Gesundheit des umgebenden Ökosystems).

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen, dass der Material-/Ressourceneinsatz (speziell von Zement, Aluminium, Stahl und Kupfer) bei erneuerbaren Energien im Verhältnis zur Energiegewinnung bei den dargestellten konventionellen Kraftwerken tendenziell höher ist; allerdings belasten diese Kraftwerke andere Nachhaltigkeitsdimensionen weniger:

---

46 Für eine grundlegende Erklärung des Unterschieds zwischen Erzeugungsleistung und Stromerzeugung siehe <https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/203666>.

47 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/wirtschaft-der-preisverfall-der-erneuerbaren-ist-vorbei-energie-wende-wird-teurer/28013512.html>.

48 Wissenschaftliche Dienste (2022), Abhängigkeit deutscher Unternehmen von Rohstoffimporten, WD 5 - 3000 - 110/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/922148/cb88309a1d91a8292826377880eab81b/WD-5-110-22-pdf-data.pdf>.

49 United Nations Environment Programme – UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production, Report of the International Resource Panel, E. G. Hertwich, J. Aloisi de Lardereel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purhoy, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), <https://www.resourcepanel.org/file/431/download?token=bWmEw0hl>.

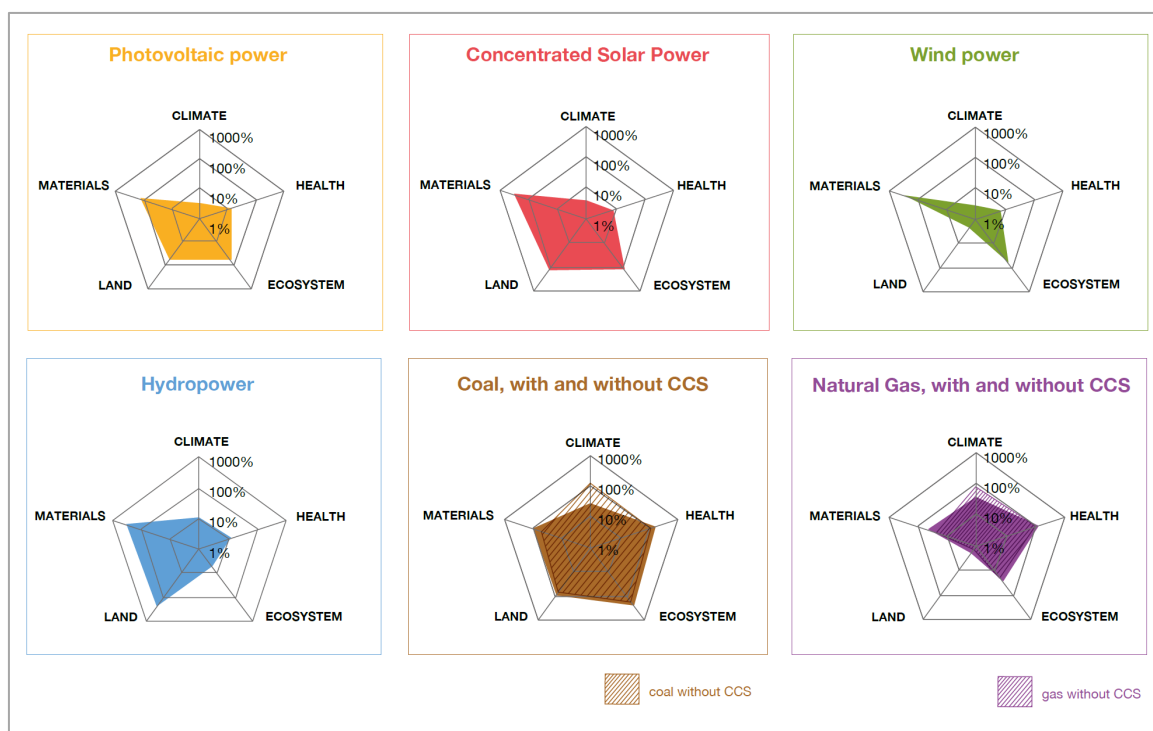


Abbildung 6: Einfluss verschiedener Stromerzeugungstechnologien auf fünf Umweltdimensionen im Vergleich zum durchschnittlichen globalen Energieerzeugungsmix<sup>50</sup>

50 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers, Report of the International Resource Panel, E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), <https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA>, S. 39.

	Climate		Human health		Ecosystem health		Resources	
WIND	Low GHG	(++)	Reduced particulate exposure	(++)	Bird and bat collisions	(+)	High metal consumption	(+)
			Potentially reduced human toxicity	(-)	Low ecotoxicity	(-)	Low water use	(=)
					Low eutrophication	(-)	Low direct land use	(=)
PHOTOVOLTAICS	Low GHG	(=)	Low particulate matter	(+)	Low eutrophication	(+)	High metal use	(+)
			Low human toxicity	(-)	Low ecotoxicity	(+)	High direct land use for ground-based systems	(++)
CONCENTRATED SOLAR POWER	Low GHG	(=)	Low particulate matter	(-)	Concern about heat transfer fluid	(+)	High water use	(++)
			Low human toxicity	(-)	Low eutrophication	(+)	High land use	(++)
					Low ecotoxicity	(+)		
HYDROPOWER	Low fossil GHG	(++)	Low air pollution impacts	(=)	Riparian habitat change (reservoir and downstream)	(++)	High water use due to evaporation	(+)
	High biogenic GHG from some dams	(=)					High land use for reservoirs	(+)
GEOTHERMAL POWER	Low fossil GHG	(+)	Air and water pollution from geofluid flow in some sites	(=)	Aquatic habitat change/pollution	(+)	High water use for cooling	(+)
	Geogenic GHG for some types	(+)						
COAL WITH CCS GAS WITH CCS	Low GHG	(++)	Solvent-related emissions	(=)	High eutrophication	(++)	Increased fossil fuel consumption	(++)
	Substantial fugitive methane emissions	(=)	High particulate matter	(=)	High ecotoxicity	(+)	Limited CO <sub>2</sub> storage volume	(++)
	Concern about CO <sub>2</sub> leakage	(-)	High human toxicity	(++)				
<b>KEY:</b>								
First symbol	(+)	high agreement among studies	(=)	moderate agreement	(-)	low agreement		
Second symbol	(+)	robust evidence (many studies)	(=)	medium evidence	(-)	limited evidence		

Abbildung 7: Überblick der Einflüsse verschiedener Energieerzeugungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsdimensionen Klima, Gesundheit bei Menschen, Gesundheit des umgebenen Ökosystems und Ressourcenbedarf<sup>51</sup>

Anmerkung: Referenz ist der derzeitige, globale Energiemix

Vergleicht man nur den Rohstoffverbrauch über die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien, übergeht man andere wesentliche Einflüsse der Energieerzeugung auf die Umwelt.

51 UNEP (2016), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production – Summary for Policymakers, Report of the International Resource Panel, E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), <https://www.resourcepanel.org/file/240/download?token=BsSOMkGA>, S. 37.

## 4.2. Aufbau von Windkraftanlagen

Eine Kurzinformation der Wissenschaftlichen Dienste erläutert den Aufbau und die Materialzusammensetzung einer durchschnittlichen Anlage.<sup>52</sup>

Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen bestehen aus einem im Boden verankerten **Fundament**, üblicherweise aus Stahlbeton, einem **Turm** aus Beton oder Beton und Stahl, der **Gondel**, in der sich die Elektronik und Elektrik der stromerzeugenden Anlage befinden, sowie drei **Rotorblättern**.

Für Türme von Windkraftanlagen, die höher als 120 Meter sind, wird meist ein Stützskelett aus Stahl für den Beton verwendet. Für niedrigere Türme kommt mitunter nur Beton als Baustoff zum Einsatz.<sup>53</sup> Eine Windkraftanlage ist auf die Boden- und Windverhältnisse hin auszulegen. Einschlägig ist insbesondere die „Richtlinie für Windkraftanlagen“ des Deutschen Instituts für Bautechnik.<sup>54</sup>

## 4.3. Ressourcenzusammensetzung

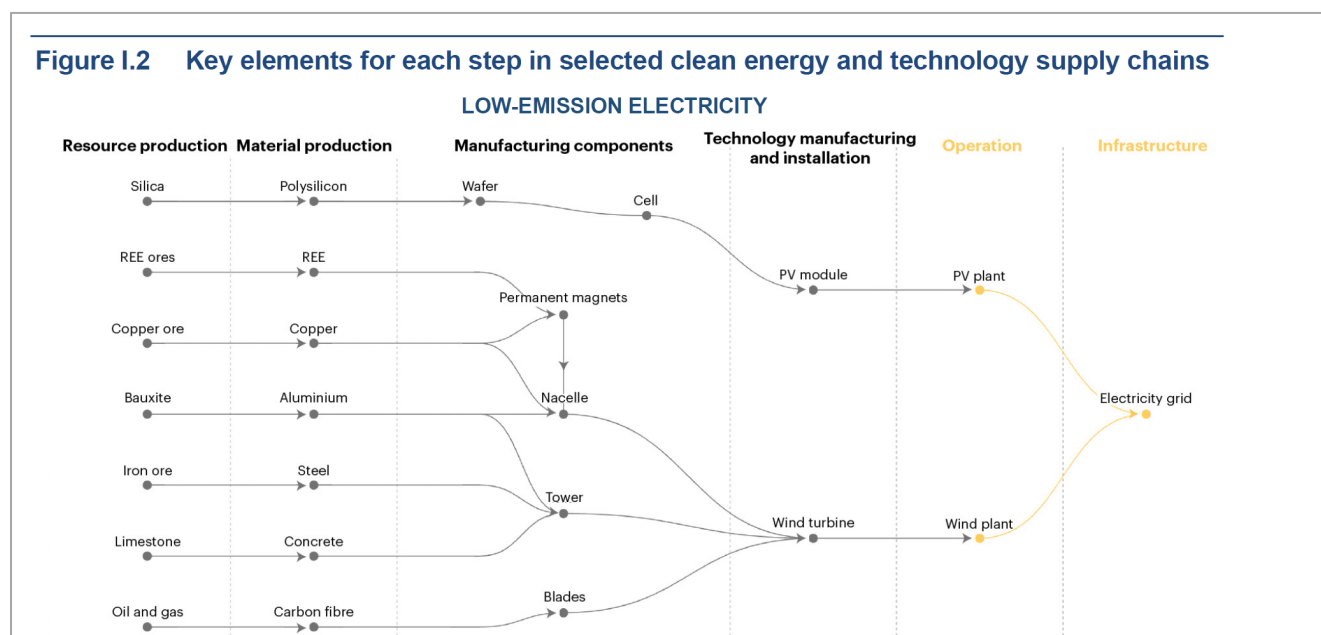
Generell stehen bei der Ressourcenbetrachtung im Kraftwerksbau Materialien im Mittelpunkt, die entweder in großen Mengen benötigt werden (im Fall von WKA sind das Zement, Aluminium, Kupfer) oder nur selten auf der Erde vorkommen (sog. seltene Erden). Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht zu den Schlüsselmaterialien in den einzelnen Produktionsschritten von WKA:

---

52 Die folgenden Textstellen wurden aus der folgenden Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2023), Zu Materialien in Windkraftanlagen, WD 8 - 3000 - 039/23.

53 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-020-00723-3>.

54 [https://www.niedersachsen.de/download/140016/Nds\\_MBl\\_Nr\\_3\\_2019\\_vom\\_24.01.2019\\_AB\\_7.pdf](https://www.niedersachsen.de/download/140016/Nds_MBl_Nr_3_2019_vom_24.01.2019_AB_7.pdf).

Abbildung 8: Schlüsselemente in Lieferketten für PV- und Windkraftanlagen<sup>55</sup>

Über 90 Gewichtsprozent einer WKA bestehen damit aus Beton und verschiedenen Metallen.<sup>56</sup> Die elektrischen und elektronischen Bauteile steuern weitere Metalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium bei. Auch Edelmetalle und Sondermetalle kommen in geringem Umfang vor, etwa Tantal in Kondensatoren oder Neodym in Magneten großer WKA.<sup>57</sup>

Die Rotorblätter bestehen immer aus einem Verbundmaterial, auch Compositmaterial genannt, aus faserverstärktem Kunststoff und weiteren Komponenten. Dabei kann es sich unter anderem um verschiedene Beschichtungen handeln, beispielsweise zum Schutz vor Abrasion bei Hagel. Sie sind damit sehr komplex zusammengesetzte Anlagenteile.<sup>58</sup> Am Gesamtgewicht der Windkraftanlage haben sie aber mit etwa 3 % nur einen geringen Anteil, weshalb auch dann hohe Recyclingquoten erreicht werden können, wenn die Rotorblätter nicht wiederverwertet werden.<sup>59</sup>

55 IEA (2023), Energy Technology Perspectives 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>, S. 31.

56 Die Textstellen wurden aus der folgenden Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2023), Zu Materialien in Windkraftanlagen, WD 8 - 3000 - 039/23.

57 [https://www.niedersachsen.de/download/140016/Nds\\_MBl\\_Nr\\_3\\_2019\\_vom\\_24.01.2019\\_AB\\_7.pdf](https://www.niedersachsen.de/download/140016/Nds_MBl_Nr_3_2019_vom_24.01.2019_AB_7.pdf); <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706232/pdf/materials-10-01285.pdf>.

58 Pehlken et al. 2020, Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, in: K. J. Thomé-Kozmiensky et al. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 10, [https://www.researchgate.net/publication/345763083\\_Rotorblatter\\_aus\\_Windkraftanlagen\\_-\\_Herausforderungen\\_fur\\_das\\_Recycling](https://www.researchgate.net/publication/345763083_Rotorblatter_aus_Windkraftanlagen_-_Herausforderungen_fur_das_Recycling).

59 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-020-00723-3>.

Jedes Rotorblatt besteht aus zwei Halbschalen, die an den Außenkanten miteinander verklebt werden. Die Halbschalen entstehen in weiten Teilen aus einem Geflecht aus Glasfasern oder neuerdings auch Carbonfasern, die in einen duroplastischen oder thermoplastischen Kunststoff, meist Epoxidharz eingebettet werden. Vereinzelt werden statt Epoxidharz auch ungesättigte Polyester-Harze verwendet. Die Herstellung erfolgt zumeist, indem mehrere Faserlagen in eine Form eingelegt werden, die die Geometrie des künftigen Rotorblattes vorgibt. Die Fasern werden sodann mit heißem Harz unter Vakuum verschmolzen.<sup>60</sup>

In bestimmten Bereichen des Rotorblattes werden zudem Kunststoffschäume, beispielsweise aus Polyurethan, oder Balsaholz in den faserverstärkten Kunststoff eingearbeitet, um die erforderlichen mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Steifigkeit zu erreichen. Darüber hinaus werden Holmstege aus faserverstärkten Kunststoffen zur Stabilisierung und Aufnahme von Querkraften verwendet. Neben glasfaser- und carbonfaserverstärkten Kunststoffen nennt die Literatur auch Aramidfasern. Rotorblätter enthalten ferner auch einen Blitzableiter aus Metall.<sup>61</sup>

Rund zwei Drittel des Gewichts der Rotorblätter verursachen die verwendeten faserverstärkten Kunststoffe. Bei einer Rotorblattlänge von 40 Metern wird ihr Gewicht auf etwa 8,4 Tonnen geschätzt.<sup>62</sup>

#### 4.4. Ressourcenmengen

Die Analyse der Wissenschaftlichen Dienste erläutert illustrativ die Materialmenge einer konkreten WKA der Firma Enercon (allerdings stammen die Daten von einer Quelle aus dem Jahr 2006).<sup>63</sup>

Die konstruktiven, materialtechnischen Besonderheiten von WKA variieren je nach Hersteller. Die in einer spezifischen Anlage verbauten Materialien sind im konkreten Einzelfall nicht öffentlich bekannt; der Zugang zu Herstellerinformationen kann zusätzlich durch Insolvenzen erschwert sein.<sup>64</sup>

Folgende Tabelle gibt ein Beispiel für die Zusammensetzung eines Rotorblattes einer 4,5-Megawattanlage des Herstellers Enercon. Sie zeigt den dominierenden Anteil des glasfaserverstärkten Kunststoffs einerseits, andererseits aber auch, dass weitere Materialien nicht näher definierter

---

60 Pehlken et al. 2020, Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, in: K. J. Thomé-Kozmiensky et al. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 10, [https://www.researchgate.net/publication/345763083\\_Rotorblätter\\_aus\\_Windkraftanlagen\\_-\\_Herausforderungen\\_für\\_das\\_Recycling](https://www.researchgate.net/publication/345763083_Rotorblätter_aus_Windkraftanlagen_-_Herausforderungen_für_das_Recycling).

61 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.202100135>; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706232/pdf/materials-10-01285.pdf>.

62 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.202100135>.

63 Die folgenden Textstellen wurden aus der folgenden Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2023), Zu Materialien in Windkraftanlagen, WD 8 - 3000 - 039/23.

64 Pehlken et al. (2020), Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, in: K. J. Thomé-Kozmiensky et al. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 10, [https://www.researchgate.net/publication/345763083\\_Rotorblätter\\_aus\\_Windkraftanlagen\\_-\\_Herausforderungen\\_für\\_das\\_Recycling](https://www.researchgate.net/publication/345763083_Rotorblätter_aus_Windkraftanlagen_-_Herausforderungen_für_das_Recycling).

Zusammensetzung wie Beschichtungen (hier als „Lack“ bezeichnet) verwendet werden. Die Tabelle enthält überdies Angaben zum Energieaufwand für die verwendeten Materialien. Die Berechnung geht auf eine Dissertation aus dem Jahr 2006<sup>65</sup> zurück, die den kumulierten Energieaufwand (KEA) für eine Offshore-WKA bilanziert hat. Gemäß der VDI-Richtlinie 4600 ist der kumulierte Energieaufwand (KEA) definiert als „die Gesamtheit des primär-energetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung (KEAH), Nutzung (KEAN) und Entsorgung (KEAE) eines Produktes oder einer Dienstleistung entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Der kumulierte Energieaufwand für Glasfasern liegt rechnerisch bei 33 Megajoule je Kilogramm. Bezogen auf das gesamte Rotorblatt ist ein Energieaufwand von 267 Gigajoule für den Anteil der Glasfasern ermittelt worden.

Material	Massen kg/Rotorblatt [Tryfonidou]	KEA <sub>H</sub> MJ/kg	Materialspezifischer Energieaufwand GJ/Rotorblatt
Glasfaser	8.128	33	267
Epoxidharz (inkl. Härter)	7.582	138	1.040
Aluminium	122	203	25
Polyamid	282	124	35
Polyethylen	847	71	60
PU-Hartschaum	1.036	125	129
PVC	487	62	30
Lack	684	119	82
Gummi	204	94	19
Sonstige	628	–	–
<b>Gesamter materialspezifischer Energieaufwand</b>			<b>1.690</b>

KEAH: eigene Berechnung, Datengrundlage: ProBas, Fraunhofer ISI, Eco.Invent Database, GaBi [Tryfonidou] 4,5 MW-Anlage (Enercon E-112)

Quelle: Tryfonidou R.: Energetische Analyse eines Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Netzintegration. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Dissertation an der Ruhr Universität Bochum, 2006

Abbildung 9: Zusammensetzung und Energieaufwand bei der Herstellung eines Rotorblattes der Firma Enercon<sup>66</sup>

Eine detaillierte Übersicht hat das UNEP International Resource Panel veröffentlicht, die den Materialbedarf von Onshore- und Offshore-WKA vergleicht:

65 Tryfonidou (2006) in Pehlken et al. (2020).

66 Pehlken et al. (2020), Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, in: K. J. Thomé-Kozmiensky et al. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 10, [https://www.researchgate.net/publication/345763083\\_Rotorblätter\\_aus\\_Windkraftanlagen\\_-Herausforderungen\\_für\\_das\\_Recycling](https://www.researchgate.net/publication/345763083_Rotorblätter_aus_Windkraftanlagen_-Herausforderungen_für_das_Recycling), S. 251.

Component	Subcomponent	Material	Quantity	
			Onshore	Offshore
<b>Rotor</b>	Blades	Glass-reinforced plastics	21 t	53 t
	Hub with nose cone	Cast iron	13 t	35 t
		Low-alloy steel	7.4 t	21 t
		Glass-reinforced plastics	0.50 t	1.4 t
<b>Nacelle</b>	Generator	Aluminium	0.10 t	0.34 t
		Copper	3.1 t	10 t
		Electrical steel	7.0 t	23 t
	Gearbox	Aluminium	0.25 t	0.83 t
		Cast iron	12 t	41 t
		High-alloy steel	12 t	41 t
	Housing	Glass-reinforced plastics	3.1 t	10 t
	Main frame	Cast iron	11 t	35 t
		Low-alloy steel	5.9 t	19 t
	Main shaft	High-alloy steel	8.1 t	27 t
		Low-alloy steel	1.4 t	4.8 t
	Transformer	Aluminium	0.08 t	0.26 t
		Copper	2.4 t	7.8 t
Electrical steel		5.3 t	18 t	
<b>Tower</b>	Tubular steel	Low-alloy steel	200 t	350 t
	Tower internals	Aluminium	2.6 t	2.6 t
		Copper	1.3 t	1.3 t
<b>Foundation (concrete)</b>	Ballast	Gravel	-	5200 t
	Concrete	Concrete	410 m <sup>3</sup>	1300 m <sup>3</sup>
	Reinforcement	Reinforcement steel	35 t	560 t
<b>Foundation (steel)</b>	Steel structure	Low-alloy steel	-	600 t
	Corrosion protection	Aluminium anode	-	5 t

Each onshore unit has a nominal capacity 2.5 MW and each offshore unit 5 MW. Offshore foundations are made of either concrete or steel.

Source: Adapted from Jonkman (2009), Arvesen and Hertwich (2011), and Arvesen et al. (2013).

Abbildung 10: Übersicht zu Materialmengen der WKA-Bauteile<sup>67</sup>

Eine umfangreiche Studienanalyse findet sich in einer weiteren Ausarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste.<sup>68</sup> Auch wenn das Ziel der Ausarbeitung der Vergleich zwischen unterschiedlichen Erzeugungstechnologien Wind, Solar (sowohl Photovoltaikanlagen (PV) als auch Solarkraftwerke), Kohle, Wasserkraft, Kernkraft und Erdgas ist, liegen mehrere Daten für WKA vor (allerdings sei auf die bedingte Vergleichbarkeit der Studien verwiesen).<sup>69</sup>



---

Eine Ausarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste zum generellen Ressourcenbedarf beim Bau und Betrieb verschiedener Stromerzeugungstechnologien wertet auch Studienergebnisse speziell für Windkraft aus:<sup>70</sup>

In einer Studie des Joint Research Centers der EU untersuchen Alves Dias et al. (2020)<sup>71</sup> den Materialbedarf für Windkraftwerke und Photovoltaikanlagen. Die Studie unterscheidet hinsichtlich Windkraftwerken zwischen den gängigen Rohstoffen Zement, Aluminium, Glas/Carbon, Stahl und Aluminium und geht darüber hinaus noch auf weitere Rohstoffe ein. Hinsichtlich der Windkraftwerke nimmt die Studie eine Unterscheidung in Subkategorien von Direktantriebsturbinen und Getriebeantriebsturbinen vor. Die ermittelten Mengenwerte stammen aus verschiedenen Quellen:

---

70 Die folgenden Textstellen wurden aus der folgenden Arbeit entnommen und gegebenenfalls aktualisiert: Wissenschaftliche Dienste (2022), Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken, WD 5 - 3000 - 138/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/928968/dbf38fce5ecf9d658119a3c53d912875/WD-5-138-22-pdf-data.pdf>.

71 Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., & Carrara, S. (2020), Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system (Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, Hrsg.), Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>.

**Table 2.** Material usage estimates in t/GW for different wind turbine types

Material	Range	DD-EESG	DD-PMSG	GB-PMSG	GB-DFIG
Concrete	243 500-413 000	369 000	243 000	413 000	355 000
Steel	107 000-132 000	132 000	119 500	107 000	113 000
Polymers	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600
Glass/carbon composites	7 700-8 400	8 100	8 100	8 400	7 700
Aluminium (Al)	500-1 600	700	500	1 600	1 400
Boron (B)	0-6	0	6	1	0
Chromium (Cr)	470-580	525	525	580	470
Copper (Cu)	950-5 000	5 000	3 000	950	1 400
Dysprosium (Dy)	2-17	6	17	6	2
Iron (cast) (Fe)	18 000-20 800	20 100	20 100	20 800	18 000
Manganese (Mn)	780-800	790	790	800	780
Molybdenum (Mo)	99-119	109	109	119	99
Neodymium (Nd)	12-180	28	180	51	12
Nickel (Ni)	240-440	340	240	440	430
Praseodymium (Pr)	0-35	9	35	4	0
Terbium (Tb)	0-7	1	7	1	0
Zinc (Zn)	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500

Abbildung 11: Materialbedarf für Windturbinen in t/GW<sup>72</sup>

In einer umfangreichen Literaturstudie haben Lyang et al. (2022)<sup>73</sup> Materialverbräuche für den Bau von Windenergie- und Photovoltaikanlagen zusammengetragen. Die Studie untersucht den Materialbedarf in der Vergangenheit und prognostiziert zukünftige Entwicklungen. Hierzu wurden Daten aus 132 Artikeln erhoben, die zwischen 1998 und 2020 veröffentlicht wurden. Insgesamt wurden für die Windenergieerzeugungsanlagen 634 und für Photovoltaikanlagen 602 verschiedene Werte analysiert. Graphisch wurden die verschiedenen Angaben zur besseren Gegenüberstellung in Boxplot-Diagrammen dargestellt.

60 % der Studien differenzieren hinsichtlich On- und Offshore Windenergieerzeugungsanlagen und 20 % unterscheiden nach Antriebsart der Turbine (Direktantrieb oder Getriebeturbine):

72 Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., & Carrara, S. (2020), Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system (Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, Hrsg.), Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>, S. 21.

73 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022) Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112334, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334>, S. 7.

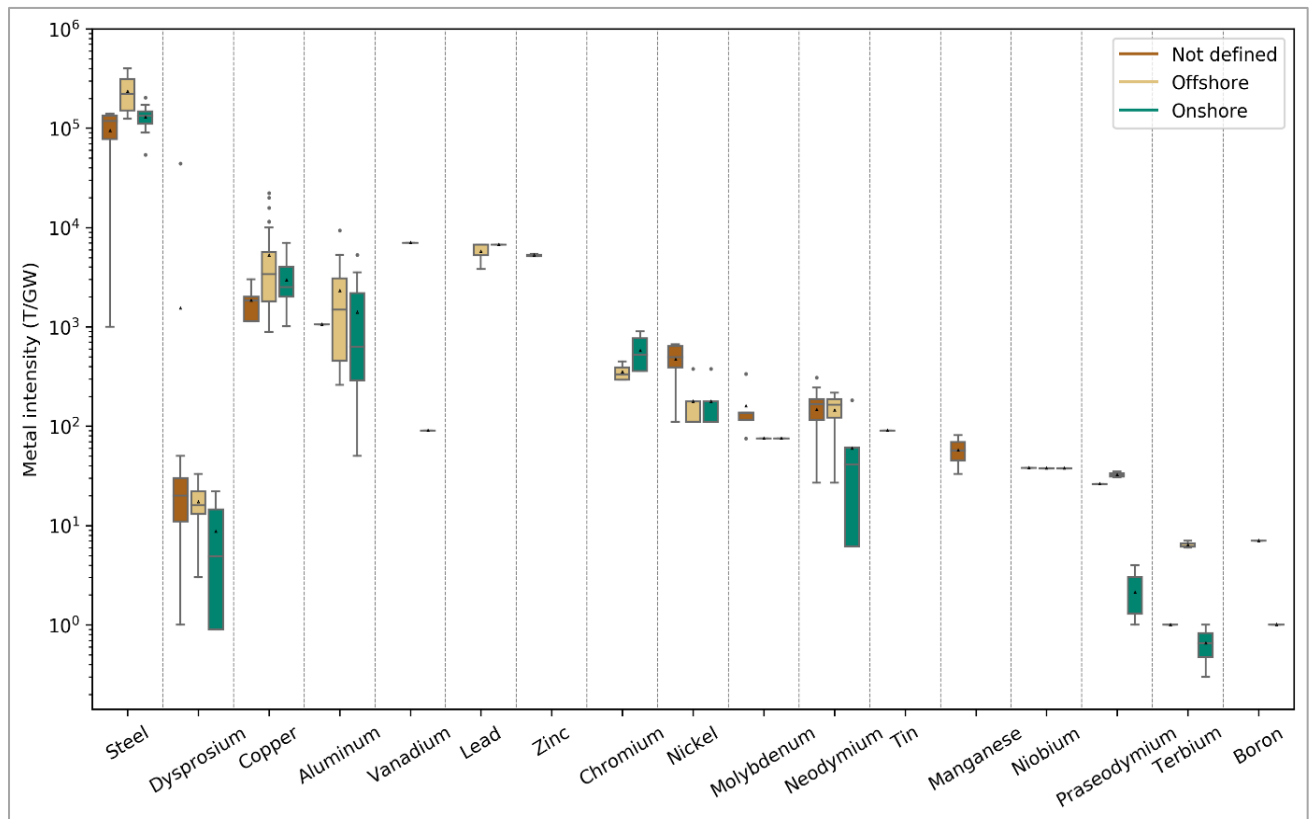


Abbildung 12: Bedarf der Materialmengen bei Windkraftwerken Onshore und Offshore in t/GW<sup>74</sup>

Die Daten zeigen ebenfalls auf, dass die Art des Windturbinengetriebes Einfluss auf die benötigten Metalle und deren Menge hat (siehe folgende Abbildung):

74 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022), Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112334, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334>, S. 7.

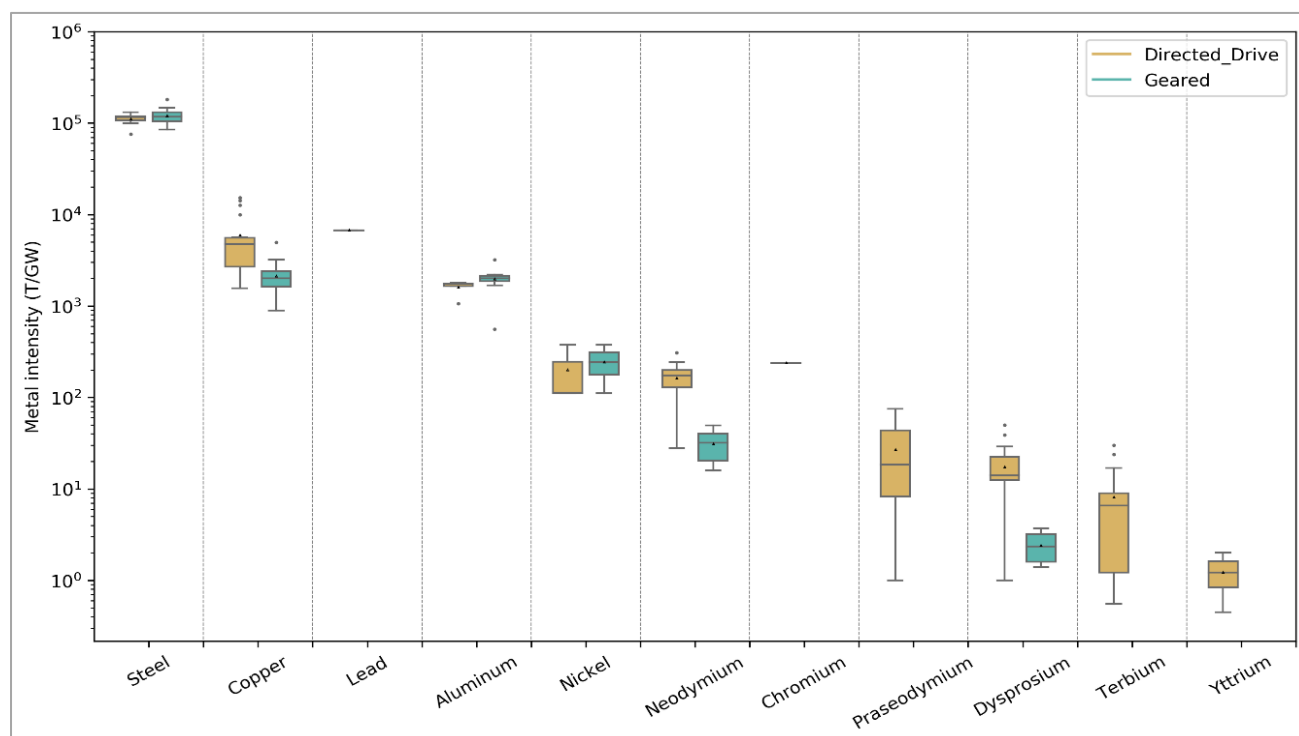


Abbildung 13: Bedarf der Materialmengen bei Windkraftwerken mit Antriebsformen Direct Drive und Geared in t/GW<sup>75</sup>

Die internationale Energieagentur (International Energy Agency IEA) veröffentlichte eine Szenariostudie,<sup>76</sup> um den Ressourcenbedarf und die Versorgungslage mit Rohstoffen für die Energietransition abzuschätzen. In der Studie werden die verschiedenen verwendeten Ressourcen für Energieerzeugungsanlagen dargestellt. Es wird zwischen Offshore- und Onshore-Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Kernreaktoren, Kohlekraftwerken und Erdgaskraftwerken unterschieden. Bei den untersuchten Rohstoffen handelt es sich ausschließlich um Metalle und seltene Erden. Die aktuellen und perspektivischen Materialintensitäten wurden aus Literaturquellen und Expertengesprächen gewonnen (siehe Abbildung 14).

75 Liang, Y., Kleijn, R., Tukker, A., & van der Voet, E. (2022), Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112334, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112334>, S. 7.

76 IEA (2021), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, S. 65.

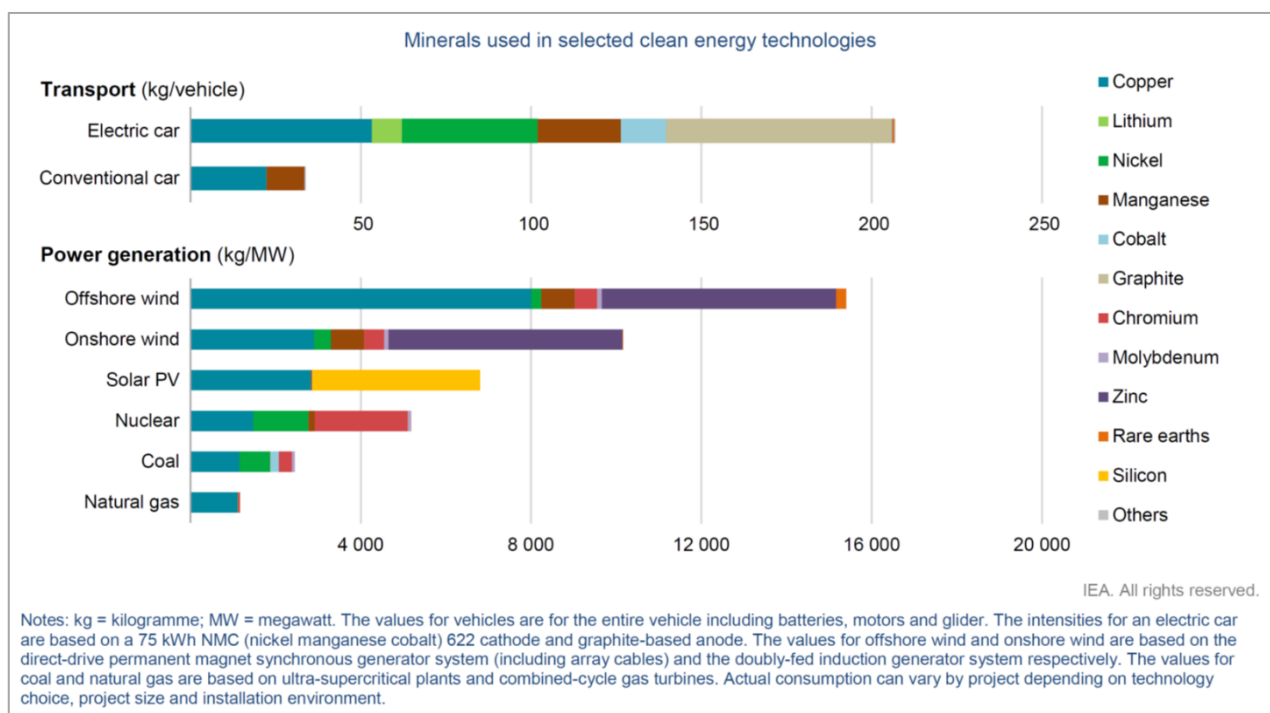


Abbildung 14: Verwendete Mineralien in verschiedenen Energieerzeugungstechnologien<sup>77</sup>

Hinsichtlich des Ressourcenbedarfs für Windenergie- und Photovoltaikanlagen differenzieren die Autoren nach alternativen Antriebs- oder Beschichtungstechnologien. Abhängig vom jeweiligen Typus **verändert sich der Ressourcenbedarf**. Der Ressourcenverbrauch der einzelnen Turbinentypen unterscheidet sich signifikant, wie aus der Darstellung erkennbar (siehe Abbildung):

77 IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, S. 26.

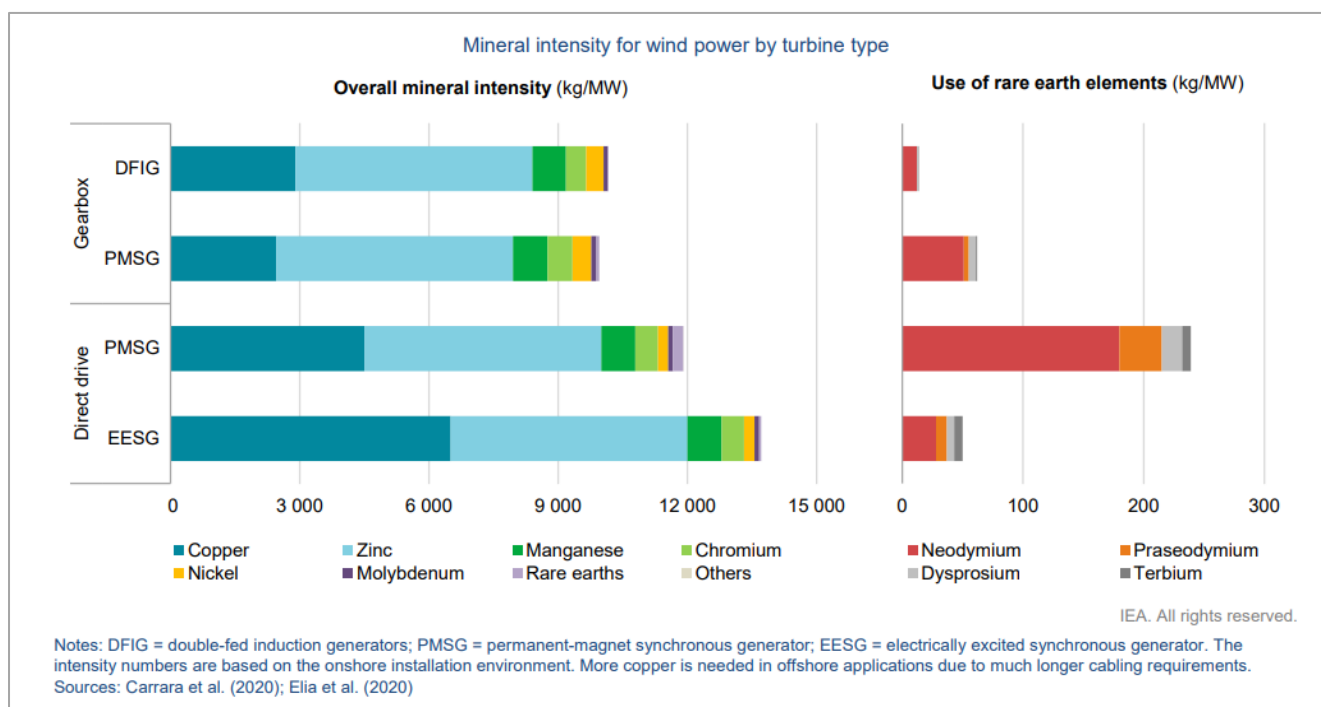


Abbildung 15: Materialbedarf nach Antriebstechnologie bei Windkraftwerken<sup>78</sup>

Die Ausarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste berücksichtigt noch weitere Studien, die andere Materialverbräuche bei der Windkraft betrachten und Arbeiten hinzuziehen, die die Veränderung im Materialverbrauch für Aluminium, Zement, Kupfer und Eisen für die Zeithorizonte 2030 und 2050 projizieren.

Unter Berücksichtigung aller Limitationen und Umrechnungen entsteht eine vereinheitlichte Angabe der verschiedenen Ressourcenbedarfe für unterschiedliche Erzeugungstechnologien. Die Übersicht für WKA ist in folgender Tabelle dargestellt:

78 IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, S. 65.

Energieerzeugungsanlage	Kupfer (t/MW)	Stahl (t/MW)	Glas (t/MW)	Aluminium (t/MW)	Beton (t/MW)	Quelle
Wind	1,15	130	5	3	400	** Vidal et al, 2013
Wind - Direktantrieb	8,9	115,32		1,3		** Lyang et al, 2022
Wind - Direktantrieb	5,5					***, **** IEA, 2021
Wind - Getriebeturbine	2,1	118,99		1,8		** Lyang et al, 2022
Wind - Getriebeturbine	2,59					***, **** IEA, 2021
Wind - Offshore	8,2	257,7		3		** Lyang et al, 2022
Wind - Offshore	8					*** IEA, 2021
Wind - Offshore	2,59	188			550	*** Vidal et al, 2017
Wind - Onshore	3,5	134,6		1,6		** Lyang et al, 2022
Wind - Onshore	2,9					*** IEA, 2021
Wind - Onshore	4,94	128		3,5	450	*** Vidal et al, 2017

Abbildung 16: Ressourcenverbräuche von Windkraftanlagen (Ausschnitt)<sup>79</sup>

## Erläuterungen:

\*\* Sekundärquellen – Daten aus anderen Studien.

\*\*\* Die Daten wurden anhand der graphischen Darstellung in den Diagrammen vom Wissenschaftlichen Dienst geschätzt, da die numerischen Werte in den Studien nicht ersichtlich waren.

\*\*\*\* Bei den Daten handelt es sich um einen berechneten Mittelwert. Hinsichtlich Direktantriebsturbinen ergibt sich dieser aus den Untergruppen PMSG und EESG und hinsichtlich Getriebeturbinen aus den Untergruppen DFIG und PMSG.

Die Werte zeigen, dass sich die Materialmengen in den Studien teilweise deutlich voneinander unterscheiden können.

Methodisch sind die Werte nicht direkt zu vergleichen. Die verschiedenen Studien weichen aufgrund der Erstellungszeitpunkte, der Messmethoden und -orte voneinander ab. Zumal einige Studien bereits Metastudien sind, die wiederum zahlreiche Quellen ausgewertet haben. Ein Vergleich einer Einzelfallstudie mit einer vergleichenden Literaturstudie würde die Ergebnisse verzerren.

\*\*\*

79 Wissenschaftliche Dienste (2022), Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken, WD 5 - 3000 - 138/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/928968/dbf38fce5ecf9d658119a3c53d912875/WD-5-138-22-pdf-data.pdf>, S. 37.