



Rückbau und Recycling

Grundlagen | Vorgaben | Umsetzung

Zur Jahresmitte 2023 umfasste der bundesweite Bestand 28.500 Windenergieanlagen (WEA) mit einer Gesamtleistung von 59 Gigawatt.¹ Knapp 14.000 WEA haben das Alter von 15 Jahren überschritten und etwa 8.200 dieser Anlagen sind bereits älter als 20 Jahre. Nach Jahrzehnten des Ausbaus stellt sich zunehmend die Frage des Anlagensatzes und des Rückbaus. Wann und aus welchen Gründen werden WEA abgebaut, und was passiert mit ihnen? Was ist beim Rückbau zu beachten? Und wie können die Einzelteile recycelt werden? Dieses Kompaktwissen stellt die Grundlagen zusammen und trägt zur Beantwortung dieser und weiterer Fragen bei.

WANN WERDEN WINDENERGIEANLAGEN ABGEBAUT?

Der Rückbau von Windrädern wird zum einen erforderlich, wenn das Ende der technischen Lebensdauer erreicht ist. Dies ist der Fall, wenn sich größere Investitionen in Reparaturen nicht mehr lohnen oder keine Ersatzteile mehr verfügbar sind. Zum anderen endet der Vergütungsanspruch nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz² (EEG) für den in der Anlage erzeugten Strom zwanzig Jahre nach der Inbetriebnahme. Ein Weiterbetrieb ist wirtschaftlich dann sinnvoll, wenn die Erlöse, die über alternative Vermarktungswege für den Strom erzielt werden können, höher sind als die Kosten für Service und Betrieb der

Anlagen. Ist ein Weiterbetrieb nicht mehr rentabel, werden die Windenergieanlagen endgültig stillgelegt und abgebaut. Auch kann es sein, dass ein Standort im Zuge von Repowering für eine neue, leistungsstärkere Anlage genutzt werden kann und die WEA schon vor Erreichen ihres eigentlichen Lebensendes aus der Nutzung genommen wird.

Da etwa die Hälfte der in Deutschland vorhandenen Windräder bereits älter als 15 Jahre ist, steht in den kommenden Jahren die Demontage tausender Altanlagen an.

WELCHE VORGABEN SIND ZU BEACHTEN?

Für den Rückbau der WEA und die Entsorgung der anfallenden Stoffe gelten verschiedene rechtliche Regelungsregime. Vorgaben finden sich jeweils in Bundes- sowie Landesgesetzen. Unterhalb der gesetzlichen Ebene bestehen keine einheitlichen Standards und Anforderungen für die Behörden, die Regelungen sind in den Bundesländern sehr unterschiedlich.³

Da es sich bei Windenergieanlagen um „bauliche Anlagen“ im Sinne des Baurechts handelt, gelten im Außenbereich die Vorgaben des § 35 Abs. 5 Satz 2 Baugesetzbuch⁴ (BauGB). Demnach ist der Betreiber nach der endgültigen Stilllegung einer WEA zu einem geordneten Rückbau und zu einer fachgerechten Entsorgung der Komponenten verpflichtet. Bereits seit 2004 muss der Betreiber zur Deckung der Rückbaukosten bei Genehmigungserteilung eine Verpflichtungserklärung abgeben, die zwingender Bestandteil der Betriebserlaubnis ist.⁵ Die finanzielle Absicherung des Rückbaus erfolgt in der Regel durch die Vorlage einer selbstschuldnerischen Bankbürgschaft. Bei Anlagen, die im Geltungsbereich eines qualifizierten Bauungsplans stehen, können Festsetzungen zum Rückbau nach § 9 Abs. 2 BauGB in den Plan mit aufgenommen werden.

Die voraussichtlichen Kosten für den Rückbau lassen sich nur im Einzelfall ermitteln, eine bundeseinheitliche Berechnungsformel gibt es nicht. In den Ländern wird dies sehr unterschiedlich gehandhabt; die Vorgaben reichen von festen Euro-Beträgen pro Megawatt installierter Leistung über prozentuale Anteile an den Herstellkosten bis hin zu konkreten Kostennachweisen.⁶

Sofern die ausgedienten Windräder oder ihre Komponenten nicht weiterverwendet werden können, sind sie als Abfall gemäß den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes⁷ (KrWG) zu entsorgen. Nicht verwertbare Bestandteile sind so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

Hinsichtlich der verschiedenen Komponenten sind bei der Entsorgung weitere Normen zu beachten, so bspw. die Gewerbeabfallverordnung⁸ (GewAbfV), das Chemikaliengesetz⁹ (ChemG) oder das Elektro- und Elektronikgerätegesetz¹⁰ (ElektroG).

Im Juli 2020 veröffentlichte das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) die DIN SPEC 4866¹¹, die erstmals Branchenstandards für den Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen definiert. Sie legt Rahmenbedingungen für den gesamten Rückbauprozess fest und dient sowohl den Betreibern als auch Kommunen und Behörden als Hilfestellung. Ziel ist es, die DIN SPEC mittelfristig in eine DIN-Norm zu überführen.

WIE ERFOLGT DER RÜCKBAU UND WORAUF IST BESONDERS ZU ACHTEN?

Vorab ist ein einzelfallbezogenes Rückbau- und Recyclingkonzept zu erstellen. Der Rückbau erfolgt üblicherweise ähnlich dem Aufbau in umgekehrter Reihenfolge. Hierzu wird i.d.R. ein qualifiziertes Abbruch- und Entsorgungsunternehmen beauftragt. Auch sollte der Anlagenhersteller mit einbezogen werden, da dieser eventuell relevante technische Informationen zur Verfügung stellen kann.

Der Betreiber ist verpflichtet, eine Rückbauanzeige zu stellen. Hierzu ist das Vorhaben der örtlichen Baubehörde zu melden. Zudem ist der Status der im Marktstammdatenregister¹² erfassten Anlage auf „endgültig stillgelegt“ zu setzen. Physisch wird die Anlage durch Trennung der Kabelverbindungen vom Netz genommen und damit dauerhaft stillgelegt. Zur Trockenlegung werden Getriebe- sowie andere Öle, Fette und Schmiermittel entnommen und einer Verwertung nach der Altölverordnung¹³ (AltÖV) zugeführt. Die Rückgewinnung des in den Schaltanlagen meist enthaltenen, klimaschädlichen Gases Schwefelhexafluorid (SF₆) darf ausschließlich durch zertifiziertes Personal erfolgen, um sicherzustellen, dass es nach den geltenden Vorschriften¹⁴ fachgerecht abgesaugt und recycelt oder entsorgt wird.

Die Demontage beginnt mit dem Entfernen der Rotorblätter, entweder als Einzelblatt- oder Sterndemontage. Das Zerlegen der Rotorblätter erfolgt am Boden mittels eingehauster Sägen, sodass die entstehenden Stäube nicht unmittelbar in die Umgebung gelangen können. Die wassergebundenen Stäube werden aufgefangen und anschließend ausgefiltert. Ist eine

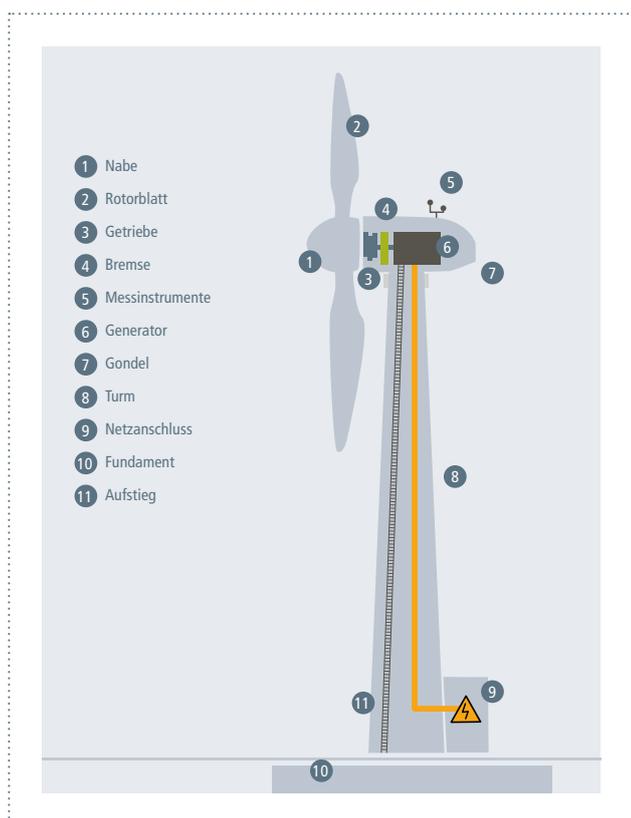
Weiterverwendung der Gondel nicht vorgesehen, kann auch hier eine Zerlegung vor Ort erfolgen.

Beim Rückbau des Turms ist seine Bauart zu berücksichtigen. Die Segmente von Stahl- und Gittertürmen werden schrittweise mechanisch demontiert und mittels eines Krans zu Boden gebracht. Auch Betonhybriddürme können meistens in dieser Weise zurückgebaut werden. Nur in seltenen Fällen ist eine Sprengung bzw. ein Abriss erforderlich. Die schrittweise Demontage ist auf jeden Fall vorzuziehen, da hierbei Lärm- und Staubbelastungen vermieden werden können.

Flach gegründete Fundamente werden i. d. R. vollständig zurückgebaut, für das Recycling werden Beton und Stahl voneinander getrennt. Die Fundamentgrube wird mit Boden verfüllt und kann bspw. wieder landwirtschaftlich genutzt werden. Nach Gesetzeslage¹⁵ und den Windenergieerlassen der Länder wird keine Unterscheidung getroffen zwischen Flach- und Pfahlgründungen¹⁶, sodass letztere grundsätzlich ebenfalls komplett zurückgebaut werden müssen. Unter dem Gesichtspunkt des Bodenschutzes ist dies allerdings nicht immer sinnvoll, da mit der vollständigen Beseitigung ein erheblicher Eingriff in die Bodenstruktur verbunden sein kann. Hier wird von den Gerichten und der Exekutive unterschiedlich beurteilt, ob nicht ein Verbleib der unteren Fundamentsegmente im Boden erfolgen kann.

Nach dem Abbau bleiben Kranstellflächen, Wege und Kabeltrassen übrig. Können diese nicht für Repoweringprojekte genutzt werden, sind sie ebenfalls rückstandsfrei zurückzubauen.

WORAUS BESTEHEN DIE ENZELNEN KOMPONENTEN UND WIE WERDEN SIE RECYCLET?



Komponenten einer WEA sind – neben dem Fundament und dem Mast – der Rotor mit Nabe und Rotorblättern sowie die Maschinengondel, die den Generator und in den meisten Fällen ein Getriebe enthält. Weit mehr als 90 Prozent einer WEA lassen sich recyceln und sind als Sekundärrohstoffe wiederverwertbar.

Türme und Fundamente der Windräder bestehen überwiegend aus Stahlbeton und Stahl und lassen sich problemlos und vollständig recyceln. Die stählernen Turmsegmente werden in transportable Stücke zerschnitten und gehen in die Stahlproduktion. Der Fundament- und Turm-Beton wird vor Ort zerkleinert und im Straßen- und Wegebau verwendet. Aus Betonstahl wird erneut Betonstahl hergestellt. Der Gesteinsschotter der zurückgebauten Kranstellflächen und der Zuwegung kann wiederum als Schotter für neue Projekte genutzt werden.

Abbildung 1: Aufbau einer Windenergieanlage
Quelle: Eigene Darstellung

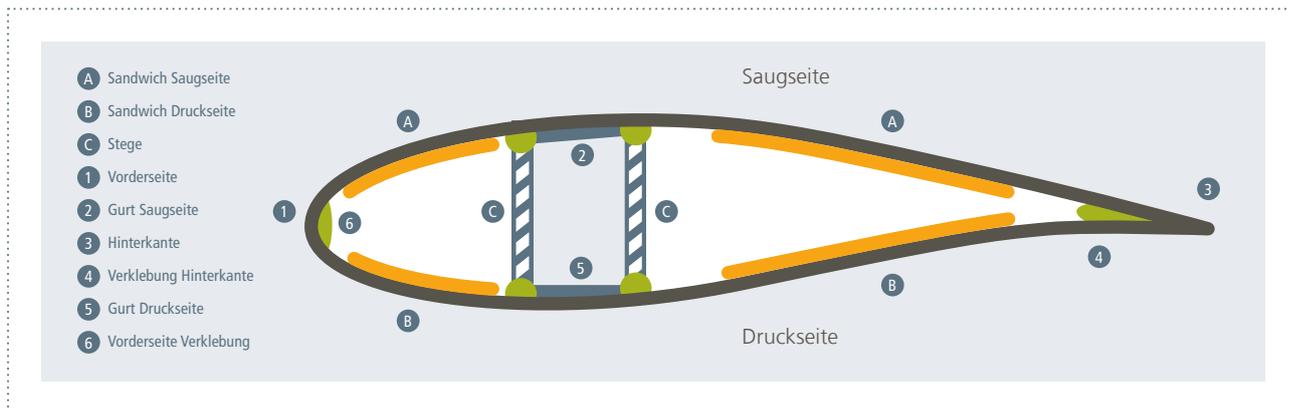


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Rotorblattes
 Quelle: Eigene Darstellung nach UBA 2022¹⁷

Die Rotorblätter bestehen – bezogen auf die Masse – zu fast zwei Dritteln aus faserverstärkten Kunststoffen, zu etwa einem Drittel aus Harzen und Klebstoffen. Bei älteren Anlagen wurden größtenteils Glasfasern verwendet, die in einer Kunststoffmatrix aus Epoxidharz eingebettet sind, dem sogenannten glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK). Für die Rotorblätter der jüngeren Generation werden auch Carbonfasern zur Verstärkung der Kunststoffmatrix eingesetzt (CFK), da diese bei geringerem Gewicht bessere Materialeigenschaften als Glasfasern aufweisen. Diese Rotorblätter werden häufig in Hybridbauweise aus Carbon- und Glasfasern, Epoxidharz und überwiegend Balsaholz als Kernmaterial hergestellt.¹⁸

Die auf der Baustelle zerlegten Rotoren werden zur weiteren Aufbereitung zu einem Entsorgungsfachbetrieb gebracht und dort weiter zerkleinert. Die Ablagerung von Rotorblatt-Teilen auf Deponien ist in Deutschland nicht zulässig, da die Materialien aufgrund der Harze einen zu hohen organischen Anteil aufweisen. Ein Großteil des Materials, überwiegend aus GFK bestehend, werden thermisch verwertet: Während die Verbrennung der Epoxidharze Prozesswärme liefert, ersetzen die Glasfasern beispielsweise bei der Zementherstellung notwendige Zuschlagstoffe. Das enthaltene Balsaholz wird inzwischen zum Teil zurückgewonnen und zu Dämmstoffen oder Verpackungsmaterial verarbeitet.¹⁹ Auch können die GFK-Verbindstoffe Verwendung bei der Herstellung von WPC-Bodenbelägen finden.



Foto: HAGEDORN Unternehmensgruppe

Größere Probleme bei der Verwertung bereiten die CFK-Segmente, die auch im Automobil- und Luftfahrtbereich zunehmend anfallen. Hier werden seit einigen Jahren spezielle Verfahren zur Faserrückgewinnung durch Pyrolyse erprobt, jedoch besteht noch Forschungsbedarf bezüglich der Abtrennung und vor allem Wiederverwertung dieses Materials. Im März 2023 wurden in einem Offshore-Windpark bei Helgoland erstmalig Turbinen mit vollständig wiederverwertbaren Rotorblättern in Betrieb genommen. Durch den Einsatz eines neuartigen Harzes mit einer speziellen chemischen Struktur können die für die Rotoren verwendeten Materialien später wieder voneinander getrennt werden.²⁰

Komponenten wie Antriebsmotoren, Getriebe, Generatoren oder Schaltschränke werden nach Möglichkeit als Ersatzteile verkauft. Befestigungselemente, Generator, Kabel- und Antriebsstrang, Steuerungselemente sowie Leiterplatten enthalten weitere recycelbare Materialien. Neben Kupfer, das vollständig eingeschmolzen und zu neuen Kabeln oder anderen Produkten verarbeitet wird, lässt sich auch Aluminium gut wiederverwerten.

Das zu den seltenen Erden zählende Neodym ist Bestandteil der Permanentmagnete einiger Windrad-Generatoren. Ist eine Wiederverwendung der Magnete durch den Hersteller nicht möglich, können sie grundsätzlich recycelt werden, worauf sich inzwischen entsprechende Firmen spezialisiert haben.²¹ Dabei lässt sich die Wiedergewinnung des Neodyms mit geringem Aufwand und damit ökonomisch und ökologisch wesentlich besser erreichen als die Gewinnung aus Primärrohstoffen.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

- Umweltbundesamt (2023), Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. UBA Texte 48/2023.
- Umweltbundesamt (2022), Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Abschlussbericht. UBA Texte 92/2022.
- Umweltbundesamt (2019), Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. UBA Texte 117/2019.
- Deutsches Institut für Normung (2020), DIN SPEC 4866: 2020-10, Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen.
- FA Wind (2021), Rückbau von Windenergieanlagen – Ein Blick auf die Rückbauverpflichtung und weitere städtebauliche Instrumente.
- FA Wind (2018), Brechen & Sieben – Fachaustausch zu End-of-Life von Windenergieanlagen, Dokumentation.

1 FA Wind, Ausbauentwicklung in Deutschland. Abgerufen am 13.7.2023.

2 § 25 EEG 2023.

3 Umweltbundesamt (2023), Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. UBA Texte 48/2023, Tabelle 1.

4 Baugesetzbuch v. 3.11.2017, BGBl. I S. 3634, zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes v. 4.1.2023, BGBl. 2023 I Nr. 6, § 35 Bauen im Außenbereich.

5 Siehe dazu auch: FA Wind (2021), Rückbau von Windenergieanlagen – Ein Blick auf die Rückbauverpflichtung und weitere städtebauliche Instrumente.

6 Siehe dazu: Bundesverband Windenergie (2018), Rückbauverpflichtung bei Windenergieanlagen.

7 Kreislaufwirtschaftsgesetz v. 24.2.2012, BGBl. I S. 212, zuletzt geändert durch Art. 5 des Gesetzes v. 2.3.2023, BGBl. 2023 I Nr. 56.

8 Gewerbeabfallverordnung v. 18.4.2017, BGBl. I S. 896, zuletzt geändert durch Art. 3 der Verordnung v. 28.4.2022, BGBl. I S. 700.

9 Chemikaliengesetz v. 28.8.2013, BGBl. I S. 3498, 3991, zuletzt geändert durch Art. 115 des Gesetzes v. 10.8.2021, BGBl. I S. 3436.

10 Elektro- und Elektronikgerätegesetz v. 20.10.2015, BGBl. I S. 1739, zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes v. 8.12.2022, BGBl. I S. 2240.

11 DIN SPEC 4866: 2020-10, Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen.

12 Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur.

13 Altölverordnung v. 16.4.2002, BGBl. I S. 1368, zuletzt geändert durch Art. 1 der Verordnung v. 5.10.2020, BGBl. I S. 2091.

14 Siehe dazu: Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des europäischen Parlaments und des Rates v. 16.4.2014 über fluoridierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006; Chemikalien-Klimaschutzverordnung v. 2.7.2008, BGBl. I S. 1139, zuletzt geändert durch Art. 299 der Verordnung v. 19.6.2020, BGBl. I S. 1328; sowie DIN EN IEC 60480 VDE 0373-2:2020-06, Spezifikationen für die Wiederverwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) und seinen Mischungen in elektrischen Betriebsmitteln.

15 Siehe z. B. VGH Hessen, 12.1.2005 - 3 UZ 2619/03.

16 Die Pfahlgründung ist eine Variante der Tiefgründung. Mit ihr können die Lasten der WEA bei unzureichender Standfestigkeit nahe dem Untergrund in tiefere, tragfähige Bodenschichten abgetragen werden. Siehe dazu z. B.: Webzeitschrift: Tiefgründung von Windkraftanlagen.

17 Umweltbundesamt (2022), Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Abschlussbericht. UBA Texte 92/2022, Kap. Aufbau von Rotorblättern.

18 Umweltbundesamt (2022), Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Abschlussbericht. UBA Texte 92/2022, Kap. Materialien.

19 Hoferichter, A. (2023), Das Beste aus dem Blatt. In: Neue Energie, 02/2023, S. 52 ff.

20 Siehe auch Online-Artikel in der Frankfurter Rundschau v. 5.4.2023: Windpark vor Helgoland mit weltweit neuartigen Rotoren.

21 Zum Beispiel die Firma Walch-Recycling, die Generatoren mit Permanentmagneten ankauft.