



Dokumentation

Windenergieanlagen

Rückbau, Recycling und Ökobilanzierung

Windenergieanlagen

Rückbau, Recycling und Ökobilanzierung

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 028/20

Abschluss der Arbeit: 15. Juni 2020

Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

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

1.	Einleitung	4
2.	Rückbau, Recycling und Entsorgung	5
2.1.	Rotorblätter	9
2.2.	Fundamentbestandteile bzw. Beton	11
2.3.	Metalle	11
2.4.	Flüssigkeiten (Öle, Fette)	12
2.5.	Sonstige Materialien	13

1. Einleitung

Nach fast 30 Betriebsjahren wird in den nächsten Jahren der Rückbau der ältesten der bestehenden 29.213¹ Onshore-Windenergieanlagen (Stand 2018) und 1.469² Offshore-Windenergieanlagen (Stand 2019) beginnen. Voraussichtlich ab Januar 2021 verlieren etwa 5.333 Windenergieanlagen (WEA) ihre garantierte Einspeisevergütung nach dem Erneuerbaren Energien-Gesetz (EEG). Nach 2021 kommen jährlich 1.000 bis 2.000 Anlagen hinzu. Wie lange diese Anlagen noch im Betrieb bleiben, ersetzt (Repowering) oder zurück gebaut und entsorgt³ werden, steht noch nicht fest. Es könnten aber nach Aussage des Umweltbundesamtes (UBA) Engpässe bei den Recyclingprozessen auftreten.⁴

Die Universität Bremen sieht ebenfalls Handlungsbedarf und hat beispielsweise für den Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen ein Projekt gestartet. „In den nächsten zehn Jahren werden über 15 Offshore-Windparks (OWP) in der europäischen Nord- und Ostsee nach einer 20- bis 25-jährigen Betriebsdauer zurückgebaut. Auf Grund mangelnder Erfahrungen – weltweit wurden bislang nur vier Offshore-Windparks zurückgebaut – steht die Branche vor einer Vielzahl an Herausforderungen. Derzeit sind weder die mit dem Rückbau verbundenen Anforderungen, Techniken oder Verfahren der Demontage, Logistik und des Recyclings, noch die daraus resultierenden Kosten und Wirkungen auf Mensch und Umwelt ausreichend bekannt.“⁵

1 Statista (2019). „Anzahl der Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018“, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/20116/umfrage/anzahl-der-windkraftanlagen-in-deutschland-seit-1993/>

2 Statista (2020). „Anzahl der Offshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2019“, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/270856/umfrage/installierte-windenergieleistung-auf-see-in-deutschland/>

3 Beim Rückbau und Recycling unterscheiden die Experten auch zwischen Zweitnutzung, stofflicher und thermischer Verwertung und der Deponierung.

4 Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensicheren Rückbau von Windenergieanlagen“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacycle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf

Neue Energie (2019). „Recycling und andere Fragen“, <https://www.neueenergie.net/wissen/wind/recycling-und-andere-fragen-0>

5 Universität Bremen, Institut für Umwelt- und Biotechnik (2020 oder 2018???. „Seeoff-Projektbeschreibung“, <https://www.seeoff.de/projekt/#zielsetzung>

Neue Energie (2019). „Recycling und andere Fragen“, <https://www.neueenergie.net/wissen/wind/recycling-und-andere-fragen-0>

Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der AfD „Rückbau und Entsorgung von Windrädern“, BT-Drs 19/17209, <http://dip21.bundestag.btg/dip21/btd/19/172/1917209.pdf>

Im Fall der Offshore-Windenergieanlagen kann jedoch zum Teil auf die Erfahrungen des Rückbaus von Öl- und Gasplattformen zurückgegriffen werden.⁶

Windenergieanlagen bestehen zudem aus einer Vielzahl von Komponenten, die sich mit Blick auf das Recycling stark unterscheiden: „Eine moderne Windenergieanlage besteht aus einer Vielzahl von Bestandteilen, welche sich hauptsächlich in mineralische und metallische Komponenten sowie in verschiedene Kunststoffarten unterteilen lassen. Größtenteils setzt sich das Gewicht einer marktypischen Anlage wie folgt zusammen: Anlagen mit Betonturm zu ca. 80-90 % aus Beton (Turm und Fundament), Anlagen mit StahlTurm zu ca. 20-25 % aus Beton (Fundament). Insgesamt spielen Stahlkomponenten mit 30-35 % Gewichtsanteil eine weitere wichtige Rolle bei der Anlagenkonstruktion. Neben der Verwendung im Stahlbeton oder im Turm findet sich das Material z.B. in der sogenannten Nabe, an welcher die Rotorblätter befestigt sind, und im Maschinenhaus, in welchem der Triebstrang mit Rotorwelle, Generator sowie ggf. das Getriebe untergebracht sind. Bei getriebelosen Anlagenkonstruktionen ist kein Getriebe verbaut, jedoch der Generator deutlich größer.“⁷

Die Anteile am Gesamtgewicht liegen für Beton bei 60-65 %, Stahl 30-35 %, Verbundmaterialien 2-3 % und für E-Komponenten, Kupfer, Aluminium, PVC und Betriebsflüssigkeiten jeweils unter 1 %.⁸ Nach Aussage des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) sollen bis zu 90 % der zurückgebauten Bestandteile einer WEA, bezogen auf die Gesamtmasse, einem geordneten Verwertungsprozess zugeführt werden.⁹

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Aspekten des Rückbaus und Recyclings und den Ökobilanzierungen von Windenergieanlagen.

2. Rückbau, Recycling und Entsorgung

Das Umweltbundesamt (UBA) hat im Jahr 2019 ein umfangreiches Konzept zum Rückbau von Windenergieanlagen veröffentlicht. Dieses Konzept erörtert die rechtlichen Rahmenbedingungen

6 Vann, R. Offshore (2020). „Offshore decommissioning – challenges and opportunities“, <https://www.offshore-mag.com/field-development/article/14168417/offshore-decommissioning-challenges-and-opportunities>

7 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/hintergrundpapiere-oeffentlich/themen/Technik/20180611_bwe_hintergrundpapier_rueckbau.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf)

Hintergrundinformationen zu den rechtlichen Grundlagen und Definitionen der Rückbauverpflichtung, deren Umfang und der Höhe der Sicherheitsleistungen jeweils unterteilt nach Bundesländern in: BWE (2018). „Rückbauverpflichtung bei Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/hintergrundpapiere-oeffentlich/themen/Technik/20180611_bwe_hintergrundpapier_rueckbau.pdf

8 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf

9 VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2014). „Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen“, https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf

und legt u.a. die vorhandenen Rückbautechniken dar. Die Studie fasst Rahmenbedingungen zusammen und soll als Orientierung für die mit dem Rückbau und Recycling betrauten Betreiber, Unternehmen sowie die überwachenden Behörden dienen. Die Anlage beschreibt ausführlich die Komponenten einer WEA sowie deren stoffliche Zusammensetzung.¹⁰

Seit 2019 gibt es eine neue Industrievereinigung insbesondere für die Themenschwerpunkte Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen (RDRWind).¹¹

Eine Schriftliche Frage der Abgeordneten Judith Skudelny (FDP) zur Bewertung des Ausbaus von On- und Offshore Windkraftanlagen hinsichtlich der ökobilanziellen Bewertung vor dem Hintergrund des hohen Materialaufwands und schlechter Recyclingfähigkeit beantwortet der Parlamentarische Staatssekretär Florian Pronold unter BT-Drs [19/17044](#), Frage 164, Seite 103-104.

„[...] Vorläufige Ergebnisse hinsichtlich der Umweltwirkungskategorie GWP [Treibhauseffekt] liegen bei einer angenommenen Anlagenlaufzeit von 20 Jahren (Wind onshore) bzw. 25 Jahren (Wind offshore) zwischen 5 g bis 15 g CO₂-Äquivalenten/kWh. Demgegenüber liegt der CO₂-Emissionfaktor des deutschen Strommix (2017) bei 486 g CO₂-Äquivalenten/kWh [...].“

Die Bundesregierung gibt dabei zu bedenken:

„Bereits fertiggestellte, vorliegende Ökobilanzstudien zur Windenergie bilden nicht mehr den aktuellen Stand der Technik ab. Aktuelle Windenergieanlagen weisen gegenüber den in früheren Studien betrachteten Windenergieanlagen eine größere Dimensionierung hinsichtlich Fundament, Turmhöhe, Rotordurchmesser, Antriebsstrang und Generator auf. Als Folge ist bei modernen WEA zwar pro Anlage von einem höheren Energieaufwand für Herstellung, Aufbau, Rückbau und Recycling auszugehen, dem stehen jedoch deutlich höhere Energieerträge gegenüber, die den Mehraufwand überkompensieren. Dadurch sinken die Umweltwirkungen je erzeugter Kilowattstunde. In der Studie „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“ (2018) des Umweltbundesamtes (abrufbar unter www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger) werden u. a. die Emissionsfaktoren für Windenergie berechnet. Diese liegen für Wind onshore bei 10,497 g CO₂-Äquivalenten/kWh und für Windenergie offshore bei 5,998 g CO₂-Äquivalenten/kWh [...].“

¹⁰ Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensicheren Rückbau von Windenergieanlagen“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacyle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf

¹¹ RDRWind e.V. (2020). „Repowering, Demontage und Recycling“ von Windenergieanlagen, <https://www.rdrwind.de/index.php>

Zum Themenfeld Ökobilanzierungen von Windenergieanlagen liefern folgenden Quellen ausführliche Informationen:

Eine Studie vergleicht die Auswirkungen für die menschliche Gesundheit, Umwelt und natürlichen Ressourcen von Windkraftanlagen auf See und an Land. Die Forscher kommen zu dem Schluss, dass die Auswirkungen auf die Umwelt bei Windkraftanlagen an Land höher sind als für einen Offshore-Windpark. Piasecka, I. et al. (2019). „Life Cycle Analysis of Ecological Impacts of an Offshore and a Land-Based Wind Power Plant“, <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Piasecka-2019-LCA.pdf>

Ein Vorschlag zur Bewertung verschiedener Energieerzeugungsarten und deren ökologischer Auswirkungen wird in einem Artikel aus dem Jahr 2015 erörtert. Der Artikel vergleicht im Rahmen einer Literaturstudie bekannte ökologische Auswirkungen der einzelnen Energieerzeugungsarten: Jones, N. F. (2015). „The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services“, <https://academic.oup.com/bioscience/article/65/3/290/236920>

Ökobilanzierungen von Onshore - Windenergieanlagen:

Chipindula, J. et al. (2018). „Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas“, <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/6/2022/pdf>

Eine Reihe von Lebenszyklusanalysen hat des WEA-Herstellers „Vestas“ für Onshore-Windenergieanlagen erarbeitet:

Vestas Wind Systems A/S (2011). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant“, https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v112_study_report_2011.pdf

Vestas Wind Systems A/S (2015). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.3 MW Wind Plant“, https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/life%20cycle%20assessment_v112-3%203mw_mk2c_version_2_1_210915.pdf

Vestas Wind Systems A/S (2015) „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V117-3.3 MW Wind Plant“, <https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lcav11733mwfina060614.pdf>

Vestas Wind Systems A/S (2014). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V126-3.3 MW Wind Plant“, <https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lcav12633mwfina060614.pdf>

Vestas Wind Systems A/S (2011). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V80-2.0 Gridstreamer Wind Plant“, https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v802mw_version1.pdf

Vestas Wind Systems A/S (2011). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0 Gridstreamer Wind Plant“, https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v902mw_version1.pdf

Vestas Wind Systems A/S (2013). „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V90-3.0 MW Wind Plant“, https://www.vestas.com/~/media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v903mw_version_1_1.pdf

Ein Hintergrundpapier zur Ökobilanz von Windenergieanlagen veröffentlichte der Branchenverband WindEnergie e.V.: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2017). „Ökobilanzen von Onshore-Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oefentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20170930_hintergrundpapier-oebilanz-von-windenergieanlagen.pdf

Ökobilanzierungen von Offshore - Windenergieanlagen:

Studie zur Lebenszyklusbewertung eines schwimmenden Offshore-Windparks im Mittelmeer: Poujol, B. et al. (2020). „Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data“, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12989>

Eine Analyse soll aufzeigen, wie die Ergebnisse der Ökobilanz in die Verbesserung von Produktion und Betrieb der WEA einfließen können: Bonou, et al. (2016). „Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy - from theory to application“, https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/129908950/Bonou_2016_Applied_Energy.pdf

Die Firma „Siemens Gamesa“ hat in einer Broschüre die Lebenszyklusanalyse für eine Offshore-WEA anhand von Grafiken anschaulich erörtert: Siemens Gamesa (2020). „A clean energy solution – from cradle to grave“, <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/sustainability/environment/siemens-gamesa-environmental-product-declaration-epd-sg-8-0-167.pdf>

Darüber hinaus gibt es Quellen, die insbesondere **Rückbau, Recycling und Entsorgung** von Windenergieanlagen behandeln.

Von praktikablen Möglichkeiten und wirtschaftlichen Auswirkungen des Recyclings von Offshore-Windkomponenten als Teil einer End-of-Life-Strategie handeln folgende Artikel:

Die Arbeit fasst den Wissensstand über die Herausforderungen des Stilllegungsprozesses von Offshore-Windparks zusammen: Topham, E. et al. (2019). „Challenges of decommissioning offshore wind farms: Overview of the European experience“, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1222/1/012035/pdf>

Der Artikel enthält Links zur Beschreibung der vier rückgebauten WEAs und eine Literaturstudie insbesondere zu den Turbinen (Siemens): Topham, E. et al. (2019). „Recycling offshore wind farms at decommissioning stage“ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519300618#>

Das Kapitel 3.1.1. „Turbines“ beschreibt u.a. den Aspekt der Sicherstellung von Ölen und Fetten einer WEA-Turbine. Topham, E. et al. (2017). „Sustainable decommissioning of an offshore wind farm“, Renewable Energy, Volume 102, Part B, March 2017, Pages 470-480, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116309430>

Die „Fachagentur Windenergie an Land“ beleuchtet verschiedene Aspekte zum Rückbau und Recycling von WEA: Brechen&Sieben (2018). „Fachaustausch zu End-of-Life von Windenergieanlagen“, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Doku_Brechen-und-Sieben_2018-12.pdf

Eine Kurzanalyse skizziert am Beispiel von Planung, Bau, Betrieb, Repowering und Rückbau von WEA die Ressourceneffizienz-Potenziale. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Materialeffizienz: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2014). „Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen“, https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf

2.1. Rotorblätter

Der Bundesverband Windenergie beschreibt die Situation zum Rückbau, Recycling und Entsorgung der Rotorblätter ausführlich in einem Hintergrundpapier:

„Die Rotorblätter selbst sind in der Regel aus modernen Faserverbundstoffen gefertigt, die regelmäßig auch in Flugzeugen, Zügen oder Autos verbaut werden. Besonders zwei Verbundstoffarten finden in Windenergieanlagen Gebrauch: glasfaserverstärkte Kunststoffe (kurz GFK), sowie in deutlich geringerem Maße kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe (kurz CFK). Bei der Produktion werden die einzelnen Fasern (Glas- oder Kohlenstofffaser) in eine sog. Matrix, in der Regel aus duroplastischem Kunststoffharzen, wie z.B. Epoxid-, Polyester-, Vinylester- oder einem Polyurethanharz, eingebettet. Die Blattschale selbst ist zudem in sogenannter Sandwichbauweise konstruiert. Ähnlich einer Fachwerkkonstruktion garantiert die Sandwichbauweise bei geringem Gewicht eine gleichzeitig hohe Steifigkeit. Solche Sandwichmaterialien können Balsaholz oder Kunststoffschäume aus beispielsweise PVC sein. Seit kurzem sind recycelte PET-Sandwichmaterialien verfügbar, die jedoch bei den aktuell zu entsorgenden Anlagen keine Rolle spielen.“

Die Verwertung von Verbundmaterialien der Rotorblätter stellt weiterhin noch eine Herausforderung dar. Insgesamt wurden im Jahr 2015 in Europa 1.069.000 Tonnen glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) produziert. Davon wurden 34 Prozent in der Konstruktionsbranche verbraucht, zu der auch die Windindustrie gehört. Die Bereiche Transport (35 Prozent), ebenso wie bei Elektronik- und Sportgeräten (30 %) weisen ebenfalls einen sehr hohen GFK-Verbrauch auf. Dagegen sind bei CFK nur etwa 14 % des Verbrauchs für die Windindustrie. Die größten Abnehmer sind die Luftfahrtindustrie, das Militär (31 % zusammen) sowie die Fahrzeugindustrie (21 %). Die im Zuge des Rückbaus anfallenden ausgedienten Verbundstoffe können auf unterschiedlichste Art verwertet werden. In der Vergangenheit wurden Faserverbundteile wie GFK auf Deponien entsorgt. Mit der Änderung

der Abfallablagerungsverordnung (AbfAblV) und Deponieverordnung (DepoV) ist dies jedoch seit 2005 auf Grund der speziellen Zusammensetzung und des hohen thermischen Energiegehaltes nicht mehr gestattet.“¹²

Eine Schriftliche Frage des Abgeordneten Steffen Kotré (AfD) zum Schutz der Bevölkerung bei Abbau und Entsorgung von faserverstärkten Rotorblättern beantwortet der Parlamentarische Staatssekretär Florian Pronold unter BT-Drs [19/17044](#), Frage 161, Seite 101. In der Antwort wird auf den Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ verwiesen: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2019). Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“, https://www.laga-online.de/documents/2019_12_12_2_1580133313.laga_jabe_berlin_2019_fin_hp, Kapitel 4.11 Ad-hoc-Ausschuss zur Untersuchung von Entsorgungsmöglichkeiten faserhaltiger Abfälle, Seite 23.

Eine weitere Schriftliche Antwort behandelt rechtlichen Rahmenbedingungen der Zwischen- bzw.endlagerung der Glas- bzw. kohlefaserverstärkten Kunststoffe bei nicht vorhandener Entsorgungskapazität. Die Antwort weist darauf hin, dass sich aufgrund des hohen Brennwertes der Kunststoffmatrix keine Lagerung auf Deponien zulässig sei und ein relevanter Anteil von Windenergieanlagen zur erneuten Verwendung ins Ausland exportiert wird. Zudem habe sich in Deutschland eine energetisch-stoffliche Verwertung in Zementwerken etabliert. BT-Drs [19/17044](#), Frage 160, Seite 100.

Eine Forschergruppe der Universität Bremen möchte im Rahmen eines Verbundprojekts bis 2021 Strategien zum effizienten Rückbau von Offshore-Windparks entwickeln: Universität Bremen (2018). „Strategieentwicklung zum effizienten Rückbau von Offshore-Windparks“ (Seeoff), <https://www.seeoff.de/>. Ein Teilprojekt hat insbesondere die Entwicklung konkreter Recyclingvereinbarungen für das Produktionsystem „Rotorblatt“ als Ziel. Universität Bremen (2019). „Recycle-Wind“, <http://www.recyclewind.de/>.

Die Bremer Aufbereitungsgesellschaft neocomp hat beispielsweise ein Verfahren entwickelt, um glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) der Rotoren komplett zu recyceln. Dabei entsteht ein Gemisch, das als Brenn- und Rohstoff in der Zementherstellung dienen kann. Die Glasfasern bleiben in der Asche bestehen und können bei der Klinkerfertigung Sand ersetzen.¹³

12 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen - 20191115.pdf

Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2017). „Möglichkeiten zur Wiederverwertung von Rotorblättern von Onshore-Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/hintergrundpapiere-oeffentlich/themen/Technik/20171221_hintergrundpapier_moeglichkeiten_des_recyclings_von_rotorblaetter.pdf

13 Falk, L. (2019). „Kampf um die Windmühlen“, <https://www.seeoff.de/data/publications-20190902-1-cZt9Vz9a.pdf>

Ein ganzheitliches Entsorgungskonzept für Windkraftanlagen bewirbt die Firma „Veolia“: Veolia (2018). „Factsheet zur Verwertung von Rotorblättern“, https://www.veolia.de/sites/g/files/dvc2511/files/document/2018/05/Factsheet_Windenergieanlagenverwertung.pdf. Die Rotorblätter werden am Ort zerlegt und zerkleinert und nach einem patentierten Verfahren entsorgt.

Insbesondere über die technische Entwicklung zur Trennung und Recycling des Balsaholzes, das mit bis zu 15 Kubikmeter in einem 15 Tonnen schweren Flügel verbaut ist, berichtet ein Artikel der FAZ. Nach dem Zerteilen mit einem Hochdruckwasserstrahl und einem Schredder zertrümmt eine Prallmühle die Stücke weitergetrennt. Die Kunststoffanteile zerbrechen in kleine Stücke. Das Balsaholz übersteht die Prozedur aufgrund seiner Elastizität. Nach Trennung der beiden Komponenten lässt sich das Balsaholz zu Terrassendielen oder Wärmedämmplatten weiter verarbeiten: Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) (2020). „Neues Leben für die alten Flügel“, Nr. 65 vom 17. März 2020, Seite T2.

2.2. Fundamentbestandteile bzw. Beton

Die Betonanteile der Windenergieanlagen lassen sich bereits jetzt recyceln: „Der im Rahmen des Rückbaus anfallende Betonaufbruch kann nach Bedarf direkt vor Ort aufgearbeitet bzw. recycelt werden. Dazu wird der Betonabbruch durch Brecher zu Betonsplitt oder Betonschutt zerkleinert, und kann regional für den Wege- oder Fundamentbau weiterverwendet werden. Alternativ wird Betonschutt als Rohstoff für Recyclingbetone eingesetzt.“: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen - 20191115.pdf

Eine Schriftliche Frage des Abgeordneten Steffen Kotré (AfD) zum Rückbau von Fundamentbestandteilen beantwortet der Parlamentarische Staatssekretär Florian Pronold unter BT-Drs [19/17044](#), Frage 162, Seite 102 mit einem Hinweis auf die Zuständigkeit der Länder hinsichtlich bodenschutzrechtlicher Regelungen.

2.3. Metalle

Auch Metalle der elektrischen Komponenten fallen beim Rückbau an. „Elektrische Leitungen aus Kupfer oder Stromschienen, Verkleidungen und Blitzschutzanlagenteile aus Aluminium stellen einen nur geringen Anteil am Gesamtgewicht einer Anlage dar, sind aber im Recyclingprozess wegen ihrer hohen Rohstoffwertigkeit von Bedeutung. Darüber hinaus werden weitere Kupferbauteile im Generator, Transformator und Umrichter verbaut.“: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen - 20191115.pdf

Aus der Gruppe der Seltenen Erden sind Neodym und Dysprosium in den Magneten der Generatoren enthalten. s.a. Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste (2018). „Zur Ökobilanz der Windenergietechnologie unter Berücksichtigung Seltener Erden“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/543800/a9906e8e1985f9078cd2209fb9e159fd/wd-8-010-18-pdf-data.pdf>

2.4. Flüssigkeiten (Öle, Fette)

Den Sachstand in Bezug auf Flüssigkeiten, wie Öle und Schmierfette, erläutert der Bundesverband für WindEnergie:

„Zuletzt kommt noch den Betriebsflüssigkeiten eine wichtige Funktion zu. Hier sind vor allem Öle und Schmierstoffe sowie Hydraulikflüssigkeiten zu nennen, welche den reibungslosen Ablauf der Anlage garantieren und im Rahmen des Rückbaus sachgerecht entsorgt werden müssen. In geringen Mengen sind bei einigen wenigen Anlagen auch glycolhaltige Flüssigkeiten im Kühlkreislauf der Betriebsaggregate enthalten.“¹⁴

„Zu den Betriebsflüssigkeiten gehören besonders die in der Anlage verwendeten Öle. Bei diesen handelt es sich um Betriebsstoffe, die selbstverständlich nicht in die Umwelt gelangen sollten. Weswegen die Separierung der Öle in der Regel von geschultem Fachpersonal unter Zuhilfenahme spezieller Maschinen, die auch im Wartungsprozess beim Ölwechsel der Anlagen verwendet werden, abgesaugt und abtransportiert werden. Auch lässt sich aus gebrauchtem Altöl, durch erneutes Raffinieren und Aufarbeiten, hochwertiges Basis-Öl gewinnen, das in Punkt Viskosität und Schmiereigenschaften neuem Öl in keiner Weise nachsteht. Altölrecycling leistet somit, durch Kohlenstoffdioxidreduktion und Ressourcenschonung, einen konsequenten Beitrag zum Klimaschutz. Die bestehenden und zukünftigen Kapazitäten der Altölwirtschaft stellen auch auf Dauer die umweltgerechte und sichere Entsorgung und das Recyceln der Öle sicher.“¹⁵

Die Schmierstoffe können in biogene und petrogene Grundöle unterteilt werden. Bei beiden stellen die Additive ein toxikologisches Problem dar.¹⁶ Typische Getriebeöle bestehen oft aus mindestens 85 % Grundöl(e) und etwa 15 % Additiven. Zu den Additiven gehören Antioxidantien (0,10 - 1,00 %), Korrosionsschutz (0,50 - 3,00 %), Verschleißschutz (0,50 - 5,00 %), Metall-Deaktivator (0,05 - 0,10 %), Festschmierstoff (0,00 - 3,00 %) und Haftmittel (0,00 - 1,00 %). Biogene Grundöle werden im Meer leichter und schneller abgebaut als petrogene Grundöle.¹⁷

14 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf

15 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf

16 Bioschmierstoffkongress (2012). „, https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Bioschmierstoff-Kongress_2012/15.00_Schneider.pdf

17 Beispiele für Antioxidantien: -Phenolische Antioxidantien -z.B. 2,6-di-tert-butylphenol (2,6-DTB) und 2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol -Aromatische Amine, -z.B. N-phenyl-1-naphthylamine (PANA) und 2,2,4-trimethyl-dihydroquinoline (TMQ) -Schwefel und Phosphor enthaltende Komponenten (gleichzeitig Verschleißschutz), -z.B. Metall-dithiophosphate

Das Umweltbundesamt empfiehlt beim Rückbau der Windenergieanlagen zu den Flüssigkeiten: „Während des Rückbaus muss darüber hinaus eine Trockenlegung erfolgen. Die Schmier- und Kühlmittelmengen können je nach Konstruktion (z. B. mit oder ohne Getriebe) der WEA abweichen. Für WEA mit Getriebe können, basierend auf einer Auswertung von 31 unterschiedlichen WEA, Schmiermittelmengen (d.h. Öle + Fette) zwischen 212 und 483 l/MW erwartet werden (Mittelwert = 337 l/MW bei einer Standardabweichung von 77 l/MW). Bei getriebelosen WEA (Stichprobe = 8 WEA-Modelle) sind Schmiermittelmengen (d. h. Öle + Fette) zwischen 28 und 81 l/MW zu erwarten (Mittelwert = 62 l/MW bei einer Standardabweichung von 22 l/MW). Werden keine Trockentransformatoren verwendet, sind zudem weitere Öl Mengen zwischen 350 und 450 l/MW innerhalb der Transformatoren zu berücksichtigen. Die zu entsorgenden Kühlflüssigkeiten sind aufgrund von unterschiedlichen Möglichkeiten der Kühlung (Luftkühlung vs. Flüssigkühlung) spezifisch zu bestimmen. Die Volumina an Kühlflüssigkeiten variieren innerhalb der Stichprobe von 22 WEA-Anlagen zwischen 20 und 750 l.“¹⁸

2.5. Sonstige Materialien

„In nur geringem Prozentsatz findet sich in einer Windenergieanlage Polyvinylchlorid (kurz PVC). Anwendung findet PVC als Grundstoff für Rohre oder als Isoliermaterial für Elektro-Kabel oder auch im „Sandwich-Kern“ der Rotorblätter in Form von PVC-Schaum.“¹⁹

Beispiele für Verschleißschutz: - Phosphor-Additive, z.B. Phosphorsäure-Derivate (Ester, Metall oder Amin-salze, Tricresylphosphate (TCP), ethoxylierte Mono- und Dialkylphosphorsäure) - Schwefel und Phosphor enthaltende Komponenten: Zink-dialkyldithiophosphate (ZnDTP), auch Molybdän-Derivate - Schwefel und Stickstoff enthaltende Komponenten, z.B. Zink-bis(diamyldithiocarbamat) oder Methyl-bis(di-n-butylthiocarbamate) - Schwefelhaltige Komponenten, z.B. Polysulfide oder geschwefelte Ester

Beispiele für Produktbroschüren für Schmierfette und Öle:

Mobil (ExxonMobil): „Fortschrittliche Schmierstofflösungen für die Windkraft“, <https://www.mobil.com/de/industrial/-/media/files/global/de/industrial/performance-profile/wind-brochure-de.pdf?la=de-de>, weitere Produktinformationen unter <https://www.mobil.com/de/de-de/industrial/lubricants/products/mobil-shc-gear-320-wt>

Shell „From Improving Turbine Efficiency to Powering Nations“, https://www.shell.de/promos/business-customers-promos/lubricants-portfolio-for-the-wind-sector-brochure_jcr_content.stream/1535494155047/874fbcf18cf7dd86dce12b6c64b9a4f9ed5ebe43/shell-lubricants-wind-sector-brochure-low.pdf

Klüber Lubrication „Lösungen für jede Windstärke. Spezialschmierstoffe für höchste Ansprüche in der Windkraftbranche“, https://www.klueber.com/ecoma/files/Loesungen_fuer_die_Windindustrie.pdf?download=1

18 Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensicheren Rückbau von Windenergieanlagen“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacyle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf

19 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2019). „Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen“, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf