



75 Jahre
Demokratie
lebendig



Deutscher Bundestag
Wissenschaftliche Dienste

Sachstand

Beanspruchung und Recycling von Windkraftanlagen sowie damit verbundene Herausforderungen

Beanspruchung und Recycling von Windkraftanlagen sowie damit verbundene Herausforderungen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 040/23
Abschluss der Arbeit: 08.09.2023
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.	Verschleiß von Windkraftanlagen	5
3.	Recycling	7
3.1.	Recycling der Rotorblätter	8
4.	Arbeitsmedizinische und Umweltaspekte des Rückbaus von Windkraftanlagen	14

1. Einleitung

Windenergie ist hierzulande nach der Verbrennung von Kohle die zweitbedeutsamste Quelle der Stromproduktion. Ihr Anteil am Bruttostromverbrauch lag 2022 bei 24,1 Prozent.¹ Die Bundesregierung beabsichtigt, den Anteil des Stroms aus Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2030 zu verdoppeln. Dies erfordert die Installation neuer Windenergieanlagen und den Austausch bestehender Anlagen durch leistungsfähigere Modelle.²

Nach rund 20 bis 30 Jahren haben Windkraftanlagen erfahrungsgemäß das Ende ihrer Lebensdauer erreicht.³ Sie werden zurückgebaut oder im Zuge des Repowering⁴ für einen Weiterbetrieb modernisiert, mit dem Ziel, die erzeugte Stromleistung zu erhöhen und die Anlagen an den Stand der Technik anzupassen.

Rückbau und Repowering sind laufende Managementprozesse der Windenergiebranche: Für das Jahr 2020 führt der Bundesverband Windenergie aus, dass 203 Windkraftanlagen stillgelegt wurden. Hiervon wurden 102 Anlagen für den Weiterbetrieb aufgerüstet.⁵ Im ersten Halbjahr 2022 wurden 82 Windenergieanlagen stillgelegt. 38 dieser Anlagen wurden vor 2002 in Betrieb genommen und haben nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz keinen Anspruch auf Einspeiseförderung mehr.⁶

Anlass des vorliegenden Sachstands sind Fragen des Recyclings von ausrangierten Anlagen oder Anlagenteilen und die Bedeutung des Verschleißes für die Lebensdauer. Weiterhin sollen toxikologische und ökotoxikologische Risiken im Zusammenhang mit dem Rückbau und dem Recycling erörtert werden.

-
- 1 Statistisches Bundesamt: Pressemitteilung Nr. 090 vom 9. März 2023; https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html
 - 2 Informationen der Internetseite der Bundesregierung zum Thema „Wind-an-Land-Gesetz“ vom 1. Februar 2023; <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/wind-an-land-gesetz-2052764>
 - 3 Umweltbundesamt: Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling, Repowering vom 20. Juli 2020; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/windenergieanlagen-rueckbau-recycling-repowering>
 - 4 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Was bedeutet eigentlich „Repowering“? 26. April 2016; <https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/08/Meldung/direkt-erklaert.html>
 - 5 Deutsche WindGuard GmbH: Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland; Jahr 2020; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_-_Jahr_2020.pdf
 - 6 Deutsche WindGuard GmbH: Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland; Erstes Halbjahr 2022; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220711_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_-_Halbjahr_2022.pdf

2. Verschleiß von Windkraftanlagen

Die Lebensdauer von Windkraftanlagen wird neben den ökonomisch-rechtlichen Rahmenbedingungen wie der Einspeisevergütung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz⁷, durch die Lebensdauer der Materialien und die Funktionstauglichkeit der Bauteile beeinflusst. Rotorblätter von Windenergieanlagen sind verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die den allmählichen Verschleiß der Windkraftanlage nach sich ziehen. Maßgebliche Umweltfaktoren sind:

- große Temperaturschwankungen,
- UV-Strahlung des Sonnenlichtes,
- Einwirkung von Luftschadstoffen,
- Fäkalien von Vögeln,
- Blitzschlag und andere mechanische Einwirkungen,
- Eis,
- Niederschläge wie Regen, Hagel und Schnee,
- Der Salzgehalt der Luft,
- Abrasion durch Sand und feine Partikel in der Luft.

Lacke und verschiedene andere Beschichtungen und Oberflächenmodifikationen sollen die Rotorblätter so weit wie möglich gegen diese Einflüsse schützen. Hierbei kommt es zu einem Technologietransfer über die Branche hinaus: Die Witterungseinflüsse sind kein Alleinstellungsmerkmal der Windenergiebranche, sondern ebenso für den Flugzeug- und Schiffsbau relevant.

Produktionsbedingte Mängel außer Acht gelassen sind *Blitzeinschläge* eine häufige Ursache von Schadensfällen. Für kurze Zeit treten Spannungen von mehreren Millionen Volt und extrem hohe Temperaturen auf, die die Werkstoffe mindestens oberflächlich verbrennen. Blitzströme auf carbonfaserhaltigen Rotoren können zu mechanischem Bruch, Delamination, Erosion und zum Brand führen. Je größer die Rotorblätter und umso höher der Turm der Windkraftanlage, desto größer ist das Risiko eines Blitzeinschlags, weshalb moderne Windkraftanlagen häufiger betroffen sind. Obwohl Windkraftanlagen heutzutage immer mit einem Blitzschutzsystem aus

⁷ Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist.

Fangeinrichtung, Ableitungssystem in den Rotoren und einer Erdungsanlage ausgestattet sind, kommen Blitzeinschläge vor.⁸

An der Vorderkante des Rotorblattes kommt es ferner beim Aufprall von Regentropfen und anderen Niederschlägen zur Erosion, besonders im Außenbereich der Rotoren, da die Drehgeschwindigkeit und damit die Aufprallgeschwindigkeit dort höher ist. Die Vorderkanten des Rotorblattes müssen daher regelmäßig gewartet werden. Besonders Sand und andere Partikel in der Luft sowie Regentropfen erhöhen die Rauigkeit der Rotorblattkanten.

Problematisch ist es auch, wenn Wasser von außen über Risse und Verschraubungen in die Rotoren eindringt und dort zur Korrosion führt. Es werden spezielle Beschichtungen eingesetzt, um die *Vorderkantenerosion* und das Eindringen von Wasser zu verhindern oder zu verzögern.⁹

Auch die *Ermüdung der Rotorblätter* durch wechselnde extreme Beanspruchung kann zum Versagen einer Windkraftanlage führen und ist ein häufig auftretendes Problem. Das hängt auch mit der hohen Traglast zusammen. Ein Rotorblatt schlägt mit einem Gewicht von 15 Tonnen und mehr zu Buche. Viele Defekte einer Turbine stehen im Zusammenhang mit Schwingungen, die durch Rotorunwuchten verursacht werden. Eine frühzeitige Erkennung dieser Unwuchten ist erforderlich, um Turbinenschäden zu verhindern und eine längere Lebensdauer zu gewährleisten. Mehrere Algorithmen und mathematische Modelle wurden von Forschern entwickelt, um dieses Problem zu vermeiden.¹⁰

Um eine vorzeitige Ermüdung von Windkraftanlagen zu vermeiden, sind zudem spezifische Tests und eine entsprechende Auslegung der Anlagen erforderlich. Dabei ist vor allem die *Eigenfrequenz der Windkraftanlage* bedeutsam – das Bauwerk schwingt faktisch mit einer bestimmten Frequenz und steht nicht etwa starr und still, wie es den Anschein hat. Die Eigenfrequenz lässt sich über Gründung, Turm, Gondel und Rotor beeinflussen. Die Aufgabe des Tragwerksplaners ist es, die Turmstruktur so zu entwerfen, dass die gewünschte Eigenfrequenz erreicht wird und gleichzeitig die Tragsicherheit gewährleistet ist.

Die Eigenfrequenz wird abhängig von den anregenden Frequenzen infolge der Böigkeit des Windes, von der Rotorfrequenz und weiteren Betriebsdaten ermittelt. Es gilt: Je näher die Eigenfrequenzen des Turmes im Bereich der anregenden Frequenzen liegen, desto höher ist die Beanspruchung der mechanischen Komponenten und des Turmes. Eine solche Konstellation könnte einen vorzeitigen Verschleiß begünstigen.¹¹

8 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804; S. 99 ff. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau- und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf.

9 Seidel, M.: Auslegung von Hybridtürmen für Windenergieanlagen - Lastermittlung und Nachweis der Ermüdungsfestigkeit am Beispiel einer 3,6-MW-WEA mit 100 m Rotordurchmesser; November 2002; Beton- und Stahlbetonbau 97(11), DOI: 10.1002/best.200202710.

10 Ebd.

11 Ebd., S. 4

3. Recycling

Im Mittelpunkt der Frage des Recyclings von Windkraftanlagen steht der Umgang mit den Rotoren, die aus komplexen Kunststoffverbundmaterialien zusammengesetzt sind (siehe hierzu auch WD8 – 039/23).¹² Verbundmaterialien sind branchenunabhängig etwa auch im Fahrzeugbau und im Verpackungs- oder Textilsektor schwer stofflich wieder zu verwerten. Die Forderung eines „design to recycle“ im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist produktübergreifend oftmals bislang noch nicht realisiert.

Für den Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen hat das Deutsche Institut für Normung 2020 mit der DIN SPEC 4866 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“ eine Vornorm veröffentlicht, die Kriterien guter Praxis formuliert.¹³ Sie beschreibt, wie die Baustelle gesichert werden muss und welche Qualifikationen die Arbeiter benötigen, die den Rückbau durchführen. Sie führt aus, wie Rotorblätter, Turm und Gondel zerlegt werden sollten und welche Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind, damit keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen. Sie macht zudem Angaben zu den Recyclingmöglichkeiten der verschiedenen Abfallströme und wie der Rückbau dokumentiert werden muss.¹⁴

Der Turm und die Gründung von Windkraftanlagen bestehen vorwiegend aus Beton (60 bis 65 Prozent des Gesamtgewichts der Windkraftanlage) und Stahl (30 bis 35 Prozent des Gesamtgewichts der Anlage).¹⁵

Bei einem Rückbau wird der Beton dem konventionellen Bauabfallrecycling zugeführt. Der weit überwiegende Teil der recycelten Baustoffe wird bisher im Straßen-, Erd- und Deponiebau eingesetzt.¹⁶ Perspektivisch und mit Blick auf die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft wird ein höherwertiges Recycling der oft sehr heterogenen Bauabfälle angestrebt, wofür diese jedoch sortenreiner und automatisch getrennt werden müssten, was bis dato nicht Stand der Technik ist.

Stahl und werthaltige abtrennbare Metalle wie Kupfer aus alten Windkraftanlagen werden ebenfalls recycelt und zu neuen Metallen aufbereitet. Nach Angaben des Deutschen Kupferinstituts

12 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Kurzinformation, Zu Materialien in Windkraftanlagen; WD 8 - 3000 - 039/23 (6. Juli 2023)

13 Technische Regel: DIN SPEC 4866:2020-10, Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen; <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-4866/328634880>

14 Weitergehende Informationen zum Recycling; energie-experten.org: Recycling und Entsorgung von Windkraftanlagen; zuletzt aktualisiert am 17. Juli 2020; <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/wind-energie/windkraftanlage/recycling>

15 Bundesverband WindEnergie e.V.: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen; Informationspapier vom 1. August 2023; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf S.4

16 Umweltbundesamt: Bauabfälle, Informationen vom 27. Juli 2023; <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#recycling-baustoffe>

liegt die Recyclingquote für Kupfer in Deutschland aktuell bei 45 Prozent. Inwieweit einzelne hochwertige Bestandteile, etwa das Seltene Erden-Element Neodym aus Permanentmagneten, das in einigen, aber nicht in allen Windrädern verbaut ist, recycelt wird, lässt sich aus einer Fachrecherche nicht erschließen.¹⁷ Aufgrund des hohen Gewichts von Turm und Gründung am Gesamtgewicht der Windkraftanlage werden 80 bis 90 Prozent der Anlage recycelt, wenn diese der Wiederverwertung zugeführt wird.^{18 19}

3.1. Recycling der Rotorblätter

Die Diskussion um das Recycling von Windkraftanlagen fokussiert sich vorrangig auf das Recycling der Rotoren, da diese aus komplexen Verbundmaterialien bestehen (siehe hierzu auch WD8 – 039/23).²⁰ Solche Verbundmaterialien sind branchenunabhängig und im Verpackungs- oder Textilsektor nur schwer stofflich wieder zu verwerten.

Genauere Zahlen zum Abfallaufkommen ausrangierter Rotorblätter in Deutschland sind nicht bekannt. Jedoch liegen wissenschaftliche Abschätzungen vor, die im Auftrag des Umweltbundesamtes vorgenommen wurden: In diesem Jahrzehnt ist mit einem Abfallaufkommen von jährlich bis zu 20.000 Tonnen Rotorblattmaterial zu rechnen. Für die 2030er-Jahre werden bis zu 50.000 Tonnen pro Jahr vorhergesagt.²¹

Bis 2040 sollen zwischen 326.000 und 430.000 Tonnen glasfaserhaltige (GFK) Abfälle aus reinen GFK-haltigen Rotorblättern in Deutschland anfallen. Im gleichen Zeitraum ergibt sich eine zu erwartende Abfallmenge für faserverstärkte Kunststoffe aus Rotorblättern mit GFK- und CFK (carbonfaserverstärkten Kunststoff)-Anteilen von 77.000 bis 212.000 Tonnen.²²

-
- 17 Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Antwort auf die mündliche Anfrage: Neodym in Windrädern vom 24. November 2016; <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/pressemitteilungen/neodym-in-windraedern-148929.html>
 - 18 Bundesverband WindEnergie e.V.: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen; Informationspapier vom 1. August 2023; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf
 - 19 Umweltbundesamt: Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling, Repowering ; Informationen vom 20. Juli 2020; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/windenergieanlagen-rueckbau-recycling-repowering>
 - 20 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Kurzinformation, Zu Materialien in Windkraftanlagen; WD 8 - 3000 - 039/23 (6. Juli 2023)
 - 21 Umweltbundesamt: Pressedossier Recycling von Windkraftanlagen; Pressedossier vom 18. April 2023; <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressedossiers/pressedossier-recycling-von-windkraftanlagen>
 - 22 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, S. 37

Die Deponierung von GFK-Abfällen und ausgedienten Rotorblättern ist seit 2005 gemäß Technischer Anleitung für Siedlungsabfälle (TASi) verboten. Insofern ist eine energetische, stoffliche oder thermische Verwertung Pflicht, es sei denn, die Anlage wird zum weiteren Betrieb ins Ausland veräußert, wie gegenwärtig oft üblich.

Rotorblätter bestehen aus zwei Halbschalen in Sandwichbauweise, die im Wesentlichen aus Glas- und Carbonfasern oder aus einer der beiden Fasern bestehen. Diese Fasern sind in einem Epoxidharz oder einem anderen duroplastischen Kunststoff eingebettet. In neueren und größeren Windkraftanlagen kommen vermehrt Carbonfasern zum Einsatz. Als Abfallbestandteile fallen damit Faserverbundstoffe aus Glas- und Carbonfasern, Epoxidharzen, Vinylharzen und weiteren Materialien an. Daneben befinden sich in den Rotorblättern in geringem Umfang Metalle wie Eisen, Kupfer, Aluminium und Blei sowie weitere Materialien für elektrische bzw. elektronische Komponenten. Zusätzlich enthalten die Anlagenteile Schäume, Balsaholz, Beschichtungen und weitere Ausrüstungen. Den größten Anteil am Gewicht der Rotoren haben die Faserverbundstoffe mit mindestens 70 Prozent. Im Kompendium „Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter“ im Auftrag des Umweltbundesamtes wird zudem darauf hingewiesen, dass die Rotoren zum Teil Bleischrot als Ausgleichsmasse enthalten. Dabei handelt es sich entsprechend dem Abfallrecht um einen gefährlichen Abfall.²³

„Altrotorblätter gelten als Herausforderung für das Recycling und ihr Verbleib ist oft ungeklärt“, urteilt das Umweltbundesamt.²⁴ Hinsichtlich des Recyclings sind Rotorblätter auf Basis von Glasfasern und solche auf Basis von Carbonfasern zu unterscheiden.

Für glasfaserhaltige Bauteile existiert nach Aussagen verschiedener Akteure etwa der Deutschen Umwelthilfe wie auch des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz²⁵ ein mittlerweile etablierter Recyclingweg. Die Anlagenteile können beispielsweise beim Bremer Unternehmen Neocomp zu einer Teilchengröße „in der Regel kleiner als 35 Millimeter“²⁶ zerkleinert werden, das heißt, sie werden geschreddert. Der Betreiber gibt an, eine Genehmigung für eine Jahreskapazität von 80.000 Tonnen²⁷ zu haben. Die zerkleinerten GFK-Rotorblattteile werden überwiegend als Ersatzbrennstoff an die Zementindustrie geliefert. Zum einen leistet der Energieinhalt des Substituts einen Beitrag für die Erzeugung der hohen Temperaturen von über 1000 Grad Celsius in den Brennöfen. Zum anderen wird für die Herstellung von Zement auch

23 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, S. 38

24 Umweltbundesamt: Pressedossier Recycling von Windkraftanlagen; Pressedossier vom 18. April 2023; <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressedossiers/pressedossier-recycling-von-windkraftanlagen>

25 Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Antwort auf die mündliche Anfrage: Neodym in Windrädern vom 24. November 2016; https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/niedersachsischer_landtag_mundliche_anfragen/speicherung-von-windenergie-und-rueckbau-von-windenergieanlagen-163668.html

26 <https://www.neocomp.eu/de/Leistungen>

27 <https://www.neocomp.eu/de/Leistungen>

Sand²⁸ benötigt, chemisch: Siliziumdioxid. Die ebenfalls siliziumdioxidbasierten Glasfasern können diesen Rohstoff partiell ersetzen. Es handelt sich folglich um eine energetische und stoffliche Verwertung der Rotorblattabfälle.

Nichtsdestotrotz wird ein höherwertiges Recycling angestrebt. Dies bringt auch der damalige Parlamentarische Staatssekretär Florian Pronold am 18. November 2021 in seiner Antwort auf eine entsprechende Frage bei der Fragestunde im Deutschen Bundestag zum Ausdruck: „Für Faserverbundwerkstoffe, aus denen Rotorblätter überwiegend bestehen, gibt es derzeit noch keine optimal auf die Materialien angepassten Verwertungswege.“²⁹

Verschiedene Forschungsnehmer haben im Auftrag des Umweltbundesamtes bis 2022 den aktuellen Stand der Praxis des Rotorblattrecyclings recherchiert und in einem Abschlussbericht mit dem Titel „Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter“ zusammengetragen.³⁰

Aus geschredderten Rotorblattabfällen werden nach Darstellung des Berichts Eisen- und Nichteisenmetalle separiert und dem Recycling zugeführt.³¹ In welcher Weise und in welchem Umfang dies geschieht, wird nicht erläutert. Technologieüblich wäre die Trennung der Verbundwerkstofffraktion von der Metallfraktion über einen Wirbelstrom und die Trennung der Eisen- und Nichteisenfraktion über einen Magnetabscheider.

Verglichen mit GFK-haltigen Abfällen ist das Recycling von CFK-haltigen Abfällen deutlich herausfordernder. In Verbrennungsanlagen bereiten sie nach Experteninformationen Probleme, da sie die Partikelfilter zur Abgasreinigung zusetzen und darin zu Kurzschlüssen führen können, da Kohlefasern den Strom leiten. Siedlungsabfallverbrennungsanlagen lehnen entsprechende Abfälle daher ab.³²

Es bleibt unklar, wie derzeit mit Abfallströmen aus carbonfaserhaltigen Verbundwerkstoffen verfahren wird, da sie nicht unmittelbar deponiert werden dürfen. Im Bericht für das Umweltbundesamt wird ausgeführt, dass CFK-Anteile in Rotorblättern, die vorrangig in Längsurten in den Rotorblättern verbaut sind, sortenrein mechanisch herausgetrennt werden könnten. Das Recycling dieser CFK-Abfälle erfolge mittels Pyrolyse mit dem Ziel der Rückgewinnung recycelter Carbonfasern. In Deutschland gäbe es aktuell nur eine Pyrolyseanlage mit einer Kapazität von etwa

28 <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/hauptbestandteile-des-zements-150930>

29 BT-Drs. 20/104 <https://dserver.bundestag.de/btd/20/001/2000104.pdf>, S. 55

30 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau- und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf

31 Ebd., S. 41

32 Bundesverband WindEnergie e.V.: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen; Informationspapier vom 1. August 2023; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf, S.9

1.500 Tonnen pro Jahr. Einschränkend heißt es jedoch: Das Recycling von Carbonfasern habe sich bisher nicht am Markt etablieren können, was wirtschaftliche und organisatorische Gründe habe.³³

Bei einer Pyrolyse wird der Verbundabfall unter Luftabschluss auf eine Temperatur von 300 bis 600 Grad Celsius erhitzt, wobei sich die Kunststoffanteile in niedermolekulare Verbindungen zersetzen. Kritisch bei der Pyrolyse ist die Entstehung von Schadstoffen sowie von Kohlenstoffablagerungen auf den Carbonfasern.^{34 35}

Bei dem im Bericht für das Umweltbundesamt erwähnten Recyclingverfahren für carbonfaserhaltige Abfälle handelt es sich um das Verfahren CarboNXT, das das Unternehmen Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH 2022 einlizenziert hat. Mitsubishi Chemicals ist global ein wichtiger Produzent neuwertiger Carbonfasern und bietet nun zusätzlich die Recyclingtechnologie in Form verschiedener Produkttypen an.³⁶ Ursprünglich wurde das Verfahren vom gleichnamigen Startup CarboNXT entwickelt.

Dieses Unternehmen berichtete mit Stand von 2017, dass das Produkt des Pyrolyseprozesses Carbon-Kurzfasern oder „Mahlgut“ sei. Allerdings würden auf dem Absatzmarkt weiterhin Neufasern den Recyclingfasern vorgezogen. Ein tragfähiger Markt für Sekundärfasern sei bislang noch nicht vorhanden, weshalb die Pyrolyse als Verwertungsweg „wenig beschritten“ würde. Einen klaren Vorteil des wertstoffhaltenden Faserrecyclings stelle die Energieeinsparung im Vergleich zur Neuproduktion dar. Für die Neuproduktion von Carbonfasern wird nach Auskunft der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) ähnlich viel Energie benötigt wie für die Erzeugung von Aluminium.³⁷ Nach Auskunft des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung in Wildau besteht auch weiterhin ein Vermarktungsproblem für entsprechend recycelte Carbonfasern, da sie chemisch nicht mit der Qualität neuwertiger Carbonfasern vergleichbar sind. Für hochwertige Anwendungen wie im Automobil- und Flugzeugbau kämen sie daher aufgrund der geforderten Produkthaftung nicht in Frage.

33 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, S. 42

34 Emmerich, R. et al.: Kohlenstofffasern wiedergewinnen, Kunststoffe 6/2014; https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/fachbeitraege/pe/PE_MP_Kohlenstofffasern_wiedergewinnen.pdf

35 RWTH Innovation GmbH: CFK-Recycling; <https://www.rwth-innovation.de/de/rwth-technologien/detail/cfk-recycling>.

36 <https://www.carbonxt.de>

37 LAGA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Entsorgung faserhaltiger Abfälle, Abschlussbericht, Juli 2019; https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle_juli-2019_1574075541.pdf, S. 20

Verschiedene vorgestellte Verfahrensmodifikationen sollen die bisherigen Nachteile der Pyrolyse vermindern, darunter die Pyrolyse mithilfe von Mikrowellen³⁸ oder unter Zusatz eines Oxidationsmittels wie Wasserdampf. Keines der Verfahren hat den Status kommerzieller Reife erlangt.

Die Bundesanstalt für Materialforschung berichtet, dass die Nachfrage nach recycelten Carbonfasern sehr gering sei und bei unter fünf Prozent liege. Die Forschungseinrichtung erarbeitet deshalb derzeit Standards für den Einsatz von recycelten Carbonfasern im Leichtbau. Die weltweite Nachfrage nach Carbonfasern liege derzeit bei 130.000 Tonnen pro Jahr.³⁹

Überdies werden immer wieder verschiedene Verfahren vorgestellt und erforscht, die prinzipiell ein Recycling der Rotorblätter ermöglichen sollten. Nicht immer werden die prozesstechnischen Details beschrieben, sodass keine fachliche Einschätzung möglich ist.⁴⁰ Neben den vorrangig thermischen Verfahren wie der Pyrolyse werden chemische Verfahren etwa die Solvolyse untersucht, bei denen das faserhaltige Epoxidharz mit einem Lösemittel unter milden Bedingungen umgesetzt und werthaltige Reaktionsprodukte gewonnen werden sollen. Entsprechende Ansätze befinden sich im Labor- und Technikumsmaßstab. Einen Überblick über den Stand der Forschung geben Übersichtsartikel aus dem Jahr 2021, die in den Zeitschriften *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* und *Composites Part B: Engineering* erschienen sind.^{41 42}

Den kommerziellen Reifegrad hat noch keines dieser in Forschung befindlichen Verfahren erreicht; insbesondere sind im Zuge der Hochskalierung dann zunehmend auch wirtschaftliche Überlegungen relevant.

Die Recyclingproblematik von faserhaltigen Materialien kann keinesfalls nur auf Abfälle aus der Windenergiebranche verengt werden. Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe sind in der Luft- und Raumfahrt, Windenergie und der Automobilindustrie etabliert. Seit einigen Jahren werden sie vermehrt in Sportartikeln und spezifischen Konsumgütern eingesetzt. Da aber die Verwertungspfade für glasfaser- wie carbonfaserhaltige Abfälle nach wie vor begrenzt sind und gerade letztere in klassischen Hausmüllverbrennungsanlagen Probleme bereiten, hat sich ein Ad-hoc-Ausschuss „Entsorgung von mineral- und carbonfaserhaltigen Abfällen“ der Bund/Länder-

-
- 38 Seiler, E.: Mikrowellenpyrolyse von carbonfaserhaltigen Kunststoffen als Recyclingoption; *Chemie Ingenieur Technik*, Volume 92, Issue 4, 11. März 2020; <https://doi.org/10.1002/cite.201900133>; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.201900133>
- 39 Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung: Leichtbau: Neue Qualitäts- und Sicherheitsstandards für recycelte Carbonfasern; 22. März 2023, <https://www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilungen/2023/Infrastruktur/2023-03-22-recycling-von-carbonfasern.html>
- 40 Vestas: Vestas unveils circularity solution to end landfill for turbine blades; News, 8. Februar 2023; <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2023/vestas-unveils-circularity-solution-to-end-landfill-for-c3710818>
- 41 Dorigato, A.: Recycling of thermosetting composites for wind blade application, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 4, Issue 2, 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504821000105>
- 42 Randi, M. et al.: A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades, *Composites Part B: Engineering*, Volume 215, 15 June 2021, 108768, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836821001608>

Arbeitsgemeinschaft Abfall mit dem Problem beschäftigt. Im Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ vom Juli 2019 werden Besonderheiten der Entsorgung und Verwertung faserhaltiger Abfälle erörtert, insbesondere da CFK-Abfälle verschiedenster Verwendung künftig vermehrt zu erwarten sind.⁴³

Viele zurückgebaute Windkraftanlagen werden nach Brancheninformationen bisher in das europäische und außereuropäische Ausland verkauft und dort für einen weiteren Lebenszyklus von 10 bis 20 Jahren genutzt. Der Bundesverband Windenergie selbst notiert diesbezüglich, dass „bisher relativ wenige Anlagen zurückgebaut“ wurden und ein Teil dieser Anlagen im Ausland, überwiegend außerhalb der EU, abgesetzt worden sei. Die Abfallmengen seien daher bisher „überschaubar“. „Dadurch konnten sich noch keine allgemein gültigen Verfahren oder Standards etablieren. Um einen guten Verwertungsprozess zu ermöglichen, sind detaillierte Informationen über die Materialzusammensetzung erforderlich. Da ein Teil der Hersteller inzwischen nicht mehr am Markt ist, gestaltet sich dies für den bestehenden Anlagenpark schwierig.“⁴⁴

In diesem Zusammenhang wird der digitale Produktpass, der im Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, vorgesehen ist⁴⁵ und auf EU-Ebene angestrebt wird, als eine mögliche und zukünftige Lösung erachtet, sofern er sich auf Windkraftanlagen bezieht.^{46 47 48}

Der Bundesverband Windenergie beklagt allerdings auch, dass die Nachfrage nach sekundären Rohstoffen aus dem Recycling von Windkraftanlagen aktuell zu gering und von Vorbehalten über die Qualität des recycelten Materials geprägt sei.⁴⁹

43 LAGA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Entsorgung faserhaltiger Abfälle, Abschlussbericht, Juli 2019; https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle-juli-2019_1574075541.pdf

44 Bundesverband WindEnergie e.V.: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen; Informationspapier vom 1. August 2023; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf, S. 12

45 Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, S. 34

46 Schröder, T.: Der neue Rohstoffrausch; Deutschlandfunk, 8. Mai 2022, <https://www.deutschlandfunk.de/rohstoffe-energie-wende-recycling-umwelt-ressourcen-100.html>

47 <https://www.bmuv.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass>

48 <https://www.bmuv.de/digitalagenda/auf-einen-klick>

<https://www.bmuv.de/pressemitteilung/eu-staaten-stimmen-fuer-digitalen-produktpass-und-gegen-vernichtung-von-neuwaren>

49 Bundesverband WindEnergie e.V.: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen; Informationspapier vom 1. August 2023; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf, S. 12

4. Arbeitsmedizinische und Umweltaspekte des Rückbaus von Windkraftanlagen

Beim Rückbau und Zerlegen von Windkraftanlagen in transportable Einheiten fallen naturgemäß Stäube und Fasern an. Die Rotorblätter werden am Standort der Windkraftanlage mit Sägen und Schneidwerkzeugen auf eine Länge von sechs bis zwölf Meter zerlegt - entsprechend den Containergrößen. Abbruch- und Demontearbeiten, im Besonderen das Zerkleinern von Werkstoffen, ist immer mit der Freisetzung von Stäuben verbunden. Dies stellt keine Besonderheit des Rückbaus von Windkraftanlagen dar, sondern betrifft genauso den Rückbau jeglicher Infrastruktur, etwa von Gewerbebauten, Brücken, Kraftwerken und vielem anderen mehr. Die Exposition mit Fasern und Stäuben ist substanzunabhängig mit Risiken für Mensch und Umwelt verbunden. Vorrangig ist hierbei die Exposition der Beschäftigten mit gesundheitsbeeinträchtigenden lungengängigen Stäuben zu beachten, die Mineralwolle, Glasfasern oder Carbonfasern und weiteres Mikroplastik enthalten. Die Belastung ist dabei von zusätzlichen Faktoren wie den konkreten Arbeitsschutzmaßnahmen und den Zerkleinerungsvorgängen, wie auch den thermischen Bedingungen abhängig.⁵⁰

Im vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Kompendium zum Recycling von Windkraftanlagen werden allgemeine arbeitsmedizinische Aspekte im Umgang mit Glasfasern und Carbonfasern erklärt. Abhängig von der Geometrie, Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften - wie der Härte der Fasern - können diese kanzerogen oder unbedenklich sein. Auch wenn gesundheitlich unbedenkliche Fasern in der Produktion eingesetzt wurden, können beim Rückbau infolge von Zerkleinerungsvorgängen unter Umständen toxikologisch relevante Fasern entstehen. Der Bericht zeigt auf, dass der arbeitsmedizinische Umgang bis dato dem von Mineralwolle ähnelt. Zugleich liegen wenige toxikologische Daten vor und oft ist unklar, welche von zahlreichen am Markt vorhandenen Typen von Carbon- oder Glasfasern in einer spezifischen Windkraftanlage verbaut wurden. In dem Gutachten wird ein voraussichtlich höheres Risiko von Carbonfasern als von Glasfasern vermutet. Für Carbonfasern gibt es zurzeit keine Grenzwerte für die Emission an Arbeitsplätzen oder in die Umwelt. In Bezug auf den Rückbau und das Recycling von Windkraftanlagen ist des Weiteren unklar, welche Partikel- und Faserkonzentrationen bei den verschiedenen Bearbeitungsprozessen entstehen und wie sich diese konkreten Fasern in den menschlichen Atemwegen verhalten.⁵¹

In der Grundlagenforschung befassen sich einige Arbeitsgruppen weltweit mit der Frage der humantoxikologischen Effekte von Carbonfasern in Experimenten an spezifischen Zellkultursystemen. Dabei bestätigt sich der Befund, dass die Effekte stark von den Charakteristika der Fasern

50 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau- und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, S. 160 f.

51 Ebd., S. 189, S. 208

abhängen und ein pauschaler Freispruch genauso wenig möglich ist, wie eine pauschale Einstufung.^{52 53}

Hinsichtlich mutmaßlicher ökotoxikologischer Risiken wirft der Bericht Fragen auf, etwa wie sich die freigesetzten Fasern und Epoxidharze in der Umwelt verhalten.⁵⁴

Bekannt ist, dass beim Schreddern von kunststoffhaltigen Abfällen abhängig von der Prozessführung, erhebliche Mengen Mikroplastik in die Umgebungsluft der Fabrik wie auch in das Abwasser, abgegeben werden können.⁵⁵ Bezüglich der gesundheitlichen Relevanz von Mikroplastik im Allgemeinen sei auf die Ausarbeitung „Mikroplastik: Ursachen, Verbreitung und Wirkung“ verwiesen.⁵⁶

* * *

-
- 52 Fujita, K. et al.: Pulmonary toxicity, cytotoxicity, and genotoxicity of submicron-diameter carbon fibers with different diameters and lengths, *Toxicology*, Volume 466, 2022, 153063, ISSN 0300-483X, <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.153063>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300483X21003851>.
- 53 Tölle, L., et al.: Characterization of Fiber Dust Resulting from Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics (CFRP) and Their Cell Toxicity. 2022, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 10, 1-16. doi: 10.4236/msce.2022.107001. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=118481>
- 54 Kühne, C. et al.: Abschlussbericht: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter; Umweltbundesamt TEXTE 92/2022; ISSN 1862-4804, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, S. 197
- 55 Brown, E. et al.: The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness. 2023, *Journal of Hazardous Materials Advances*. 10. 100309. 10.1016/j.hazadv.2023.100309.
- 56 <https://www.bundestag.de/resource/blob/880118/cfd8399ae3644eb10f8b08d580902b5d/Mikroplastik-data.pdf>