



KANN DAS WEG?

Umweltverträglicher Rückbau von Windrädern – Herausforderungen aus deutsch-französischer Sicht

von Markus Wagenhäuser

In Deutschland und Frankreich werden ab 2020 verstärkt Windenergieanlagen zurückzubauen sein. Der bestehende rechtliche Rahmen in Frankreich ist detaillierter und landesweit einheitlich, wohingegen die deutschen Regelungen auf Ebene der Bundesländer greifen. Zukünftige Handlungsfelder sind die Entwicklung neuer Recyclingverfahren, insbesondere für Rotorblätter, umfassende Recyclingkonzepte zur Erhöhung der Verwertungsquoten sowie Standards für einen umweltverträglichen Rückbau.



Nach Schätzungen der französischen Agentur für Umwelt und Energiemanagement werden insbesondere ab 2025 jährlich bis zu einem Gigawatt an Anlagenleistung vor dem Anlagenrückbau stehen.

Zum Jahresende 2020 läuft für die ersten Windenergieanlagen in Deutschland die Förderung gemäß dem im Jahr 2000 eingeführten Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aus. Die von den vier deutschen Übertragungsnetzbetreibern veröffentlichten EEG-Anlagenstammdaten zeigen, dass im Zeitraum 2020 bis 2025 über zwei Gigawatt Erzeugungsleistung pro Jahr aus der EEG-Förderung fallen wird (Deutsche Übertragungsnetzbetreiber 2018). In Frankreich wird aufgrund der geringeren Förderdauer von 15 Jahren in den kommenden Jahren ebenfalls eine Vielzahl von Anlagen das Ende des Förderzeitraums erreichen, im Jahr 2020 rund 360 Megawatt, jedoch wird von einem Weiterbetrieb über den Förderzeitraum hinaus ausgegangen (MTES 2018, S. 9). Nach Schätzungen der französischen Agentur für Umwelt und



Eine Anlagenleistung von zirka

1,0 Gigawatt

steht ab 2025 in Frankreich

jährlich vor dem Rückbau.

Energiemanagement (ADEME) werden insbesondere ab 2025 jährlich bis zu einem Gigawatt an Anlagenleistung vor dem Anlagenrückbau stehen (ADEME 2017, S. 62).

Vor Ende des Förderzeitraums stehen Anlagenbetreiber vor der Wahl zwischen verschiedenen Optionen: Sie können sich dazu entscheiden, die Anlagen über den Förderzeitraum hinaus weiter zu betreiben, etwa im Rahmen eines sogenannten „Power Purchase Agreement“ (PPA), bei dem Anlagenbetreiber den erzeugten Strom direkt an Stromkunden, oftmals industrielle Abnehmer, verkaufen. Darüber hinaus kann ein „Repowering“ durchgeführt werden, was durch den Rückbau des bestehenden Parks und den Einsatz größerer Masten und leistungsstärkerer Turbinen am gleichen Standort erfolgt. Zudem können Altanlagen auch im Zuge eines „Second Life“ rückgebaut und ins Ausland verkauft werden, wo diese weiter genutzt werden. Ansonsten wird der Park ohne Weiterverwendung zurückgebaut.

Nachfolgend werden technische Grundlagen hinsichtlich der Materialien und des derzeitigen Entsorgungszyklus von Windenergieanlagen dargestellt. In einem zweiten Schritt werden die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen für den Rückbau von Anlagen in Deutschland und in Frankreich erläutert. Abschließend wird die weitere Entwicklung bezüglich des Anlagenrückbaus anhand technischer und ökologischer Aspekte analysiert.

Neben der Darstellung der verwendeten Materialien einer Windenergieanlage wird nachfolgend der Status Quo hinsichtlich des Rückbaus von Anlagen in Deutschland und in Frankreich geschildert.

VERWENDETE MATERIALIEN EINER WINDENERGIEANLAGE

Die Materialien, die für Windenergieanlagen verwendet werden, lassen sich in mineralische Materialien, Metalle und Kunststoffe unterscheiden. Eine Windenergieanlage besteht dabei zu überwiegenden Teilen aus Beton (60 bis 65 Gewichts-Prozent) im Fundament und im Turm sowie Stahl (30 bis 35 Prozent) je nach Bauweise des Turms (Stahlrohrturm oder Betonturm). Für Offshore-Anlagen liegt der Anteil von Stahl deutlich höher. (VDI 2014, S. 19)

Besonderes Augenmerk bei der Weiterentwicklung zu einem umfassenden und nachhaltigen Recyclingkonzept ist auf die aus Verbundwerkstoffen bestehenden Rotorblätter zu legen. Rotorblätter besitzen einen Masseanteil von nur rund drei Prozent, sie verursachen aber bei der Herstellung rund ein Viertel der Kosten. Zudem können bis zu 30 Prozent Produktionsabfall pro Rotorblatt anfallen (Pehlken et al. 2017, S. 248). Die Rotorblätter werden mit dem Ziel gefertigt, mit möglichst wenig Gewicht besonders hohen Kräften standzuhalten. Produzenten verwenden Verbundstrukturen aus verschiedenen Materialien:

- Fasern zur Verstärkung: Glasfasern (GFK) oder Carbonfasern (CFK),
- Polymermatrix zur Verklebung: Epoxid-, Polyester- oder Vinylesterharze,
- Balsaholz oder Polyvinylchlorid für den Kern: Sogenannte „Sandwichstruktur“,
- Metalle: Kupferverdrahtung, Stahlbolzen,
- Beschichtungen.

Bisher wurden im Onshore-Bereich hauptsächlich aus Glasfasern bestehende Rotorblätter gefertigt, die rund 60 bis 70 Prozent (bezogen auf die Gesamtmasse) ausmachen, der Rest entfällt auf das Harz und weitere Materialien. Bei den ersten aus der Förderung fallenden Anlagen handelt es sich um Anlagen mit einer Nennleistung unter einem Megawatt und Rotorblattlängen unter 40 Metern (Pehlken et al. 2017, S. 247). Hinsichtlich des Recyclings hat die Verwendung von mit Glasfasern verstärkten Kunststoffen gewisse Nachteile, so etwa der niedrige Preis für die Rohfaser, ein vergleichsweise niedriger Heizwert sowie ein hoher Aschegehalt (Lange 2018, S. 2).

Die erheblich leichteren und teureren Carbonfasern kommen vor allem bei den größeren, modernen Anlagen mit Rotorblattlängen von über 70 Metern zum Einsatz (BWE 2017, S. 1-2). Dies kann mit den im Vergleich zu Glasfasern vorteilhafteren

mechanischen Eigenschaften von Carbonfasern erklärt werden. Es wird erwartet, dass Carbonfasern im Bereich der Windenergie zunehmend zum Einsatz kommen (Pehlken et al. 2017, S. 254).

Permanentmagnet-Generatoren, die ab 2010 in Deutschland zunehmend zum Einsatz kamen, derzeit aber beim Anlagenzubau deutlich rückläufige Zahlen vermelden, enthalten Seltenerdmetalle. Die Synchrongeneratoren mit Permanentmagneten sparen Kupfer ein, benötigen dafür geringe Mengen des Seltenerdmetalls Neodym für eine hoch-magnetische Wirkung und für die notwendige Temperaturstabilität Dysprosium und Terbium (VDI 2014, S. 21-23). Diese Generatoren haben Stand 2018 einen Anteil von deutlich unter zehn Prozent am Bestand der Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland (Fraunhofer IEE 2018, S. 37).

Aus Glasfasern bestehende

Rotorblätter machen rund

60 bis 70 Prozent

der Gesamtmasse aus.



STATUS QUO DES ANLAGEN-RÜCKBAUS

Deutsche WindGuard schätzt, dass in Deutschland bis Mitte 2017 im Zuge von Repowering-Vorhaben bereits rund 1,6 Gigawatt Erzeugungsleistung zurückgebaut wurden (Deutsche WindGuard 2017, S. 30). Laut dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ist anzunehmen, dass der Rückbau in Deutschland bisher häufig durch ein Fällen der Anlage erfolgt ist (VDI 2014, S. 34). Faserverbundteile der Rotorblätter wurden in der Vergangenheit auf Depo- nien entsorgt, was in Deutsch- land durch Änderung relevanter Verordnungen seit einiger Zeit nicht mehr möglich ist (BWE 2017, S. 3).

In Frankreich wurde im Jahr 2010 die erste Anlage zurückge- baut. Nach Einschätzung der ADEME haben industrielle Akteure in Frankreich jedoch bisher nur sehr vereinzelt Erfahrungen mit dem Rückbau von Windenergieanlagen gesammelt (ADEME 2017, S. 62). Wie in Deutschland ist ein Weiterverkauf ausgedienter Anlagen ins Ausland eine bestehende Alternative zum Anlagenrückbau ohne Weiter- verwendung (ADEME 2017, S. 62).

Gemäß aktuellen Untersuchungen des Bundesministe- riums für Wirtschaft und Energie sollten die Rückbau- kosten bei rund 80 Euro pro Kilowatt liegen, sie dürften jedoch erhebliche Bandbreiten aufweisen (BMWi 2018, S. 4). In einem Vortrag im Rahmen einer Konferenz des Deutsch-französischen Büros für die Energiewende hat ein französisches Recycling-Unternehmen eine Schätzung für die Rückbaukosten vorgestellt und dabei je nach verwendetem Verfahren und abhängig vom Einzelfall eine

Rückbaukosten können zwischen
60.000–125.000 €
pro Anlage betragen.







Der Rückbau stellt die Akteure vor technische Probleme, da die

Verfahren aufwendig

und Emissions- und Arbeitsschutz-
fragestellungen zu beachten sind.

Bandbreite von 60.000 bis 125.000 Euro in Frankreich pro Anlage angegeben (Henno et al. 2018, S. 9). Die Kosten für den Anlagenrückbau hängen von einer Reihe von Faktoren ab, so unter anderem von möglichen Synergien im Rahmen eines Repowerrings und der Preisentwicklung für die recycelten Materialien.

Hinsichtlich des Rückbaus erscheinen neben der Sprengung oder Fällung der Anlage Konzepte unter Einsatz eines Krans als umweltverträglicher. Da der Einsatz eines Krans mit hohen Kosten verbunden ist, würde dies wohl zu höheren Rückbaukosten führen. Für Beton und Stahl bestehen bereits jetzt Möglichkeiten einer kostenneutralen Entsorgung, die zudem einen Beitrag zur Einsparung von Ressourcen liefern können. So kann der zerkleinerte Beton etwa als Untergrundverfüllung im Straßenbau eingesetzt werden (VDI 2014, S. 35). Auch für die Entsorgung von Metallen der Gondel bestehen funktionierende Entsorgungsketten. Es wird davon ausgegangen, dass bereits jetzt zwischen 80 und 90 Prozent der verwendeten Materialien bezogen auf ihre Gesamtmasse, verwertbar sind (Seiler et al. 2013).

In Frankreich werden gemäß einer Analyse im Auftrag der ADEME die Rotorblätter derzeit nahezu vollständig thermisch verwertet (ADEME 2015, S. 34). Derzeit konnten sich in beiden Ländern echte stoffliche Verwertungsoptionen für die Rotorblätter nicht durchsetzen (Pehlken et al. 2017, S. 257). Bei Verwertung der Rotorblätter können diese entweder als Ganzes zum Entsorger gebracht und dort mittels Baggerschere zerkleinert werden oder man zerkleinert die Anlagen noch am Standort, wodurch ein Transport ohne Sondergenehmigungen möglich ist (BWE 2017, S. 3). Erfahrungen im großtechnischen Einsatz bestehen mit dem Zersägen der Rotorblätter mit Diamantseilsägen. Weitere Verfahren sind das Wasserstrahlschneiden und das hydraulische Scheren. Die Zerkleinerung stellt die Akteure jedoch vor technische Probleme, da die Verfahren aufwendig und zudem Emissions- und Arbeitsschutzfragestellungen zu beachten sind. Auch besteht ein hoher Verschleiß an den Werkzeugen (Seiler et al. 2017, S. 15).

Der Heizwert von Rotorblättern liegt über dem von Holz, so dass sich eine Verwertung beispielsweise in Öfen der Zementproduktion anbietet (BWE 2017, S. 3). Hier kann der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe herkömmliche Brennstoffe ersetzen, zudem können die festen Rückstände Kalkstein und Quarzsand substituieren. Ein sogenanntes „Co-Processing“ im Zementwerk wird in Deutschland bereits in einer Anlage realisiert (Lange 2018, S. 12). Hierbei ist von einer stofflich-thermischen Verwertung zu sprechen. Die reine thermische Verwertung der Kunststoffe in einer Abfallverbrennungsanlage verläuft unvollständig und widerspricht



In der Regel muss das

gesamte Fundament

zurückgebaut werden.

grundsätzlich dem Vorrang einer stofflichen vor einer energetischen Verwertung (siehe Kapitel 2). Zudem ist die Verbrennung von Glas- und Carbonfasern nicht unproblematisch, da beispielsweise Filteranlagen verstopfen können (Lange 2018, S. 4–5). Auf mögliche Verbesserungen dieser Prozesse wird in Kapitel 3 eingegangen.

Im Unterschied zu Anlagen an Land, wo ein Rückbau und eine Entsorgung möglich und praktikabel erscheinen, ist das Thema bezüglich Offshore-Windanlagen zeitlich noch weiter entfernt. In Deutschland müssen bis zum Jahr 2040 nach Schätzungen des Vereines Deutscher Ingenieure trotzdem bereits zirka 1.800 Anlagen rückgebaut werden (VDI 2014, S. 34). Im Offshore-Bereich sind durch die Verwendung sehr großer Rotorblätter CFK-verstärkte Teile geläufig.

BESTEHENDE RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Nachfolgend sollen die bestehenden Rahmenbedingungen hinsichtlich des Anlagenrückbaus in Deutschland und Frankreich aus rechtlicher Sicht betrachtet werden. In Deutschland sind die Genehmigungsbehörden der jeweiligen Bundesländer von zentraler Bedeutung, wohingegen in Frankreich die Festsetzung der Regelungen auf nationaler Ebene erfolgt. Zudem ergibt sich durch die EU-Abfallrahmenrichtlinie eine wichtige Vorgabe, die bedeutende Implikationen im Bereich der Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung in beiden Ländern entfaltet.

RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN DES RÜCKBAUS VON ANLAGEN IN DEUTSCHLAND

Zur Erlangung einer Betriebsgenehmigung müssen Anlagenbetreiber seit 2004 als zusätzliche Genehmigungsvoraussetzung eine persönliche Verpflichtungserklärung zum Rückbau der betreffenden Windenergieanlage abgeben (Energieagentur NRW 2015). Der Rückbau einer Windenergieanlage ist genehmigungspflichtig und wird von den Bauaufsichtsbehörden auf Ebene der Bundesländer überprüft. Für den Rückbau und die Entsorgung ausgedienter Windenergieanlagen sind deren Letztbesitzer verantwortlich. Die Rückbaukosten sind durch den Anlagenbetreiber zu tragen. Die rechtliche Grundlage hierfür schafft § 35 Baugesetzbuch (BauGB).

Gemäß § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB sind neben den Anlagen auch die Bodenversiegelungen zu entfernen. Der genaue Umfang des erforderlichen Anlagenrückbaus hängt von den Auflagen im Genehmigungsverfahren für die einzelnen Windenergieprojekte und somit vom jeweiligen Landesrecht ab. Beispielhaft wird die Handhabung in zwei Bundesländern angeführt, in Nordrhein-Westfalen und in Schleswig-Holstein. Gemäß dem Windenergie-Erlass des Landes Nordrhein-Westfalen vom 8. Mai 2018 müssen Betreiber einer Windenergieanlage eine Erklärung abgeben, nach der „das Vorhaben einschließlich Nebenanlagen nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und Bodenversiegelungen (Fundament, Zuwegungen) zu beseitigen“ sind (Ministerialblatt NRW 2018, Ziff. 5.2.2.4). In der Antwort der Landesregierung Schleswig-Holsteins auf eine Kleine Anfrage vom 4. März 2018 wird angegeben: „In der Regel muss das gesamte Fundament zurückgebaut werden. Die neben dem Vorhaben zu beseitigenden Bodenversiegelungen

(z. B. Zuwegungen) umfassen auch die für die Anlage erforderliche Infrastruktur“ (Schleswig-Holsteinischer Landtag 2018, S. 2).

Die von den Betreibern abgegebenen Verpflichtungserklärungen bieten für den Fall, dass gegen diese verstoßen wird, noch keine Sanktionsmöglichkeiten. Um Probleme zu vermeiden, etwa im Fall einer Insolvenz von Anlagenbetreibern, sieht der Gesetzgeber auf Grundlage des § 35 Abs. 5 S. 3 BauGB in den jeweiligen Genehmigungen Auflagen hinsichtlich der Sicherstellung der Rückbaukosten vor, etwa durch finanzielle Rücklagen oder Bankbürgschaften. Der Betreiber muss regelmäßig bis spätestens zum Baubeginn eine finanzielle Sicherheitsleistung, oftmals durch eine selbstschuldnerische Bankbürgschaft, erbringen (Energieagentur NRW 2015). Zudem wird in der Regel ein Rückbau- und Entsorgungskonzept gefordert. Die Überprüfung der Einhaltung dieser Vorgaben obliegt den Genehmigungsbehörden auf Länderebene (BMW 2018, S. 4).

Für die Sicherheitsleistung gibt es ebenso wie für den Umfang des Anlagenrückbaus keine bundesweite Berechnungsformel, zudem hängen die Rückbaukosten stark vom Einzelfall und einer Reihe weiterer Einflussfaktoren ab, so etwa von der verwendeten Rückbaumethode. In Nordrhein-Westfalen wird beispielsweise ein Wert von 6,5 Prozent der Gesamtinvestitionskosten für den Anlagenrückbau angenommen (Ministerialblatt NRW 2018, Ziff. 5.2.2.4). In Schleswig-Holstein wird dagegen entweder von zehn Prozent der Rohbaukosten oder von vier Prozent der Herstellungskosten ausgegangen

In Frankreich sind die Rückbaukosten durch die **Anlagenbetreiber** zu tragen.





(Schleswig-Holsteinischer Landtag 2012, S. 1). Im begründeten Einzelfall kann jedoch von diesen Werten abgewichen werden und eine höhere oder niedrigere Sicherheitsleistung etabliert werden.

RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN DES RÜCKBAUS VON ANLAGEN IN FRANKREICH

In Frankreich sind Anlagenbetreiber am Ende der Nutzungsdauer laut Artikel L.553-3 des französischen Umweltgesetzbuchs unabhängig vom Grund für die Einstellung der Nutzung dafür verantwortlich, die Anlagen und das umliegende Gelände zurückzubauen. Im Falle einer Betreiberinsolvenz ist die Muttergesellschaft des Betreibers verantwortlich. Die erforderlichen Rückbaumaßnahmen werden in der Genehmigung für das jeweilige Projekt präzisiert.

Genauso wie in Deutschland legt auch das französische Gesetz fest, dass der Anlagenbetreiber eine Sicherheitsleistung vorzuhalten hat (Artikel L.553-3 frz. Umweltgesetzbuch). Diese Sicherheitsleistung greift in bestimmten Fällen, so unter anderem beim Eintritt der Insolvenz des Betreibers. Der Betrag der Sicherheitsleistung ist auf nationaler Ebene auf 50.000 Euro pro Windturbine festgelegt.

Die Sicherheitsleistung ist in Frankreich auf

50.000 Euro

pro Windturbine festgelegt.



Der Rückbau der Anlagen richtet sich nach einem in der Gesetzgebung definierten Prozess. Zunächst muss der Betreiber gemäß Verordnung n°2011-985 vom 23. August 2011 und Artikel R.553-7 des französischen Umweltgesetzbuchs mindestens einen Monat im Voraus den Präfekten des jeweiligen Departements in Kenntnis setzen, dass der Betreiber den Rückbau der Anlage plant. In diesem Rahmen präzisiert der Betreiber ebenfalls die Details der beabsichtigten Maßnahmen. Bei Projekten mit einer installierten Leistung von über 50 Megawatt muss zudem der Minister des französischen Umweltministeriums benachrichtigt werden. Die einzelnen Elemente der Windenergieanlage werden je nach verwendeter Technologie entsprechend zurückgebaut. Grundsätzlich gilt, dass der Rückbau dem Prozess des Aufbaus umgekehrt folgt (Eno Energy 2017, S. 7).

Im Erlass vom 26. August 2011 in Verbindung mit der Modifikation des Erlasses vom 6. November 2014 wird festgelegt, dass der Anlagenrückbau folgende Elemente umfasst:

- Rückbau des Systems zum Netzanschluss, Demontage von Verteilerstationen und Kabeln in einem Umkreis von zehn Metern um das Windrad und die Verteilerstationen.
- Aushub der Fundamente und Ersatz mit Materialien, die vergleichbare Merkmale aufweisen:
 - Bis zu einer Tiefe von mindestens 30 Zentimetern, wenn der Grund nicht für landwirtschaftliche Zwecke genutzt wird oder massives Gestein tieferen Ausgrabungen entgegensteht,
 - bei Waldflächen bis zu einer Mindesttiefe von zwei Metern,
 - in anderen Fällen bis zu einer Tiefe von mindestens einem Meter.
- Instandsetzung von Kranflächen und Zufahrtsstraßen in einer Tiefe von 40 Zentimetern und Ersatz durch Materialien mit vergleichbaren Merkmalen, es sei denn, dass der Grundstückseigentümer diese im derzeitigen Zustand erhalten möchte.
- Abbruch- und Demontageabfälle sind zu verwerten und zu entsorgen.

Das französische Ministerium für ökologischen und solidarischen Wandel (MTES) weist in einer Antwort auf eine Anfrage eines Senatsabgeordneten zudem darauf hin, dass privatrechtliche Vereinbarungen zwischen Grundstückseigentümern und Anlagenbetreibern durchaus restriktivere Bedingungen hinsichtlich des Anlagenrückbaus setzen können, als dies vom Gesetzesrahmen des französischen Staates vorgesehen ist (Journal Officiel Sénat 2018, S. 2281).

ABFALLBEWIRTSCHAFTUNG BEI WINDENERGIE-ANLAGEN: EU-ABFALLRAHMENRICHTLINIE

Auf Ebene der Europäischen Union ist hinsichtlich des Anlagenrückbaus die Abfallrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2008 (Richtlinie 2008/98/EG) von besonderer Bedeutung, die in Deutschland ins Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) übertragen wurde und in Frankreich insbesondere ins Umweltgesetzbuch (Code de l'environnement) Eingang gefunden hat. Ein zentraler Bestandteil der EU-Richtlinie ist die Abfallhierarchie des Artikels 4, die eine Prioritätenfolge im Bereich der Abfallvermeidung und -bewirtschaftung definiert (vergleiche § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz sowie Artikel L.541-1 frz. Umweltgesetzbuch):

- a. Vermeidung,
- b. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
- c. Recycling,
- d. sonstige Verwertung, zum Beispiel energetische Verwertung,
- e. Beseitigung.

Gemäß dieser Hierarchie muss beim Anlagenrückbau die Priorität bei einer Laufzeitverlängerung für Bestandsanlagen sowie bei materialeffizienteren Rotorblättern liegen (Vermeidung). Als zweite Priorität gilt es, ein „Second Life“ für die Wiederverwendung von Anlagen zu finden (Vorbereitung zur Wiederverwendung). Die dritte Priorität liegt dann im Recycling und hierbei zunächst bei der stofflichen Entsorgung vor einer energetisch-stofflichen Verwertung (Beispiel Zementproduktion siehe I.2.) sowie einer rein thermischen Verwertung.

Bei der sonstigen Verwertung und Beseitigung gibt es weitere Einschränkungen auf nationaler Ebene. So kann gemäß dem KrWG eine energetische Verwertung erst ab einem Heizwert (Hi) von mindestens elf Megajoule pro Kilogramm erfolgen. Die geltende deutsche Deponieverordnung von 2009 bestimmt zudem, dass der organische Anteil an Deponieabfällen nicht größer als fünf Prozent sein darf. Dadurch ist eine Deponierung etwa der Rotorblätter von Windenergieanlagen in Deutschland ausgeschlossen, schließlich bestehen Rotorblätter durch die eingesetzten Harze zu rund 30 Prozent aus organischen Materialien. Durch den Verkauf von Anlagen beispielsweise ins EU-Ausland würden solche Vorgaben nicht greifen.





Die Deponierung der Rotorblätter

ist in Deutschland

ausgeschlossen.

ZUKÜNFTIGE PERSPEKTIVEN DES ANLAGENRÜCKBAUS

Im abschließenden Teil soll die zukünftige Entwicklung des Rückbaus von Windenergieanlagen aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Perspektive dargestellt werden. Zunächst soll der voraussichtliche, zukünftige Umfang des Anlagenrückbaus dargestellt werden. Des Weiteren soll auf neue technische Lösungen eingegangen werden, um abschließend Möglichkeiten für umweltverträgliche Standards hinsichtlich des Anlagenrecyclings aufzuzeigen.

ZUKÜNFTIGER ANLAGENRÜCKBAUBEDARF

Die Geschwindigkeit des erforderlichen Anlagenrückbaus richtet sich nach den Entscheidungen der Anlagenbetreiber. Bei einem Anstieg des Börsenstrompreises könnten Betreiber im Weiterbetrieb ihrer Anlagen nach 2020 eine interessante Option sehen (Deutsche WindGuard 2017, S. 68). Dies würde den Umfang der Rückbaumaßnahmen zeitlich verzögern. Grundsätzlich scheint aus technischer Sicht ein Betrieb von über 20 Jahren abhängig vom verwendeten Anlagentyp problemlos möglich. (Deutsche WindGuard 2017, S. 69)

Ein weiterer Einflussfaktor auf die zeitliche Verteilung des notwendigen Anlagenrückbaus ist ein mögliches Repowering von Anlagen. In Deutschland hatte man durch den sogenannten „Repowering-Bonus“, der mit der Neufassung des EEG von 2009 eingeführt und zum Jahresende 2014 abgeschafft wurde, einen Anreiz für den Rückbau und die Verwendung leistungsstärkerer Maschinen am gleichen Standort geschaffen. Dies hatte insbesondere vor Ablauf des Bonus eine verstärkte Inanspruchnahme zur Folge (FA Wind 2018, S. 48). In Frankreich wurde im Juli 2018 eine Anweisung der Regierung hinsichtlich des Repowerings von Anlagen herausgegeben (République Française 2018).

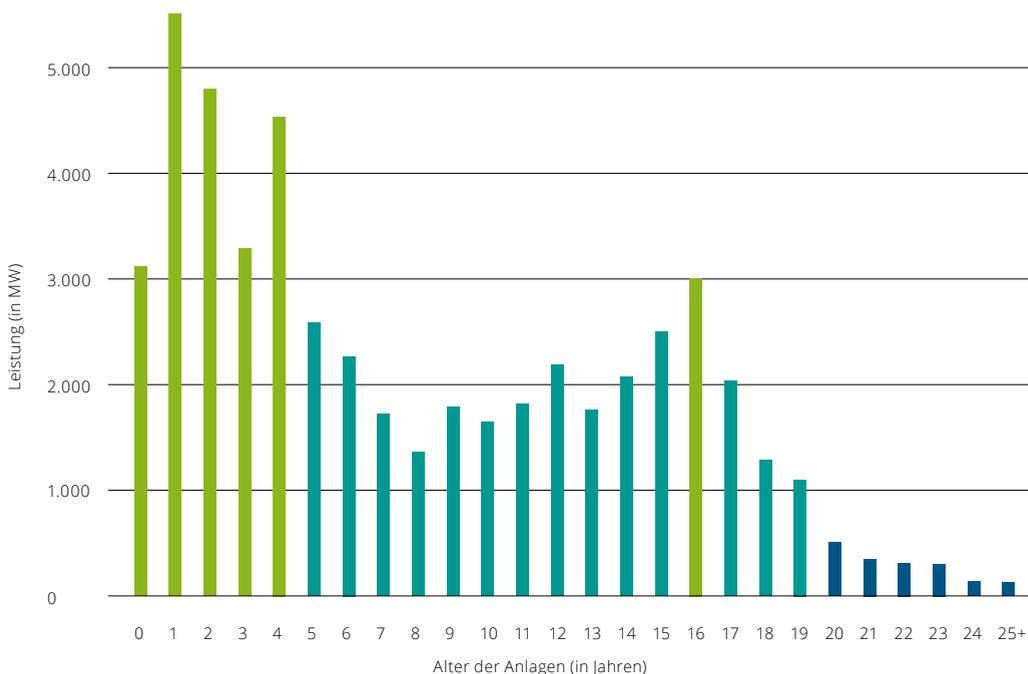
Vorläufige Ergebnisse einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) zum ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen in Deutschland beinhalten eine Prognose hinsichtlich der Anzahl an Windenergieanlagen, die ab 2021 keine EEG-Förderung mehr erhalten. Für das Jahre 2021 sind dies mehr als 5.000 Anlagen, und bis 2030 jährlich mehr als 1.000 Anlagen (Langner 2018, S. 10). Die nachfolgende Abbildung zeigt zudem Zahlen des Fraunhofer Instituts zur derzeitigen Altersstruktur von Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland nach installierter Leistung. Dies veranschaulicht den deutlich steigenden Anteil von Anlagen, die in den kommenden Jahren in Deutschland aus der Vergütung fallen.

Im Rahmen der zuvor erwähnten UBA-Studie wurde darüber hinaus eine Abfall- und Kostenprognose für den Zeitraum bis 2040 erstellt. Für Stahl werden im Jahr 2021 über 840.000 Tonnen prognostiziert und bis 2030 jährlich über 300.000 Tonnen. Zudem kann pro Jahr von etwa 30.000 Tonnen GFK-Verbundwerkstoffen im Zeitraum von 2021 bis 2025 ausgegangen werden (Langner 2018, S. 13). Ältere Zahlen, etwa des VDI sprechen von mehr als 10.000 Tonnen an Rotorblättern ab 2024 (VDI 2014, S. 38). Dies zeigt, dass insbesondere für Glasfasern, jedoch auf

lange Sicht auch für Carbonfasern eine große Menge an recyclingfähigen Materialien zu verwerten sein wird.

Eine Studie im Auftrag der Regionaldirektion für Umwelt, Raumplanung und Wohnungswesen (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, DREAL) der französischen Region Grand Est aus dem Jahr 2016 hat sich mit den Möglichkeiten eines umfassenden Konzepts für den Anlagenrückbau in Frankreich, mit besonderem Fokus auf die Region Grand Est, auseinandergesetzt. Demzufolge ist in Frankreich zu unterscheiden zwischen zwei „Wellen“ des Rückbaus. Anlagen, die vor 2005 in Betrieb genommen wurden, werden nach Ansicht der Studie innerhalb von 15 Jahren vom Netz gehen, wohingegen die Studie für Anlagen, die unter das Fördersystem ab 2005 fallen, von einer Verlängerung der Nutzungsdauer ausgeht und somit von einer zweiten „Welle“ des Rückbaus, insbesondere

Altersstruktur von Onshore-Windenergieanlagen



Altersstruktur von Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland nach installierter Leistung, Stand 2018.

Quelle: Windmonitor von Fraunhofer IWES 2018, Darstellung DFBEW.

ab 2030 (DREAL Grand Est 2016a, S. 23). Im Gegensatz dazu geht die ADEME unter Annahme einer durchschnittlichen Nutzungsdauer der Anlagen von bis zu 20 Jahren bereits ab 2025 von jährlich bis zu einem Gigawatt an Anlagenleistung aus, die vor dem Anlagenrückbau stehen könnte (ADEME 2017, S. 62). Dabei wird von rund 3.000 bis 15.000 Tonnen pro Jahr an Verbundwerkstoffen ausgegangen (ADEME 2015, S. 34).

UMFASSENDE KONZEPTE ZUR ERHÖHUNG DER VERWERTUNGSQUOTEN

Hinsichtlich der Entsorgung von Rotorblättern wird im Rahmen einer Vielzahl von Projekten zur Optimierung der Entsorgungsprozesse gearbeitet, um den Anteil der stofflichen Verwendung zu erhöhen. So forscht beispielsweise das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) zur Zerkleinerung von Rotorblättern direkt am Standort mittels materialspezifischer Sprengungen (Seiler et al. 2017). Auch kann als weitere Option der stofflichen Verwertung das Material als Verbund bestehen bleiben, um dann schrittweise zerkleinert und als Granulat wiederverwendet zu werden (Pehlken et al. 2017, S. 257).

Für die teuren Carbonfasern erscheint eine stoffliche Verwertung vielsprechender als für Glasfasern, vor allem durch das Verfahren der Pyrolyse. Hierbei werden die Verbindungen zwischen den Fasern und den Harzen durch Erhitzen unter Ausschluss von Sauerstoff aufgebrochen. In verschiedenen Aufbereitungsschritten werden die

Recycling aus Windenergieanlagen:

Für das Jahr 2021 werden über

840.000 Tonnen

Stahl prognostiziert.



freigelegten Fasern zu qualitativ hochwertigen Faserprodukten verarbeitet (CFK Recycling 2018). Es handelt sich um ein sehr energie- und kostenintensives Verfahren (BWE 2017, S. 4). Da jedoch zukünftig bedeutende Mengen von Carbonfasern benötigt werden, erscheint eine Rückgewinnung der Fasern insbesondere aus der Perspektive der Kreislaufwirtschaft besonders wichtig (VDI 2014, S. 40).

Einige chemische Verfahren könnten ebenfalls eingesetzt werden, unter anderem die Solvolyse, Hydrierung und Alkoholyse. Bei der Solvolyse werden etwa organische Komponenten mit einem reaktiven Lösemittel in kurzkettige Bruchstücke zersetzt (Seiler et al. 2017, S. 19). Diese Verfahren haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zur Pyrolyse weniger energieintensiv sind (BWE 2017, S. 5). Die Möglichkeit zum

Eine Rückgewinnung der
Carbonfasern
ist für die Kreislaufwirtschaft
besonders wichtig.



größtechnischen Einsatz ist für diese Verfahren noch nachzuweisen und wird im Rahmen von Forschungsvorhaben zu klären sein.

Im Sinne einer Ressourcenschonung wäre es nach Einschätzung des VDI denkbar, den Einsatz von Recycling-Beton, etwa bei der Errichtung neuer Bauwerke, zu erhöhen. Eine Weiterverwendung von Permanentmagneten könnte bei einer Standardisierung möglich sein, wodurch der Rohstoffbedarf an Seltenerdmetallen verringert werden könnte. Für Seltenerdmetalle könnten sich aufgrund der verstärkten Nutzung, etwa in der Automobilbranche, zudem Recyclingkonzepte ergeben (VDI 2014, S. 37).

Ebenfalls wird an der Weiterentwicklung der verwendeten Materialien in Windenergieanlagen, etwa für Rotorblätter, gearbeitet. Hier ist das von der EU geförderte Projekt WALiD zu nennen, in dessen Rahmen Rotorblätter aus thermoplastischen Verbundwerkstoffen entwickelt werden (WALiD 2018). Durch Materialinnovationen könnten zukünftig Entsorgungsprozesse vereinfacht werden (BWE 2017, S. 5).

Verschiedene Akteure in Deutschland und in Frankreich beschäftigen sich mit der Möglichkeit der Etablierung umfassender Konzepte zur ressourcenschonenden Bewirtschaftung der Stoffströme von Windenergieanlagen – unter Beteiligung einer Vielzahl von Akteuren. Beispielhaft sind das von der Europäischen Union geförderte Projekt Recycle-Wind zur Konzeption eines selbstlernenden Verwertungsnetzwerks für Rotorblätter zu nennen (Albers et al. 2018, S. 22) sowie die bereits angesprochene Studie der DREAL Grand Est hinsichtlich einer Plattform für das Management der Stoffströme von Windenergie mit Fokus auf den östlichen Teil Frankreichs (DREAL Grand Est 2016).

Eine Vielzahl von Faktoren bestimmt die Umsetzbarkeit solcher Konzepte. Gerade die Preisentwicklung für die in Rotorblättern



eingesetzten Verbundstoffe, die großen Schwankungen unterliegt, hat starke Auswirkungen auf den möglichen finanziellen Gegenwert einer stofflichen Verwertung. In der Zukunftsstrategie der ADEME für die Windenergiebranche aus dem Jahr 2017, wird in einer der vorgeschlagenen Maßnahmen die Unterstützung des

Aufbaus umfassender Konzepte für das Recycling von Rotorblättern gefordert, unter anderem im Rahmen eines Investitionsprogramms. Zudem soll die Recyclingfähigkeit der Materialien auch Berücksichtigung in der Gestaltung der Ausschreibungen für Neuanlagen finden (ADEME 2017, S. 301–302).

Neue Impulse werden in Deutschland auch von der bereits angesprochenen UBA-Studie zum ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen erhofft, die bis

Mitte 2019 unter anderem Möglichkeiten zur Erhöhung der Verwertungsquote für die Materialien von Windenergieanlagen klären soll (BMW 2018, S. 3). Nach Angaben der Bundesregierung gibt es zudem Forschungsaktivitäten der Recyclingwirtschaft hinsichtlich der Entsorgung von Windenergieanlagen, die unter anderem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert werden (BMW 2018, S. 3).

Aus ökologischer Perspektive und aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz erscheint ein umweltverträglicher Anlagenrückbau von Bedeutung. Zukünftig könnten hierbei verbindliche Standards etabliert werden, wie diese etwa für Deutschland in oben erwähnter UBA-Studie derzeit erarbeitet werden. In diesem Rahmen sind verschiedene Fragestellungen zu klären, unter anderem, welcher stoffliche Verwertungsanteil beim Anlagenrückbau anzustreben ist, und welche Verfahren beim Rückbau und bei der anschließenden Verwertung kostendeckend betrieben werden können. Zudem erscheint aus Gründen des Umweltschutzes ein vollständiger Rückbau, etwa der Fundamente, notwendig. Hiermit könnte ein bedeutender Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden. Zudem können aus diesen Ergebnissen Erkenntnisse für die zukünftige Konzeption von Anlagen gewonnen werden. ■

Aus ökologischer Perspektive

und aus Gründen der

öffentlichen Akzeptanz

erscheint ein umweltverträg-

licher Anlagenrückbau von

Bedeutung.



MARKUS WAGENHÄUSER

Markus Wagenhäuser ist Referent für Windenergie beim Deutsch-französischen Büro für die Energiewende (DFBEW). Das DFBEW ist eine 2006 auf Initiative der beiden Staaten gegründete Plattform zum Informations- und Erfahrungsaustausch im Bereich der Energiewende. Herr Wagenhäuser kümmert sich um den grenzüberschreitenden Austausch von Politik, Wirtschaft und Forschung bezüglich der Windenergie.