

# Möglichkeiten zur Wiederverwertung von Rotorblättern von Onshore-Windenergieanlagen

Stand Dezember 2017

**Bis zum ersten Halbjahr 2017 gab es ca. 28.000 Onshore-Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland mit einer installierten Leistung von etwa 48.000 Megawatt. Von Jahr zu Jahr werden aber auch immer mehr WEA abgebaut.**

Nicht für alle Bestandsanlagen findet sich ein Zweitmarkt, einige müssen auch recycelt werden. Somit wachsen die Anforderungen an die nachhaltige Herstellung von Windenergieanlagen und an das Recycling nicht mehr verwendeter Bestandteile. Derzeit können 80 – 90 Prozent der Komponenten einer WEA<sup>1</sup>, bezogen auf ihre Gesamtmasse, wiederverwertet werden. Kategorisiert man die Materialien, die für die Hauptkomponenten einer WEA verwendet werden, lassen sich diese prinzipiell in mineralische Materialien (Beton), Metalle und Kunststoffe unterscheiden. Die größte Herausforderung hierbei ist die Verwertung der in den Rotorblättern enthaltenen Verbundwerkstoffe.

## Zusammensetzung des Rotorblatts

Die Rotorblätter einer WEA sind in der Regel aus Glasfaser (GFK), Kohlefaser (CFK) und Polyester-, Vinylester- oder Epoxydharz gefertigt. Hinzu kommen zusätzliche Stützmaterialien in den Faserverbundbauteilen zum Einsatz. Ebenso werden zur Blitzableitung metallische Leitungen ins Blatt integriert, diese sind meist aus Kupfer oder Aluminium. Zur Verhinderung von Eisbildung werden weitere Metalle in Form von Heizelementen an der Vorderkante des Rotorblatts verwendet. Ziel der Herstellung ist eine möglichst optimale Materialzusammensetzung, um mit möglichst wenig Gewicht möglichst viel Kräfte auszuhalten. Daher werden Verbundstrukturen aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet:

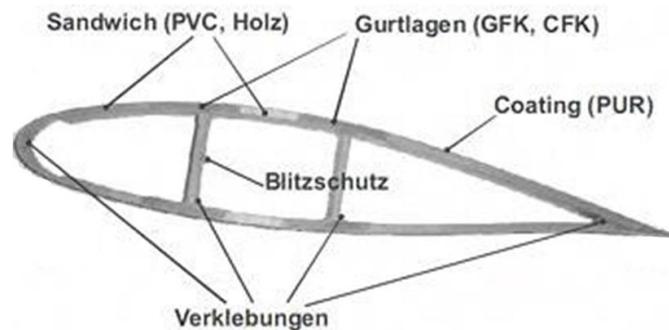
- Verstärkungsfasern (Glas, Kohlenstoff, Aramid oder Basalt)
- Polymermatrix (Duroplaste wie Epoxide, Polyester, Vinylester, Polyurethan oder Thermoplaste)
- Sandwich-Kern (Balsaholz, welches aber wegen oft schwieriger Beschaffung durch Polyvinylchlorid in Form von PVC-Schaum beziehungsweise PET ersetzt wird)
- Beschichtungen (PE, PUR)
- Metalle (Kupferverdrahtung, Stahlbolzen)

In der Regel werden neue Rotorblätter mit Epoxydharz gefertigt, da Polyester Wasser über die Lebensdauer hinweg durch Osmose aufnimmt und die Blätter deshalb an Gewicht zunehmen. Aus diesem Grund werden diese Blätter und diejenigen, die mit Kohlefaser verarbeitet sind, in eine Epoxymatrix eingebettet. Typischerweise besteht die Mehrheit der Flügelmaterialzusammensetzung aus der Kombination von Fasern und Polymeren, die auch als faserverstärkte Polymere (FRP) bekannt ist. So sind zum Beispiel Anteile von 60 – 70 Prozent Verstärkungsfasern und 30 – 40 Prozent Harz, je nach Gewicht, üblich, siehe folgende Abbildung. Derzeit werden im Onshore-Bereich fast

<sup>1</sup> Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2014

ausschließlich Rotorblätter aus GFK hergestellt. CFK ist erheblich leichter als GFK, aber wesentlich teurer, weshalb es eher bei größeren WEA an besonders kritischen Blattstellen angewendet wird. Blätter mit CFK-verstärkten Teilen gibt es also vor allem im Offshore-Bereich.

### Querschnitt eines Rotorblatts



Quelle: Recycling of Wind Turbine Rotor Blades – Fact or Fiction?, DEWI Magazin No.34, 2009

## Entwicklung der zu entsorgenden Verbundwerkstoffe von Rotorblättern

Insgesamt wurden im Jahr 2015 in Europa 1.069.000 Tonnen glasfaserverstärkte Kunststoffe produziert. Davon wurden 34 Prozent in der Konstruktions-Branche verbraucht, zu der auch die Windindustrie gehört. Die Bereiche Transport (35 Prozent), ebenso wie bei Elektronik- und Sportgeräten (30 Prozent) weisen ebenfalls einen sehr hohen GFK-Verbrauch auf. Dagegen sind bei CFK nur etwa 14 Prozent des Verbrauchs für die Windindustrie. Die größten Abnehmer sind die Luftfahrtindustrie, das Militär (31 Prozent zusammen) sowie die Fahrzeugindustrie (21 Prozent)<sup>2</sup>.

Eine in den letzten 10 Jahren installierte Windenergieanlage hat in Durchschnitt eine Rotorblattlänge zwischen 60 – 70m und ein Gesamtblattgewicht von ca. 30 Tonnen (10 Tonnen pro Rotorblatt)<sup>3</sup>. Die unterstehende Abbildung zeigt die Entwicklung der aufkommenden Abfallmenge durch Rotorblätter. Grundlage der folgenden Berechnung war die jährlich neu installierte Leistung und die Auswahl eines Standard-Anlagentyps. Ausgehend von diesem Anlagentyp erfolgt nach Herstellerangaben ein Rückschluss auf die jährliche anfallende Verbundwerkstoffmenge.

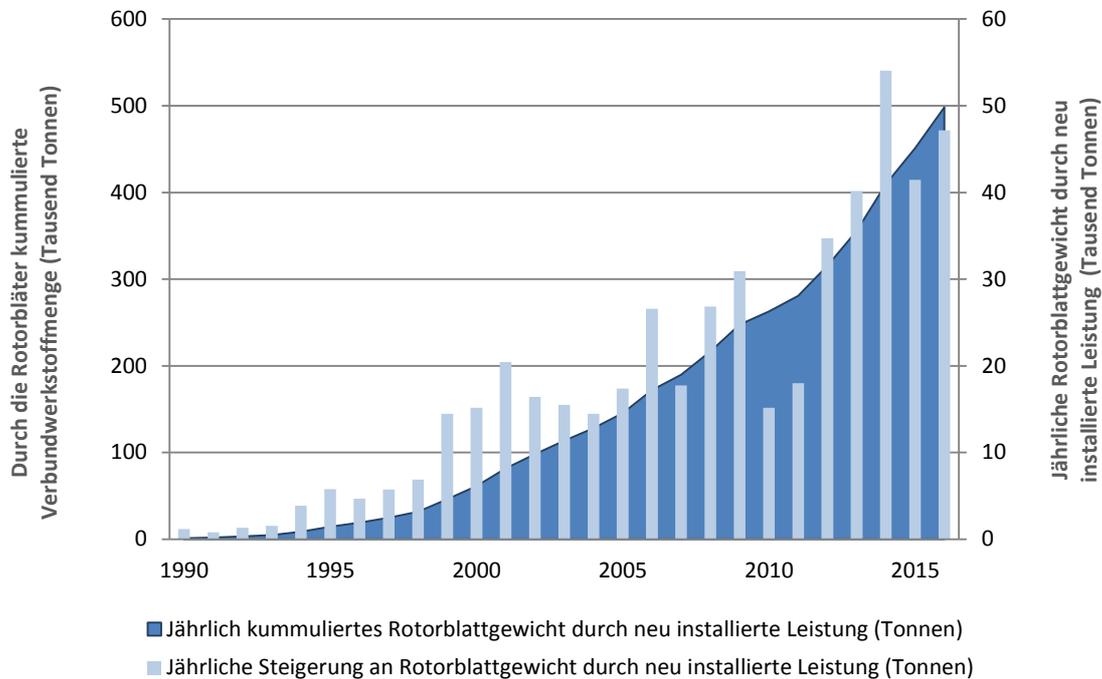
In den letzten 26 Jahren wurden insgesamt in Deutschland knapp 0,5 Millionen Tonnen von Rotorblättern verbaut. Das entspricht nach Angaben der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) weniger als die Hälfte der gesamten Verbundwerkstoffmenge, die in Europa allein im Jahr 2015 produziert wurde. Konkrete Aussagen über die dadurch erzeugte Abfallmenge sind allerdings für einen bestimmten Zeitpunkt schwer zu treffen, da einige WEA über ihre mindestens 20 jährige Entwurfslebensdauer hinaus weiter betrieben werden und andere vorzeitig zurückgebaut werden.

Die starke Steigerung des Verbrauchs von Verbundwerkstoffen spiegelt den Ausbau der Windenergie in Deutschland wieder. Diese wird durch das EEG 2017 auf 2.800 Megawatt beziehungsweise 2.900 Megawatt (ab 2019) begrenzt und dann wieder in etwa dem Zubau des Jahres 2013 entsprechen (2.998 Megawatt). Somit wird die zukünftige durch Rotorblätter erzeugte Abfallmenge unter 40.000 Tonnen pro Jahr liegen, sodass Spitzen von 54.000 Tonnen wie im Jahr 2014 höchstwahrscheinlich nicht mehr erreicht werden. Dadurch wird für eine allmähliche Etablierung einer nahezu konstanten Menge an Verbundwerkstoffe durch Rotorblätter in Deutschland gesorgt.

<sup>2</sup> Alexandra Pehlken, Henning Albers und Frauke Germer, Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, 2017

<sup>3</sup> BWE Eigene Erhebung

## Entwicklung der zu entsorgenden Verbundwerkstoffe durch den Zubau von Windenergieanlagen in Deutschland



Quelle: BWE, Eigene Darstellung, 2017

## Stoffliche und energetische Verwertung von Rotorblättern

Die gesamte Nutzungslebensdauer einer WEA, für die die WEA meist ausgelegt ist, beträgt in der Regel zwischen 25 – 35 Jahre. Jedoch ist ihre Entwurfslebensdauer durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) auf mindestens 20 Jahre ausgelegt, weshalb manche WEA-Bestandteile unter Kontroll- und Standsicherheitsprüfungen eine weitere Verwendung im Ersatzmarkt finden. In der Vergangenheit wurden Faserverbundteile auf Deponien entsorgt. Mit Änderung der Abfallablagerversordnung (AbfAbIV) und der Deponieverordnung (DepV) dürfen nur biologisch stabilisierte und Abfälle mit einem geringen organischen Anteil und einem Glühverlust von maximal 5 Prozent deponiert werden. Rotorblätter bestehen wegen der verwendeten Harze, Füller und Sandwich-Materialien zu ca. 30 Prozent aus organischen Anteilen und dürfen deswegen nicht deponiert werden<sup>4</sup>. Sie haben jedoch einen hohen Energiegehalt und werden deswegen thermisch verwertet. Der Heizwert der Rotorblätter liegt je nach Zusammensetzung zwischen 18.000 – 25.000kJ/kg<sup>5</sup>. Zum Vergleich liegt der Heizwert von Holz etwa bei 15.000kJ/kg.

Für die thermische Verwertung werden die Blätter zum Entsorger als Ganzes gebracht und dort oft mittels Baggerschere, zerkleinert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, am Ort der demontierten WEA zu zerkleinern. Auf diese Art können die Blätter ohne Sondergenehmigung transportiert werden. Bei der Zerkleinerung ist zu berücksichtigen, dass durch die Zerlegung von Blättern aus faserverstärktem Verbundmaterial gesundheitsgefährdende Stäube durch gasförmigen Chlorwasserstoff entstehen können. Dieses Verfahren erfolgt deshalb unter Wasserdampf, damit kein Feinstaub in der Umgebung freigesetzt wird. Üblicherweise werden hierbei Wasserstrahlschneiden, Diamantseilsägen oder hydraulischen Scheren genutzt. Betreiber von WEA sind durch das Baugesetzbuch (BauGB) verpflichtet, nach Ablauf der zulässigen Nutzung, die Anlagen durch Hersteller oder Serviceanbieter zurückzubauen und diese Kosten selbst zu tragen.

<sup>4</sup> SW&W Netzintegration, Zum Verbrennen zu schade, Juni 2017

<sup>5</sup> Maschinenmarkt, KW9, 2015

Die Herausforderung bei der Wiederverwertung von Rotorblättern liegt in deren Materialzusammensetzung. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen führt dazu, dass die thermische Verwertung alter Blätter nur noch in spezialisierten Betrieben möglich ist. Hierfür müssen die Rotorblätter erst in Stücke kleiner als 50mm zerkleinert werden. Anschließend werden die enthaltenen Metallreste abgeschieden und die faserverstärkten Verbundmaterialien mit anderen Stoffen je nach Produktspezifikation gemischt, damit diese zur energetischen Verwertung in eine Verwertungsanlage transportiert werden können. Eine effiziente Nutzung des in den Rotorblättern enthaltenen GFK-Materials bietet den Zementwerken eine Alternative zu fossilen Brennstoffen (wie zum Beispiel Schweröl), da diese Werke einen hohen Energiebedarf aufweisen. Außerdem besitzen die bei der Verbrennung anfallenden Aschen, die etwa 50 Prozent der Gesamtmasse der Rotorblätter ausmachen, einen sehr hohen Anteil an Mineralstoffen. Zudem werden diese anfallenden Aschen als Rohstoffsubstitut für die Zementherstellung eingesetzt, ohne dass es zu einer Qualitätsänderung des damit produzierten Zements kommt<sup>6</sup>. Auf diese Art können Rotorblätter energetisch und stofflich verwertet werden. Dieses Verfahren heißt Composite Recycling<sup>®</sup>, wurde 2011 in Deutschland entwickelt und stellt seitdem eine 100 Prozent Verwertungsquote für bis zu 60.000 Tonnen GFK pro Jahr sicher.

### Wiederverwertungskette von Rotorblättern in der Windindustrie



Quelle: 8. Abfalltagung des LLUR, Geocycle, 2017

„Co-processing von Rotorblättern und GFK im Zementwerk“

## Entwicklungen zum Recyclingverfahren von Rotorblättern

Derzeit werden zahlreiche Untersuchungen und Projekten zur Faserrückgewinnung durchgeführt, um die Entsorgungsprozesse der Rotorblätter parallel zur thermischen Verwertung zu optimieren. Hierbei spielt das thermische Zersetzungsverfahren für organische Substanzen – die Pyrolyse – die größte Rolle. Bei diesem werden die Bindungen zwischen den Fasern und der Matrix durch das Erhitzen auf 600 – 800°C unter Ausschluss von Sauerstoff aufgebrochen. Dadurch wird eine vollständige Zersetzung von Kohlenwasserstoffverbindungen erreicht. Auf diese Art können organische und anorganische Stoffe voneinander getrennt werden, ohne Qualitätsänderungen bei den Glas- oder Kohlenstofffasern zu verursachen. Dies ist vor allem bei teuren Fasern wie CFK wirtschaftlich, da dieses Verfahren sehr energie- und kostenintensiv ist. GFK ist kostengünstiger, sodass sich der Einsatz eines energieintensiven Verfahrens wie dieses nicht lohnt. Andere Möglichkeiten zur Faserrückgewinnung sind chemische Verfahren. Diese haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zur Pyrolyse einen geringeren Energieaufwand haben. Am bekanntesten sind Solvolyse, Hydrierung und Alkoholyse. Aktuelle Versuche und Forschungsarbeiten sollen klären, ob sich diese Verfahren auf großtechnische Anwendungen übertragen lassen. Dies ist vor allem für die Wind-offshore-Branche von besonderem Interesse.

<sup>6</sup> Geocycle, Co-processing von Rotorblättern und GFK im Zementwerk, 2017



## Forschung und Weiterentwicklung der Rotorblätter

Europäische Technologieplattformen zeigen, dass neue Fertigungsmaterialien für Rotorblätter vorhanden sind und dass sich hierzu viele neue Forschungsgebiete etablieren. Aktuelle Entwicklungen für die Herstellung und Zusammensetzung der Rotorblätter richten sich vor allem auf die Untersuchung neuer Materialien zur Steifigkeitsoptimierung, Erhöhung der Ermüdungslebensdauer, SchADVorhersage-Verfahren und die Gewichtseinsparung. Im Bereich Materialforschung sind folgende Themen von besonderem Interesse:

- Optimierung der Bildung von chemischen Bindungen über den Härtingsprozess
- Einbindung automatisierter Fertigungsprozesse zur Sicherstellung gleichbleibender Materialqualitäten
- Einführung von Nanokomponenten als Verstärkungsmittel in der Fasermatrix
- Untersuchung von Faserarchitekturen – Kombination von Hochleistungsglasfasern, Kohlefasern und Nanotechnikfasern zur Herstellung von Hybridverstärkungen
- Untersuchung von langlebigen Beschichtungsmaterialien, z.B. Gel-Coats, Schmerz-Systeme und Bänder, um Erosions-Widerstand zu gewährleisten
- Förderung von alternativen Herstellungsprozessen für Kohlefaser zur Senkung der Kosten, da das Material bessere mechanische Eigenschaften bietet und im Vergleich zu Glasfasern wieder herstellbar ist
- Erforschung alternativer und nachhaltigerer Materialien, die leichter wiederzuverwerten sind, wie z.B. Thermoplaste, Zellulosefasern, Bioharze usw.

Diese Materialinnovationen werden weitere positive Auswirkungen auf die Instandhaltung und Lebensdauer der Windenergieanlagen haben. Darüber hinaus sollen optimierte Materialauswahlprozesse bei der Konstruktion von Rotorblättern durchgeführt werden. In Anbetracht der Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit und Abfallbehandlungsmethoden soll dadurch zukünftig ein leichteres Recycling gewährleistet werden.

## Zusammenfassung und Fazit

Die ständige Steigerung der Effizienz und Leistungsfähigkeit der Windenergieanlagen lässt sich unter anderem aus dem stetigen Wachstum der Anlagengröße ableiten. Dabei spielt die Konstruktion der Rotorblätter eine Hauptrolle. Eine energetisch und stofflich vollständige Verwertung der Rotorblätter aus GFK ist in Deutschland gut möglich. Es ist aber weiterhin wichtig, bei der Weiterentwicklung von WEA nach Möglichkeiten zur Rohstoffwiederverwertung anzustreben, ebenso wie der Einsatz von Materialien, die über ein einfaches Recyclingverfahren verfügen verfolgen.

---

### Ansprechpartner

#### Abteilung Fachgremien

Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)  
Neustädtische Kirchstraße 6  
10117 Berlin  
T +49 (0)30 / 212341-210  
[fachgremien@wind-energie.de](mailto:fachgremien@wind-energie.de)