

# Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen

## Perspectives for the Recycling of Wind Turbines

Ralph Kehrbaum; Forschungszentrum Jülich GmbH

### **Summary**

*At the present time there exist no concrete concepts for the waste management of wind turbines after their active lifetime has expired, nor is any practical experience available. In this article possibilities for the waste management of wind turbines are discussed. In addition the composition of waste management costs and material as well as energy benefits of recycling are presented.*

### **1. Einleitung**

Praktische Erfahrungen oder konkrete Konzepte liegen zum Thema Entsorgung von Windkraftanlagen (Wka) noch kaum vor. Hinsichtlich der Lebensdauer der Anlagen werden von Seiten der Wka-Hersteller Angaben zwischen 20 und 25 Jahren gemacht. Befragt man Wka-Hersteller oder Entsorgungsunternehmen zum Thema der Entsorgungskosten von Wka, so erhält man für Anlagen der 500/600 kW-Leistungsklasse Schätzwerte zwischen 0 und 100.000 DM, wobei die meisten Schätzwerte bei 50.000 DM liegen. Welche Möglichkeiten sich zur Entsorgung von Windkraftanlagen bieten, wie sich die Entsorgungskosten aufschlüsseln sowie welchen stofflichen und energetischen Nutzen das Recycling hat, ist Inhalt des folgenden Beitrages.

### **2. Entsorgungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen**

Windkraftanlagen kann man bei hinreichender Nachfrage nach den Sekundärrohstoffen (Stahlschrott etc.) als überwiegend stofflich recycelbar einstufen. Offene Fragestellungen bestehen aus ökologischer Sicht im wesentlichen im stofflichen Recycling der Rotorblätter und aus ökonomischer Sicht in der Demontage der Windkraftanlagen sowie im Abbruch des Fundamentes. Geht man davon aus, daß Windkraftanlagen nicht wieder- bzw. weiterverwendet werden, dann ergeben sich folgende Entsorgungsmöglichkeiten für die in die Bauteile Rotorblätter, Fundament, Turm, Generator und Getriebe demontierbare Windkraftanlage (vgl. Abb. 1): (Die weiteren Bauteile in Triebstrang, Verstellmechanik, Gondel und Steuerung werden aufgrund ähnlichem werkstofflichen Aufbau bzw. mengenmäßig geringer Relevanz nicht näher betrachtet.)

#### **2.1. Rotorblätter**

Rotorblätter werden bislang auf Hausmülldeponien entsorgt. Hierbei anfallende Deponiegebühren von 1.000 DM je Tonne glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) sind nicht selten. Die Zerkleinerung der Rotorblätter für eine Wieder- bzw. Weiterverwertung des Werkstoffes ist nach einer arbeitsintensiven Vorzerkleinerung z.B. mit Hilfe von Schneidmühlen möglich. Dabei kann ein zerkleinerter Faseranteil durch entsprechende Siebverfahren in unterschiedlichen Faserfraktionen zurückgewonnen werden. Die im Rotorblatt zum Blitzschutz ggf. eingebundenen Kupferanteile können abgeschieden werden. Eine völlige Trennung Glasfaser und Kunstharz gelingt bei den Siebverfahren jedoch nicht. Auch die Abtrennung des PVC-Anteils aus den zerkleinerten Rotorblättern erscheint problematisch.

Die zerkleinerten Glasfasern und das zerkleinerte ausgehärtete Epoxidharz lassen sich bis zu einem Anteil von ca. 20% ohne Qualitätsverluste als Füllstoff in bestimmten Kunststoffen (z.B. SMC, BMC, PA, PP) und ggf. im Straßenbau einsetzen [1]. Ein erneuter Einsatz zur Herstellung von Rotorblättern kann jedoch ausgeschlossen werden. Problem dieses Recycling als Füllstoff, auch Partikelrecycling genannt, ist der Absatz der Füllstoffe. Dieser könnte derzeit nur zu sehr geringem Anteil wiederum im Bereich der Windenergie etwa für Gondelverkleidungen erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit zur Verwertung von Rotorblättern stellt die Pyrolyse dar. Allerdings zeigt sich, daß der hohe Glasfaseranteil verfahrenstechnisch problematisch sein kann. Leider ist die energetische Ausbeute eines solchen rohstofflichen Recyclingverfahrens, das bei hohen Prozeßtemperaturen zu

wiederverwertbarem Pyrolysegas und Pyrolyseöl und zunächst nicht wieder zu Kunststoffen führt, im Vergleich zu einer Verbrennung gering [2].

	Wieder-/Weiterverwertung von Werkstoff	Verbrennung	Deponierung
<b>Rotorblätter</b> GFK-UP GFK-EP	(GFK als Füllstoff für Kunststoffe, z.B. SMC, BMC, PA, PP)  (Harz als Reduktionsmittel im Stahlwerk und GF als Schlacke, im Zementwerk verwertbar)  (Harz als Brennstoff und GF als Zementzusatz im Zementwerk)  R. in MVA		Hausmüll
<b>Fundament</b>	Stahl im Stahlwerk  Kupfer in der Sekundärhütte  Beton als Zuschlagstoff z.B. für neuen Beton oder Straßenuntergrund		Bauschutt
<b>Turm</b> Stahlrohr Schleuderbeton Stahlgitter	Stahl im Stahlwerk  Beton als Zuschlagstoff z.B. für neuen Beton oder Straßenuntergrund		
<b>Generator und Getriebe</b> Asynchron mit Getriebe Synchron ohne Getriebe	Stahl im Stahlwerk  legierter Stahl im Edelstahlwerk  Zweitrefination des Getriebeöls zu Getriebeöl	Getriebeöl in MVA/SVA	

(...) Verfahren nicht verfügbar, aber relativ weit entwickelt  
Abkürzungen MVA/SVA = Müll-/Sondermüllverbrennungsanlage; R. = Rotorblatt; GFK = glasfaserverstärkter Kunststoff

Abb. 1: Entsorgungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen  
Fig. 1: Possibilities for the waste management of wind turbines

Für Rotorblätter sind demgegenüber die stofflich-thermischen Verwertungsverfahren interessanter. In zerkleinerter Form kann GFK z.B. im Hochofen als Reduktionsmittel für Eisenerze eingesetzt werden. Der anorganische Anteil in Form der Glasfasern, der dabei als Schlacke abgeführt werden muß, ist jedoch verhältnismäßig hoch. Hochofenschlacke wiederum wird bei der Zementherstellung verwandt. Ebenso interessant ist die stofflich-thermische Verwertung von GFK im Zementwerk. Hier dient der organische Kunstharzanteil zur Bereitstellung der ohnehin aus fossilen Rohstoffen erzeugten Prozesswärme während, der anorganische Anteil in Form von Glasfasern in den Zement eingebunden wird. Voraussetzung ist jedoch die feine Zerkleinerung des zuzuführenden GFK-Materials auf ca. zwei mal zwei Millimeter große Schnitzel. Schließlich stellt auch die rein thermische Verwertung etwa in Müllverbrennungsanlagen eine Entsorgungsmöglichkeit für Rotorblätter dar.

Wichtige Problempunkte bei all diesen Verwertungsverfahren stellen die in den Rotorblättern enthaltenen Anteile an PVC-Schaum und Kupfer bzw. anderen Metallen dar. Die Metallanteile lassen sich offensichtlich abscheiden. Sie würden im Beispiel Kupfer vor allem bei der Verwertung im Hochofen stören. Die PVC-Schäume werden aufgrund ihres hohen Chlorgehaltes (ca. 50%) ungern auch nur in Anteilen als Füllstoff verwertet. Bei ihrer stofflich-thermischen Verwertung im Zementwerk bzw. Hochofen, aber auch bei einer rein thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen entstehen zudem schädliche Verbrennungsprodukte.

## 2.2. Fundament

Der Abbruch des Fundamentes empfiehlt sich zumindest bis auf die bei einer Tiefgründung gesetzten Betonpfähle. Überlegt werden auch Teilabbrüche bis zu einer Tiefe von 1,2 m für eine landwirtschaftliche Nachfolgenutzung bzw. 2,5 m für spätere Bebauungen. Ferner bestehen Überlegungen nur den Turmanschlußbereich abzustemmen und anschließend Boden soweit aufzuhäufen, daß eine landwirtschaftliche Nachfolgenutzung ermöglicht wird. Nach einem Betonabbruch lassen sich Betonstahl und Betonstein voneinander trennen. Der Betonstahl wird erneut im Stahlwerk eingeschmolzen, während der Betonstein als Zuschlagstoff z.B. in neuem Beton oder im Straßenbau eingesetzt werden kann.

## 2.3. Turm

Die Zerkleinerung der Stahltürme ist mittels Brennschneidetechnik denkbar, aber aufwendig. Aufgrund der Blechdicke kann ein Shreddern wahrscheinlich nicht erfolgen. Man geht davon aus, daß die Kosten der Zerkleinerung gerade durch den Schrottwert der Türme gedeckt werden. Die Zerkleinerung von Betontürmen wurde bereits erfolgreich durchgeführt. Danach lassen sich Betonstein und Betonstahl wie beim Fundament recyceln.

## 2.4. Generator und Getriebe

Bevor ein Getriebe in seine Bestandteile zerlegt wird, wird das Getriebeöl aufgefangen, einer Zweitrafination zugeführt oder in entsprechenden Verbrennungsanlagen thermisch genutzt. Danach muß das Getriebe aufgepreßt oder mit einem Brennschneider aufgeschnitten werden. Weiterhin muß der Generator pyrolytisch behandelt werden, um die mit Kunstharz und anderen Isolierstoffen umschlossenen Kupferwicklungen freizulegen. Dann kann eine weitere Zerlegung und Zerkleinerung von Getriebe und Generator erfolgen. Stähle und Kupfer können erneut eingeschmolzen werden. Bei den Stählen sollten legierte und unlegierte Stähle getrennt werden. Die Zusammensetzung der jeweiligen Legierungen sollte dabei nach Möglichkeit bekannt sein.

## 3. Entsorgungskosten von Windkraftanlagen

Je kW-installierter Leistung einer Windkraftanlage der 500/600kW-Leistungsklasse kann von folgender Materialzusammensetzung ausgegangen werden: 8 kg GFK, 400 kg Beton, 150 kg unlegierter Stahl, 4 kg legierter Stahl, 8 kg Kupfer und 0,5 kg Ölfüllmengen. Der reine Schrottwert der in einer solchen Windkraftanlage verbauten Werkstoffe summiert sich dann auf etwa 27.000 DM. Dieser ist zu mehr als der Hälfte durch Kupfer bestimmt. Demgegenüber stehen ungefähr folgende Kosten: GFK-Deponierung 4.500 DM, Altölentsorgung 500 DM, Kran 15.000 DM, Transport 20.000 DM und Abbruch des Fundamentes bis auf die Pfahlgründung 22.000 DM. Bei den nicht selten voluminöseren Fundamenten können schnell auch Abbruchkosten von 40.000 DM auftreten. Schließlich sind noch Personalkosten für die Wka-Demontage und Kosten für die Zerkleinerung, Zerlegung und Sortierung der Bauteile wie z.B. Turm, Generator, Kabel, Elektroschrott etc. von abgeschätzt 15.000 DM zu berücksichtigen. Auf diese Weise ergeben sich anfangs genannte 50.000 DM Entsorgungskosten je Anlage. (Anmerkung: Je nach Hersteller und Bauweise schwanken die Werte der Materialzusammensetzung um bis zu 50%.)

## 4. Stoffliche und energetische Beurteilung des Recycling von Windkraftanlagen

Geht man von jährlich 100 MW zu entsorgender Leistung, also von ca. 180 Anlagen der 500/600 kW Leistungsklasse aus, dann handelt es sich um eine Abfallmenge von ungefähr 800 t GFK, 15.000 t Stahl, 40.000 t Beton, 800 t Kupfer und 200 t Getriebeöl (inklusive Ölwechsel über 20 Jahre). Vom Volumen entspräche diese Menge einem Würfel mit etwa 30 m Kantenlänge. Dieser Wka-Schrott entspricht etwa den folgenden Anteilen der jährlichen Produktionsmengen der einzelnen Werkstoffe: 0,5% bei GFK bzw. 0,01% bei Kunststoffen, 0,04% bei Stahl, 0,15% bei Tiefbaubeton bzw. 0,015% bei Zement, 0,2% bei Elektrolytkupfer bzw. 0,04% bei Kupfer- und Kupferlegierungen und 0,015% bei Schmierstoffen [3]. Abgesehen vom Vergleich zu den GFK-Mengen schwanken diese Anteile im Bereich von 0,01...0,2% der jährlich produzierten Stoffmengen. Diese 100 MW produzieren über 20 Jahre bei durchschnittlich 2.200 jährlichen Vollaststunden [4] etwa 4.400 GWh Strom. Dies entspricht in etwa der Deckung von 0,05% des jährlichen Stromverbrauchs in Deutschland über die zwanzigjährige Lebensdauer bzw. einer theoretischen Deckung von 1% des Strombedarfs eines Jahres.

Aus dieser groben Abschätzung wird ersichtlich, daß die für regenerative Energie in Form der Windenergie aufzuwendenden und zu entsorgenden Materialmengen selbst bei großen Stromversorgungsanteilen keine gewaltigen Mengen annehmen werden. Im Bereich von GFK wäre bei einer kontinuierlichen Produktion von jährlich 300 MW künftig von rund 2.500 t GFK-Abfall durch Rotorblätter auszugehen. Da für alle anderen Werkstoffe bereits heute zufriedenstellende Verwertungswege verfügbar sind, wäre in den nächsten 5-10 Jahren lediglich die bessere Verfügbarkeit am besten stofflich-thermischer Recyclingwege für GFK-Rotorblätter sinnvoll. Entsprechenden Berechnungen zufolge sparen die stoffliche Verwertung von Stahl, Kupfer und Beton sowie die thermische Verwertung von GFK und Getriebeöl bei Windkraftanlagen der 500/600 kW-Leistungsklasse gegenüber einer Deponierung etwa 550.000 kWh Primär- bzw. umgerechnet 180.000 kWh elektrischer Endenergie ein [5, 6]. Daraus ergibt sich bei 2.200 jährlichen Vollaststunden [4] eine Verringerung der energetischen Rückzahldauer um etwas weniger als 2 Monate. Hierbei muß allerdings vorausgesetzt werden, daß das Recycling für sinnvolle Anwendungen, also zur Deckung eines tatsächlich in der Wirtschaft vorhandenen Material- bzw. Energiebedarfes, erfolgt. Durch die Entsorgung zusätzlich anfallende Zerkleinerungs- und Transportprozesse fallen dabei in Bezug auf eine Erhöhung der energetischen Rückzahldauer weniger ins Gewicht.

## 5. Fazit

Das Recycling von Windkraftanlagen wird im Vergleich zu anderen Recyclingfragen (z.B. Automobil) auch bei hohen Stromeinspeisungsanteilen keine massiven Probleme aufwerfen. Ist eine Erhöhung der Lebensdauer von Windkraftanlagen oder ihrer Bauteile nach 20 Jahren nicht mehr sinnvoll, so können durch ein werkstoffliches Recycling Abfallmengen, Rohstoffmengen, Energie und damit Emissionen eingespart werden. Das Recycling der Rotorblätter ist bei den heute überwiegend eingesetzten glasfaserverstärkten Kunststoffen noch ungelöst. Hier erscheint die Bereitstellung bzw. Nutzung eines stofflich-thermischen Recyclingverfahrens z.B. in der Zement- oder in der Stahlherstellung interessant. Bei der Konstruktion künftiger Windkraftanlagen sollten weiterhin die Einsetzbarkeit von Recyclingbetonbruch als Zuschlagstoff in neuen Fundamenten, von Recyclingölen in Getrieben, von Rotorblättern aus recyclingfreundlichen Materialien sowie eine allgemein materialsparende und demontagegerechte Produktgestaltung angestrebt werden.

Eine Langfassung dieses Artikels kann beim Autor angefordert werden: Dipl.-Ing. Ralph Kehrbaum, Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Technologiefolgenforschung, D-52425 Jülich, Tel.: 02461/61-3731, Fax: 02461/61-2496

## 6. Literatur

- [1] Emminger, H.; Decker, K.-H.: Entsorgung von duroplastischen Abfällen; In: Kunststoff-Handbuch; Hrsg.: Becker/Braun; München 1988, S.148-155
- [2] Beckmann, R.; Rohleder, T.; Guderian, J.: Bewertung der Hydrierung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung von Kunststoffen; In: Erfassung und Verwertung von Kunststoff, Hrsg.: Sutter, H.; Berlin 1993
- [3] Statistisches Jahrbuch 1993; Hrsg. Statistisches Bundesamt; Wiesbaden 1993
- [4] Keuper, A.: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland; In: DEWI-Magazin Nr. 6, Februar 1995, S. 12-24
- [5] Kehrbaum, R.; Berg, R.: Untersuchung der Schließbarkeit nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffströme; Interner unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Jülich 1995
- [6] Neumann, J. C.: Recycling und Energiesparen; In: BWK 44(1992)9, S. 392-398