

## „Wenn die Gondeln Trauer tragen ...“ - Entsorgungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen

Possibilities for the disposal of wind energy converters

Hinsch, Christian; Söker, Holger; DEWI

### **Summary**

*Growing waste dumps and dwindling resources will induce industry to become interested in a sustainable development of their products. Even wind energy converters (WEC) will reach their end of service life and therefore have to be dissected and disposed. The legislator through new conditions as well as the customer through changed conduct will lead to more significance of the ecological quality of products.*

*DEWI started an international survey on recycling of wind energy converters among numerous manufacturers. The aim is to determine the various materials which are used to make a WEC and to assess their quantities. Mainly a WEC consists of metallic materials, operation fluids and plastics, especially fiber reinforced materials (glasfiber reinforced plastics GRP and carbon reinforced plastics CRP).*

*While for metallic materials well advanced recycling procedures (for sorting and preparation of scrap) are available, the disposal of GRP and CRP is still in the state of research. Four different ways of disposal are briefly presented in this article: 1.) material recycling, 2.) chemical recycling, 3.) combustion and 4.) dumping. DEWI's future work will focus on the investigation of these methods.*

*It is important to understand that recycling already begins in the design process of a WEC, where subjects like how the WEC can be dismantled and which ecologically safe materials can be used should be considered. The logistic problem of collection, sorting, intermediate storage and transportation to the disposal procedure has to be solved in future. And, most important, the recycling procedures have to be investigated with respect to their environmental effects (consumption of energy, water and other media).*

### **1. Ökologische Qualität von Produkten**

Wachsende Müllberge, schwindender Deponieraum, abnehmende Ressourcen - ein Umdenken im Bereich Abfall ist dringend erforderlich. Wie alle Produkte einmal an das Ende ihres „Lebens“ gelangen werden, so wird auch eine Windkraftanlage eines Tages ihre letzte Umdrehung gemacht haben. Da es schwer vorstellbar ist, daß die modernen Anlagen, im Gegensatz zu alten Windmühlen, einst als Kulturdenkmäler erhalten werden sollen, werden auch Windkraftanlagenbetreiber vor die Frage der Entsorgung gestellt. Zur Zeit lassen sich Altprodukte noch relativ einfach - wenngleich nicht unbedingt sinnvoll - über die Deponierung entsorgen, doch welche gesetzlichen Rahmenbedingungen in 10 bis 20 Jahren vorliegen werden, kann vielleicht an Stichwörtern wie Abfallgesetz und Altauto-Verordnung erahnt werden.

Hier wird eine Veränderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zugunsten verbesserter Umweltverträglichkeit der Produkte durch gestiegenes Umweltbewußtsein der Gesellschaft deutlich. Nicht nur der Gesetzgeber versucht durch rechtliche Bestimmungen und Verordnungen auf die produzierenden Unternehmen einzuwirken, sondern auch die Käufer lassen ein verändertes Kaufverhalten zugunsten umweltverträglicher Produkte erkennen. Nicht zuletzt diesem gedanklichen Wandel verdankt die Windenergie einen großen Teil ihres noch recht jungen Erfolges. Aus dieser positiven Erfahrung erscheint es nur konsequent den eingeschlagenen Weg auch weiterzugehen und die ökologische Herausforderung an die Unternehmen anzunehmen. Den meist jungen Unternehmen der Windenergie-Industrie, Consultants, Hersteller, Betreiber und Energieversorger, sollte es nicht schwer fallen sich auf ihre größte Stärke, ihre Innovationsbereitschaft, zu besinnen und so im Wettbewerb unter den sich verändernden Bedingungen zu bestehen.

Das dazu notwendige Instrumentarium zeichnet sich zu allererst durch umfassende Ansätze aus, wie am Beispiel moderner Qualitätssicherungssysteme deutlich wird. Sie machten Qualitätssicherung zu einer Aufgabe aller Unternehmensbereiche, von der Konstruktion bis zum Service. Nach anfänglicher Skepsis haben viele erfolgreiche Unternehmen das Potential erkannt, das qualitativ hochwertige Produkte hinsichtlich der erreichbaren Kostenreduktion und Wettbewerbsvorteile erschließen und haben folglich Qualitätssicherungssysteme eingeführt. Im Bezug auf die eingangs angesprochene Problematik bedeutet die Umsetzung dieser Erfahrung die Erweiterung des Qualitätsbegriffes um die "ökologische Qualität von Produkten" [1]. Die wiederum läßt sich u.a. durch die Einbeziehung aller Phasen eines Produktlebenszyklus von der Forschung über die Entwicklung, die Produktion, das Marketing, die Nutzung bis hin zur Phase nach der Nutzung verbessern. In all diesen Abschnitten des Produktlebenszyklus sind die Rückwirkungen zwischen dem Produkt und seiner Umgebung zu analysieren.

Im vorliegenden Beitrag geht es vor allem um die Betrachtung des letzten Abschnitts des Produktlebenszyklus, der Phase nach der Nutzung einer Windkraftanlage. Das Deutsche Windenergie-Institut wird im Rahmen seiner Forschungstätigkeit die verschiedenen Entsorgungsmöglichkeiten für Windkraftanlagen und deren Komponenten untersuchen, um so einen konstruktiven Beitrag in der sich abzeichnenden Diskussion zu leisten. An dieser Stelle soll zunächst eine Problemübersicht gegeben werden.

## 2. Die Bestandteile einer Windkraftanlage und ihre Mengen

Eine wesentliche Voraussetzung für das Recycling ist die Kenntnis der Materialien, die bei der Herstellung und beim Betrieb einer Windkraftanlage verwendet werden. Um hierüber ein genaueres Bild zu bekommen hat das DEWI eine Umfrage unter in- und ausländischen Herstellern gestartet. Neben der Ermittlung der einzelnen Stoffgruppen gilt es auch deren mengenmäßiges Auftreten zu bestimmen. Da der Rücklauf der Fragebögen bis dato noch nicht abgeschlossen ist, kann an dieser Stelle nur eine sehr allgemeine Abschätzung der Stoffgruppen und ihrer Mengen stattfinden.

Im wesentlichen besteht eine Windkraftanlage aus Metallen (Eisen und NE-Metalle), Kunststoffen, Verbundwerkstoffen und meist flüssigen Betriebsstoffen. Auf die Verwertungsmöglichkeiten der einzelnen Stoffe wird in den folgenden Kapiteln ausführlicher eingegangen. Ebenso schwierig wie die detaillierte Bestimmung der einzelnen Stoffe gestaltet sich die Ermittlung der Mengen der einzelnen Materialien. Wird die Statistik des DEWI zugrunde gelegt [2], so drehen sich zur Zeit (Stand: 31.12.1994) 2617 Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 643 MW in der BRD. Die mittlere installierte Leistung beträgt somit ca. 245 kW. Eine „durchschnittliche“ Windkraftanlage dieser Größenordnung wiegt ca. 32.000 kg, wovon ca. 18.500 kg (58 %) auf den Turm entfallen (meist Stahlrohrkonstruktionen), 9.500 kg (30 %) auf die Gondel ohne Nabe und ca. 4.000 kg (12 %) auf den Rotor mit Nabe; die Werte wurden aus [3] ermittelt.

Die Zahlen zeigen, daß eine Windkraftanlage größtenteils aus metallischen Werkstoffen besteht, für die allgemein anerkannte Verwertungswege existieren. Übrig bleiben neben Betriebsstoffen und diversen Kunststoffen unter anderem die Rotorblätter aus Faserverbundwerkstoffen (GFK, bzw. CFK). Das Gewicht eines Rotors setzt sich ungefähr zu 50 % aus den Faserverbundwerkstoffen und zu 50 % aus der (metallischen) Nabe und diversen Steuerungselementen zusammen. Dieses bedeutet - grob geschätzt - derzeit eine Menge von ca. 5200 t (2000 kg x 2600 WKA) Faserverbundwerkstoffen. Auch fallen bereits bei der Herstellung einer Windkraftanlage Abfälle an, bedingt durch Fertigungsverfahren (z.B. Verschnitt) und Produktionsfehler (Ausschuß). Diese Stoffe sollten der sinnvollen Entsorgung zugeführt werden. Berücksichtigt man, daß es 1990 in Deutschland ca. 2,5 Mio. t Kunststoffabfälle gab [4], so wird allerdings deutlich, daß die Windenergie zur Zeit nur minimal am Altkunststoffaufkommen beteiligt ist. Werden jedoch die geplanten Zielsetzungen zum verstärkten Ausbau der Windenergie umgesetzt, so ist mit steigenden Abfallzahlen im Bereich der Windenergie zu rechnen.

Bei den Faserverbundwerkstoffen handelt es sich um eine Materialgruppe, deren Entsorgung heute noch nicht zufriedenstellend geklärt ist. Aus diesem Grunde wird das Recycling von Ro-

torblättern zentraler Bestandteil zukünftiger „Entsorgungsforschung“ am DEWI sein. Als erster Schritt soll im Rahmen der oben erwähnten Umfrage auch festgestellt werden, wie die Hersteller ihr Produkt in Bezug auf die Recyclingfähigkeit beurteilen und welche Szenarien am Ende der Lebensdauer (nach ca. 20 Jahren) einer Windkraftanlage denkbar sind.

### 3. Entsorgungswege für die einzelnen Stoffgruppen

Zunächst ist die Entsorgung von Werkstoffen und Produkten immer auch ein logistisches Problem. Die Windkraftanlage muß nach der Nutzungsdauer abgebaut werden und in ihre Einzelteile soweit wie möglich zerlegt werden können. Anschließend müssen die Materialien nach Stoffgruppen (Metalle, Holz, Kunststoffe usw.) sortiert und gegebenenfalls zwischengelagert werden, bevor sie der eigentlichen Entsorgung zugeführt werden können. Aus dem oben aufgezeigten, prinzipiellen Entsorgungsweg lassen sich bereits die ersten zwei Problemfelder erkennen; zum einen erfordert die Trennung der einzelnen Stoffgruppen eine einfache Demontage der Windkraftanlage. Dieses Kriterium sollte bereits beim Entwurf der WKA berücksichtigt werden. Zum anderen besteht nach 20 Jahren Nutzungsdauer unter Umständen das Problem, gesicherte Informationen über die Zusammensetzung der Materialien zu bekommen. Aus diesem Grunde ist eine einheitliche Kennzeichnung der Materialien (insbesondere der Kunststoffe) dringend geboten. Ein weiteres logistisches Problem ist die Organisation der Sammlung, der Zwischenlagerung und der Zuführung zur Entsorgung. Denkbar wären regional verteilte Lager zur Aufnahme der abgebauten und zerlegten WKA, um diese dann bei Vorliegen ausreichender Mengen einer wirtschaftlichen Entsorgung zukommen zu lassen.

*Abb. 1: Recycling-Kreisläufe von Kunststoffen [6].*

*Fig. 1: Circuits of recycling for plastics [6].*

*Quelle/Source: Spektrum der Wissenschaften, 12/1993, S. 102-106: Käufer, H.; Thiele, A.: Geschlossene Materialkreisläufe für Kunststoffe durch Wiederverwertung von Abfall.*

Sind die logistischen Probleme gelöst und liegen somit die Materialien getrennt nach Stoffgruppen vor, bieten sich momentan folgende Entsorgungswege für die einzelnen Stoffgruppen an [5]:

- Metalle (Eisen und Stahl) :

Die Sammlung und Aufbereitung verschiedener Stahlerzeugnisse in Form von Schrott ist im Bereich der Eisen- und Stahlindustrie bereits seit langem Standard. Zu unterscheiden ist zwischen Neuschrott (aus der Produktion) und Altschrott (nach der Nutzung des Produktes). Insbesondere die Aufbereitung des Altschrottes (zum Beispiel von mit Kupfer oder Zinn beschichteten Stählen) erfordert einen teilweise sehr hohen Aufwand, um eine hochwertige Qualität des Recyclingproduktes zu gewährleisten. Da jedoch Verfahren zur Schrottsortierung und Schrottaufbereitung existieren, kann für die Metalle (Eisen und Stahl) ein Recyclingkreislauf als gegeben und funktionsfähig angesehen werden.

- **Nichteisenmetalle :**  
Die Nichteisenmetalle können in folgende vier Gruppen unterteilt werden: Leichtmetalle (z.B. Aluminium), Buntmetalle (z.B. Kupfer), Schwermetalle (z.B. Blei) und Edelmetalle (z.B. Platin). Auch für die Gruppe der Nichteisenmetalle gibt es heute weit entwickelte Recyclingverfahren inklusive der notwendigen Schrottsortierung und Schrottaufbereitung. Insbesondere für Werkstoffe aus Aluminium ist ein Recycling dringend geboten, da der Energiebedarf zur Herstellung von Bauteilen aus Primäraluminium (aus Bauxit) mit ca. 200 MJ/kg sehr hoch ist und sich durch den Einsatz von Recyclingmaterial auf ca. 74 MJ/kg (37 %) senken läßt.
- **Kunststoffe :**  
Kunststoffe lassen sich im wesentlichen in drei Gruppen unterteilen: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. In den Gebrauchszyklus eines Kunststoffes lassen sich verschiedene Recycling-Kreisläufe einschalten, wobei im allgemeinen der kleinere Kreislauf den ökonomischeren Weg darstellt. Eine Übersicht liefert Bild 1 :

Den kleinsten Kreislauf stellt das Produktrecycling dar, bei dem mit geringem Aufwand durch Auffrischen der verbrauchten Güter neuwertige Produkte entstehen. Ist dieses Verfahren nicht möglich, bietet sich als nächstes ein Materialrecycling über Umschmelzen oder Lösen an. Diese Verfahren werden auch als stoffliches Recycling bezeichnet.

Die Mehrzahl der Kunststoffprodukte besteht aus Thermoplasten, die nach dem Ende ihrer Lebensdauer wieder eingeschmolzen werden können oder sich durch Lösungsmittel behandeln lassen. Die am häufigsten vorhandenen thermoplastischen Kunststoffe sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC). Wenn diese nicht sortenrein vorliegen, lassen sich gemischte Thermoplastabfälle durch verschiedene Verfahren (z.B. im Hydrozyklonen) mit einer hohen Genauigkeit trennen. Anschließend können die Materialien wieder neu verarbeitet werden.

Eine andere Form des stofflichen Recyclings (insbesondere auch für Duroplaste) ist die Zerkleinerung von Kunststoffen (z.B. auch Faserverbundwerkstoffen mit duroplastischer Matrix) und der Einsatz des neuen Produktes (bestehend aus Kurzfasern und Harzpartikeln) als Recyclat in neuen Bauteilen. Im größeren Rahmen wird dieses „Partikelrecycling“ in der Automobilindustrie für SMC-Bauteile (Sheet Moulding Compounds) eingesetzt.

Ist ein stoffliches Recycling nicht möglich oder nicht sinnvoll, bietet sich das chemische Recycling als weitere Entsorgungsmöglichkeit an. Die Moleküle werden bei hohen Temperaturen und unter bestimmten Bedingungen (Wasserstoff, Sauerstoffausschluß, usw.) aufgespalten, was zu neuen Ausgangsprodukten (Öle, Gase) zur Kunststoffherstellung führt. Als Beispiel für diese Art des chemischen Recyclings seien hier die Hydrierung, die Pyrolyse und die Hydrolyse

erwähnt.

Sind keine Recycling-Kreisläufe zu realisieren, so bleibt als weitere Möglichkeit die Verbrennung und die Deponierung von Kunststoffen als Entsorgungsweg. Beide Verfahren sind relativ einfach und damit zur Zeit meist auch wirtschaftlich zu realisieren, beinhalten jedoch auch größere Risiken für Mensch und Umwelt. Da der Heizwert einiger Kunststoffe annähernd dem Heizwert von Heizöl entspricht, ist die Deponierung von Kunststoffbauteilen jedoch auch eine Verschwendung von Rohstoffen, selbst wenn nur ca. 7% des verarbeiteten Rohöls in Deutschland zur Herstellung von Kunststoffen verwendet wird. Andererseits birgt die Verbrennung von Kunststoffabfällen (in Verbindung mit anderem Müll) u.a. die Gefahr der Bildung von hochgiftigen Dioxinen und Furanen (insbesondere aus PVC-Abfällen). Einer Verbrennung ist - wenn überhaupt - nur im Zusammenhang mit der Erzeugung von elektrischer Energie oder Heizenergie zuzustimmen.

Es wird deutlich, daß es für fast alle Stoffgruppen Entsorgungsmöglichkeiten gibt. Neben der einfachsten Entsorgung in Form der Deponierung (nach dem Motto „Aus den Augen aus dem Sinn“) oder der Verbrennung bieten sich besonders für Metalle gute Recyclingmöglichkeiten. Bei Kunststoffen ist zu unterscheiden zwischen Thermoplasten und Duroplasten, wobei für die ersteren aufgrund ihres starken Vorkommens bereits vielfältige Recyclingverfahren entwickelt wurden. Für Duroplastkunststoffe in Verbindung mit Fasern (Glas, Kohle) sind dagegen erst wenige Verfahren zur Reife gebracht worden. Bei Windkraftanlagen kommen neben einigen wenigen thermoplastischen Kunststoffen hauptsächlich Duroplaste (Polyester, Epoxide) als Matrixmaterial für die Faserverbundwerkstoffe der Rotorblätter zum Einsatz. Da die Langfasern der Faserverbundwerkstoffe von Rotorblättern durch stoffliche Recyclingverfahren zerstört werden, ist in diesem Falle zur Zeit nur ein Downcycling vorstellbar. Downcycling bedeutet ein Recycling von Produkten, wobei jedoch das neue Produkt nicht mehr die gleichen Eigenschaften (z.B. Festigkeit) wie das alte Produkt aufweist und infolgedessen nur in einer niedrigeren Anwendungsstufe eingesetzt werden kann.

Neben der prinzipiellen Möglichkeit des Recyclings (das technisch Machbare) wurden bis jetzt noch keine Aussagen über die Wirtschaftlichkeit und über die Umweltverträglichkeit der einzelnen Verfahren gemacht. Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens hängt immer sehr stark von den gegebenen Rahmenbedingungen (Gesetze, Deponierungskosten, Energie- und Wasserpreise usw.) ab. Bezüglich der Umweltverträglichkeit sind die Recyclingverfahren in Hinblick auf den Ressourcenverbrauch (Energieaufwand, Wasserverbrauch, Stoffströme, usw.) und die Umweltbelastung (Abwässer, Emissionen, Sondermüll, usw.) zu untersuchen.

#### 4. Ausblick

Im Sinne einer verbesserten ökologischen Qualität des Produktes „Windkraftanlage“ wird zukünftig also die Phase nach der Nutzung verstärkt berücksichtigt werden müssen. Genaugenommen beginnt der Recyclingprozeß bereits beim Entwurf und der Entwicklung einer WKA. Als Stichwort sei hier recyclinggerechtes Konstruieren genannt; dies beinhaltet sowohl die Wahl der Materialien als auch die eigentliche Konstruktion. Zukünftig wird darüber nachzudenken sein, welche Stoffe sich unter Umständen durch weniger bedenkliche Stoffe ersetzen lassen. Als Ersatzstoffe stehen nachwachsende Rohstoffe (z.B. Holz, siehe [7]), Recyclate und neue Kunststoffe (z.B. eine thermoplastische Matrix wie die Peek-Matrix) zur Verfügung. Für diese Stoffe sind jedoch noch umfangreiche Forschungsarbeiten notwendig, um eindeutige Materialeigenschaften garantieren zu können. Für Recyclat aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) wird zur Zeit zum Beispiel der Einsatz als Verstärkungsmaterial von Thermoplasten untersucht.

Neben der Frage, welche der o.g. Verfahren überhaupt im größeren Rahmen technisch realisierbar sind, interessiert die Frage nach der Ökobilanz. Welcher Entsorgungsweg der ökologisch sinnvollste ist, soll in den nächsten Monaten beim DEWI durch Vergleich der einzelnen Verfahren herausgefunden werden. Zu berücksichtigen ist dabei vor allem die Umweltverträglichkeit der einzelnen Verfahren, d.h. wieviel Energie wird für das Recycling verwendet, welche zusätzlichen Stoffe (z.B. Wasser, Katalysatoren usw.) müssen eingesetzt werden und welche Belastungen für Mensch und Umwelt entstehen beim Entsorgungsprozeß (Abwässer, Abgase, Restmüll).

Dies wird letztendlich auch zu einer neuen Definition der Erntefaktoren führen, bei deren Ermittlung man zukünftig die erzeugte Energie in Relation zum Energieaufwand für Herstellung, Betrieb **und** Entsorgung setzen muß. In diesem Zusammenhang möchten wir an dieser Stelle alle interessierten Institutionen um ihre Mitarbeit bitten.

## 5. Literatur

- [1] Hübner, Heinz; Simon-Hübner, Daniela: Ökologische Qualität von Produkten: Ein Leitfaden für Unternehmen. Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, 1991.
  - [2] Keuper, Armin: Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland Stand 31.12.1994. DEWI-Magazin (1995) Nr. 6, S. 12-24.
  - [3] Datenblätter für die Landesförderung. Deutsches Windenergie-Institut: 1994.
  - [4] Kunststoff-Recycling: Der Stand der Dinge. Verband Kunststoffherstellende Industrie e.V.
  - [5] Hornbogen, E.; Bode, R.; Donner, P.: Recycling - Materialwissenschaftliche Aspekte. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
  - [6] Käufer, H.; Thiele, A.: Geschlossene Materialkreisläufe für Kunststoffe durch Wiederverwertung von Abfall. Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1993, S. 102-106.
  - [7] Möller, Frank: Entwicklung eines leichten, steifen Sandwichwerkstoffes aus natürlichen Rohstoffen: DEWI-Magazin (1994) Nr. 5, S. 61-62
-