

# Erfassung und Verwertung von Windenergieanlagen

11

JENS B. WIEBERNEIT, ULRIKE STADTMÜLLER, THOMAS SCHMID & VOLKER KUMMER



Abb. 1: Anlagenteile einer WEA.

In den nächsten Jahren werden der Rückbau und die Verwertung von Windenergieanlagen (WEA) eine wichtige Rolle spielen. Allein im Jahr 2000 wurden beispielsweise 1 495 WEA in Deutschland in Betrieb

genommen und müssen folglich bei einer Laufzeit von circa 20 Jahren in den kommenden Jahren rückgebaut oder repowert werden.

## 1 Hintergrund

Der Einsatz der erneuerbaren Energien wie Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie, Biomasse und Erdwärme ist nicht nur aus ökologischer Sicht von Vorteil. Erneuerbare Energien sind sauber, vermeiden Treibhausgase und Schadstoffe und vermindern dadurch den Treibhausgaseneffekt sowie Gesundheitsbe-

lastungen. Auch gesamtökonomisch betrachtet bringt ihr Einsatz einige Vorteile mit sich: Sie sind Energieträger, durch deren Nutzung teure fossile Brennstoffe wie Öl und Gas eingespart werden können. Die Windkraft ist eine vermeintlich unerschöpfliche Energiequelle. Aus diesem Grund haben sich WEA

zu einem der wichtigsten Produzenten der erneuerbaren Energien entwickelt. Mit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2000 wurden der Bau und das Betreiben von WEA für Kommunen, Firmen, Verbände, Energieunternehmen und sonstige Investoren durch politische und finanzielle Unterstützung begünstigt. Aufgrund dessen sind in den letzten zwei Jahrzehnten viele WEA gebaut und in Betrieb genommen worden und müssen folglich bei einer Laufzeit von circa 20 Jahren in den kommenden Jahren rückgebaut oder repowert werden. Dies ist in der betriebswirtschaftlichen Auslegung sowie der notwendigen Prüfung der Standortsicherheit begründet. (1) (2)

In Deutschland sind zurzeit circa 25 000 WEA (Stand März 2015) mit einer Leistung von etwa 50 TWh installiert, was annähernd einem Anteil von 10 % an erneuerbaren Energien entspricht. 25 % der Gesamtenergie werden in Deutschland aus erneuerbaren Energien bezogen. (3)

Da beispielsweise im Jahr 2000 1 495 WEA in Betrieb genommen wurden (4), ist ab dem Jahr 2020 mit dem Rückbau und der Verwertung dieser WEA zu rechnen. Derzeit gibt es für einzelne Bestandteile noch keine zufrieden stellenden Entsorgungsoptionen.

## 2 Zielsetzung

In einer Kooperation des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) mit der Hochschule RheinMain wurde eine Bachelorarbeit verfasst mit dem Ziel, den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Erfassung und Verwertung darzustellen sowie die

Weiter- und Wiederverwendung von WEA zu untersuchen. Hierfür wurden Hersteller und Betreiber von WEA bezüglich der Thematik befragt und eine in Zukunft anstehende Materialmenge von WEA für Hessen abgeschätzt. (5)

## 3 Verwendete Werkstoffe einer WEA

In Abbildung 2 sind die Werkstoffe zur Herstellung einer WEA zu sehen. Den größten Massenanteil einer WEA macht Beton mit 60–65 % aus. Mit 30–35 % hat Stahl den zweitgrößten Massenanteil. Verbundwerkstoffe, wie glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK), sind zu 2–3 % in einer WEA vorhanden. Die übrigen 5 % der Massenanteile sind aufgeteilt in elektronische Komponenten, Kupfer, Aluminium, Polyvinylchlorid (PVC) und Betriebsflüssigkeiten. (2)

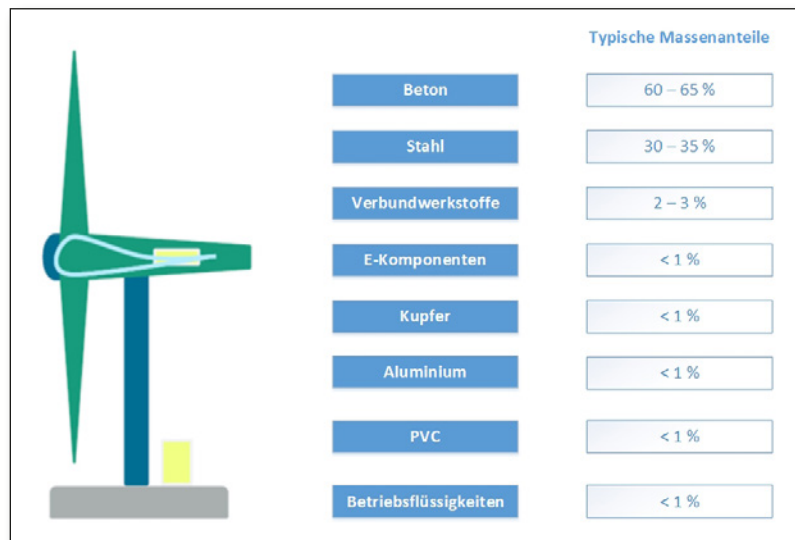


Abb. 2: Werkstoffe zur Herstellung von Windkraftanlagen, dargestellt nach (2).

## 4 Weiter- und Wiederverwendung von Windenergieanlagen

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) muss ein Hersteller generell das Ziel verfolgen, dass der Stoffkreislauf umweltfreundlich geschlossen wird. Auch Hersteller von WEA müssen nach § 23 (Produktverantwortung) des KrWG ihre WEA so gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch die Entstehung von Abfällen vermindert wird. Zusätzlich müssen anfallende Abfälle nach dem Gebrauch umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden. Des Weiteren müssen die Anlagen technisch langlebig und mehrfach verwendbar sein. Vorrangig sollen bei der Produktion Sekundärrohstoffe zum Einsatz kommen. Schadstoffhaltige Materialien müssen für die Entsorgung gekennzeichnet werden. (6) Ein ökologisch nachhaltigerer Schritt der Vermeidung im Sinne des KrWG ist es somit, wenn WEA nach Ablauf ihrer Lebenszeit von circa 20 Jahren weiterbetrieben oder wiederverwendet werden, anstatt sie rückzubauen und zu recyceln. Je mehr Energie eine WEA in ihrer Lebenszeit produziert, umso nachhaltiger ist dies für den Stoffkreislauf. (7)

### 4.1 Weiterverwendung von ganzen Anlagen

Der Weiterbetrieb von WEA über die ursprünglich geplante Lebensdauer von circa 20 Jahren hinaus wird nach dem neuen EEG 2014 und dem dadurch entfallenden Repowering-Bonus für WEA-Betreiber zunehmend wirtschaftlich interessant. Allerdings haben sich viele WEA-Betreiber mit der Frage des Weiterbetriebs noch nicht intensiv beschäftigt. Damit eine WEA auch weiterhin Strom erzeugen kann, muss aber erneut ihre Standsicherheit nachgewiesen werden. (7)

### 4.2 Wiederverwendung von ganzen Anlagen

Der ursprüngliche Sinn einer Wiederverwendung besteht darin, dass ein Gegenstand mehrmals benutzt wird, bevor er endgültig entsorgt wird. Im Fall einer Wiederverwendung von WEA ist der Vorgang der gleiche: Eine WEA wird an Standort A abgebaut und an Standort B wieder aufgebaut. Der prinzipielle Vorgang eines Abbaus und die dafür erforderlichen Maßnahmen erfolgen an Standort B in umgekehrter Reihenfolge wie an Standort A. Es gibt verschiedene Verfahren, um solch ein Rückbau-Projekt durchzuführen. Der Transport der WEA nach dem Rückbau zum Standort B stellt häufig eine große, logistische Herausforderung für die beteiligten Unternehmen dar. Trotzdem erfolgt häufig der Weiterverkauf von WEA in osteuropäische Länder. (8)

### 4.3 Wiederverwendung von Anlagenteilen

Die Wiederverwendung von Anlagenteilen einer WEA ist ein weiterer positiver Schritt im Sinne der Abfallhierarchie des KrWG. Nach dem Rückbau einer WEA werden – sofern der Betreiber die WEA nicht als ganze Anlage wiederverwenden oder verkaufen kann – die noch intakten Anlagenteile für die Wiederverwendung eingelagert, verkauft oder in anderen eigenen WEA wiederverwendet. Defekte oder verschlissene Anlagenteile einer WEA (z. B. das Getriebe) werden ausgebaut und ggf. generalüberholt, sodass das Getriebe für die Wiederverwendung einsatzbereit ist. (2)

## 5 Technische Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Werkstoffen aus WEA

Es gibt verschiedene technische Verfahren zur Rückgewinnung der in einer WEA verwendeten Werkstoffe Beton, Metall und Kunststoff. Die einzelnen

Verfahren sind jedoch unterschiedlich weit ausgereift, somit teilweise noch nicht wirtschaftlich und industriell anwendbar.

## 5.1 Stoffliches Recycling von Beton

Wie in Abbildung 2 bereits dargestellt, ist Beton mit 60–65 % Massenanteil der in größter Menge benötigte Baustoff einer WEA. Nach dem Rückbau der WEA müssen nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB (Rückbauverpflichtung) innerhalb einer gesetzten Frist die vollständigen Fundamente sowie die zugehörigen Nebenanlagen wie Leitungen, Wege und Plätze komplett entfernt werden, damit eine Nachnutzung stattfinden kann. (9) Für diesen bedeutenden Abfallstrom gibt es jedoch derzeit noch kein effektives Recycling-Verfahren. Aktuell wird Altbeton durch Mühlen zerkleinert und die dadurch entstehende Gesteinsfraktion mit spezieller Körnung im Straßenbau wiederverwendet. Ein besserer Ansatz besteht darin, die Gesteinskörnung von der Zementmasse zu trennen. So kann der Kies als Zusatz – auch Zuschlag genannt – wieder in den Frischbeton eingesetzt werden. (10) Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wird schon seit längerer Zeit am Recycling von Beton geforscht. Mit Hilfe von elektrodynamischer Fragmentierung gelingt es, den Beton in seine Einzelbestandteile – Zuschläge und Zementstein – zu zerlegen (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Fraktion nach der Fragmentierung von Altbeton, dargestellt nach (11).

## 5.2 Stoffliches Recycling von Metallen

Abbildung 2 ist zu entnehmen, dass eine WEA circa zu einem Drittel aus Stahl besteht. Einen geringen Anteil von jeweils etwa einem Prozent machen Kupfer und Aluminium aus. Stahl, Kupfer und Aluminium sind auf dem Rohstoffmarkt nach dem Rückbau der WEA zurzeit gut vermarktbar. Zudem kann Baustahl zu 99 % recycelt und wiederverwendet werden. (12) Stahlschrott ist der am meisten rezyklierte Rohstoff der Welt. Es treten beim Recyclingprozess keine Qualitätsverluste auf, was Stahl zu einem der nachhaltigsten Werk- und Baustoffe überhaupt macht. Bei der Stahlherstellung konnten in den letzten Jahren Energie- und Ressourceneffizienzpotentiale ausgeschöpft werden. Zudem konnte durch Substitution von Oxygenstahl durch Elektro Stahl der Primärenergieverbrauch gesenkt werden. Die Optimierung liegt somit bei der Nutzung des Werkstoffes sowie in den Möglichkeiten zur Gewichtsminimierung (Leichtbau), in hoher Reparaturfähigkeit und Nutzungsdauer. (13) Bei den Seltene Erden-Elementen (SEE), welche in einer WEA bei getriebelosen Synchrongeneratoren im Permanentmagneten enthalten sind, gibt es derzeit kein industriell angewendetes

Recycling-Verfahren. Eine Möglichkeit nach dem Rückbau der WEA besteht darin, den Permanentmagneten als Ersatzteil einzulagern oder zu verkaufen. Wenn dies nicht möglich ist, muss der Permanentmagnet verschrottet werden. Diverse Hersteller bauen die Magnete bereits heute aus und lagern sie für ein künftiges Recycling von NdFeB-Magneten ein. (14)

## 5.3 Stoffliches Recycling von Kunststoffen

Die in einer WEA enthaltenen Massenanteile von Kunststoffen setzen sich zu zwei bis drei Prozent aus Verbundwerkstoffen und knapp einem Prozent aus PVC zusammen. Diese Prozentangaben wirken gering, stellen aber in der Summe der verbauten WEA eine große Materialmenge dar.

Für die in der Zukunft anfallende Menge an Rotorblättern – der VDI geht für das Jahr 2024 von mehr als 10 000 t pro Jahr aus – existiert derzeit noch kein im industriellen Maßstab anwendbares Recycling-Verfahren. Aktuell ist der Stand der Technik eine Kombination aus stofflicher und thermischer Verwertung. Bei der stofflichen Verwertung werden die Verbundwerkstoffe zu minderwertigen Teilen verbaut. Bei diesem sogenannten Downcycling werden verschlissene, defekte Rotorblätter zunächst in große Stücke gesägt, dann geschreddert und zu neuen Produkten, wie z. B. Parkbänken und Lärmschutzwällen, weiter verarbeitet. Die durch das Schreddern erhaltenen Verbundwerkstoff-Schnipsel können auch als Untergrundverfüllung im Straßenbau eingesetzt werden. Bei einer anderen Methode werden Rotorblätter ebenfalls demontiert und vorzerkleinert, sodass diese zur Aufbereitungsanlage transportiert werden können. Anschließend werden FE- und NE-Metalle abgetrennt, die Rotorblätter mit anderen Materialien

zur Mitverbrennung vermischt und im Zementwerk energetisch verwertet. Die Mitverbrennung hat den Vorteil, dass durch den hohen Kohlenstoffanteil der Einsatz fossiler Rohstoffe minimiert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass die bei der Verbrennung anfallenden Aschen entsprechend ihrer Zusammensetzung als Rohstoffsubstitut in der Zementherstellung eingesetzt werden können.

Die Rückgewinnung und Wiederverwendung der Fasern der Rotorblätter wäre nach der Abfallhierarchie des KrWG eine wesentlich nachhaltigere Anwendung als die thermische oder stoffliche Verwertung. Aktuell haben die produzierten Rotorblätter einen Anteil von circa 70 % GFK. Wegen des vergleichsweise niedrigen Materialpreises von GFK erscheint ein stoffliches Recycling dafür nicht wirtschaftlich. CFK wird derzeit nur an hochbelasteten Stellen der Rotorblätter zur Verstärkung verbaut. (12)

## 6 Materialmengen der WEA in Hessen

Die meisten Alt-WEA werden nach dem Rückbau in Deutschland ins Ausland, bevorzugt nach Osteuropa, verkauft und abtransportiert, um dort für eine Wiederverwendung aufgebaut zu werden (8). Das heißt, die Werkstoffe einer WEA bleiben meist nicht im Inland und demzufolge kann keine qualifizierte Auskunft bezüglich der aktuellen Materialmengen gegeben werden.

Derzeit sind 771 WEA in Hessen in Betrieb. Diese haben eine Gesamtleistung von 1 140 MW. Um das Materialaufkommen der einzelnen verbauten Materialmengen zu erfassen, wurden aus den am häufigsten verbauten WEA-Modellen in verschiedenen Leistungsklassen Mittelwerte abgeschätzt. Zur Übersicht sind diese in Leistungsklassen von  $P < 1$  MW,  $1 < P < 3$  MW und  $P \geq 3$  MW aufgeteilt. Tabelle 1 zeigt die

gesamten Massenanteile der einzelnen Leistungsklassen mit der Anzahl der WEA aufsummiert. Dies ergibt eine gesamte Materialmenge von ca. 237 000 t.

Tab. 1: Gesamte Materialmasse in Hessen, dargestellt nach (15).

Gesamte Materialmasse in Hessen	
Stahl	193 163,3 t
Verbundwerkstoffe	16 617,7 t
E-Komponenten	5 488,5 t
Kupfer	5 488,5 t
Aluminium	5 488,5 t
PVC	5 488,5 t
Betriebsflüssigkeiten	5 488,5 t
<b>Gesamte Materialmenge</b>	<b>237 223,5 t</b>

## 7 Befragung und Auswertung

Es wurde ein Fragebogen konzipiert, der an die größten Hersteller und Betreiber von WEA mit Sitz in Deutschland gesendet wurde. Dieser soll Auskunft

über die aktuelle Situation im Hinblick auf den Rückbau, die Verwertung, Wiederverwendung und das Recycling von WEA geben. Es wurden im Inland

die größten Betreiber sowie auch kleinere und mittelständische Betreiber angefragt. Um den Fokus auf Hessen zu setzen, handelt es sich bei den befragten Betreibern der WEA vorrangig um hessische Betreiber. Ziel der Befragung war es, einen Trend für die WEA-Branche abzuleiten. Es wurden 14 Hersteller und 51 Betreiber von WEA angeschrieben. Eine Rücklaufquote von insgesamt 65 % zeigt das hohe Interesse an der Thematik seitens der angefragten WEA-Unternehmen. Abbildung 4 zeigt, dass bei einem großen Anteil der befragten Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von WEA existieren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die WEA-Unternehmen sich zum großen Teil mit der Thematik Rückbau, Weiter- und Wiederverwendung sowie Verwertung von WEA befassen. Es bleibt jedoch fraglich, ob die Unternehmen sich wirklich inhaltlich mit Konzepten auseinandersetzen, da derzeit der Verkauf der WEA profitabler ist und somit die Verwertung dieser zunächst vermieden wird. Eine mögliche Begründung dafür, warum keine Informationen

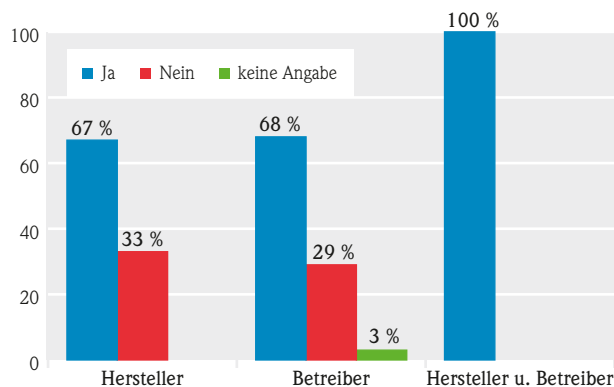


Abb. 4: Konzepte zum Rückbau der befragten Unternehmen.

zu Rückbaukonzepten öffentlich verfügbar gemacht werden, ist, dass die Konzepte entweder noch nicht ausreichend ausgereift bzw. entwickelt sind, um sie zu implementieren oder sie aus unternehmensinternen Gründen noch nicht veröffentlicht werden dürfen (Betriebsgeheimnis). Derzeit werden bei der Verwertung von WEA entweder die etablierten Verfahren angewandt oder die WEA komplett bzw. in Einzelteilen verkauft.

## 8 Diskussion und Ausblick

Die energiepolitisch gesteckten Ziele der Bundesregierung bestehen darin, den Anteil der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien auf 80 % am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2050 zu erhöhen. Die hessische Landesregierung plant zudem, bis zum Jahr 2020 20 % aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Diese Vorhaben lassen auf den benötigten, großen Anteil der Windkraft schließen. (16) (17)

Mit Mittelwerten wurde statistisch eine Gesamtmaterialmenge von circa 237 000 Tonnen errechnet, für die in Zukunft ein Recycling ansteht. Im Vergleich zu anderen Bundesländern, wie z. B. Niedersachsen (8 233 MW) und Brandenburg (5 456 MW) (18) ergibt sich für das Bundesland Hessen (1 140 MW) zum jetzigen Zeitpunkt eine wesentlich geringere zu recycelnde Materialmenge von WEA.

Die Weiterverwendung von WEA (nach Prüfung auf erneute Standsicherheit nach 20 Jahren) hat in manchen Fällen einen positiven Einfluss auf die Ökobilanz der WEA. Wenn eine bereits leistungsstarke

WEA nach 20 Jahren weiterbetrieben werden kann, ist das ökonomisch und ökologisch gesehen von Vorteil. Eine leistungsschwache WEA weiter zu betreiben, schmälert den Fortschritt des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Auch die Wiederverwendung von gebrauchten Anlagenteilen hat einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung. Bevor Anlagenteile recycelt oder verwertet werden, ist es sinnvoller, diese in anderen WEA weiterzuverwenden, bevor ein Ersatzteil dafür neu produziert werden muss. Auf Dauer gehen jedoch Wertstoffe verloren, weil diese im Ausland auf schlechtem Niveau oder gar nicht recycelt werden. Somit könnte es in manchen Fällen volkswirtschaftlich sinnvoller sein, die Rohstoffe im Land zu belassen. Betriebswirtschaftlich betrachtet könnte dies dann aber zunächst vielleicht kontraproduktiv sein.

Die Betrachtung der in den WEA verwendeten SEE (Neodym und Dysprosium) hat ergeben, dass diese in getriebelosen WEA in Modellen mit Permanentmagneten enthalten sind. Der Vorteil dieses WEA-

Modells ist die Gewichtsreduktion durch den Permanentmagneten, den Wegfall des Getriebes und demzufolge auch kein zu erwartender Wartungsaufwand oder Defekt dieses Anlagenteils. Getriebelose WEA werden deshalb bevorzugt im Offshore-Bereich eingesetzt. Zwischen den Jahren 2000 und 2009 waren circa zehn Prozent dieser getriebelosen WEA in Deutschland in Betrieb. Dennoch lässt sich keine qualifizierte Auskunft darüber geben, wie viele davon mit Permanentmagneten oder mit elektrisch erregten Magneten (ohne SEE) verbaut worden sind.

Die im Rahmen der Bachelorarbeit erarbeiteten In-

halte zeigen auf, dass der Rückbau und die Verwertung der Materialien einer WEA größtenteils unproblematisch sind. Eine WEA hat derzeit eine Recyclingquote von circa 80–90 % bezogen auf die Gesamtanlage (19). Schwierig ist hingegen noch das Recycling von Verbundwerkstoffen wie GFK und CFK. Der Ausblick der WEA-Branche bezüglich des Rückbaus und der Verwertung ist trotz der o. g. Problematik positiv zu werten. Die Herausforderung des Recyclings von Verbundwerkstoffen wird mit Eintritt eines industriell anwendbaren Verfahrens und der Verwendung von Hybridwerkstoffen in Zukunft gelöst werden können.

## Literaturverzeichnis

1. Bundesverband WindEnergie e.V. (2015): A bis Z - Fakten zur Windenergie. [[https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/z-fakten-zur-windenergie/bwe\\_abisz\\_3-2015\\_72dpi\\_final.pdf](https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/z-fakten-zur-windenergie/bwe_abisz_3-2015_72dpi_final.pdf); Stand: 12. 10. 2015].
2. Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Umwelt-Engineering Pfinztal bei Karlsruhe (2013): Recycling von Windkraftanlagen. [[http://hamburgtrend.info/fileadmin/user\\_upload/pdf/Vortraege\\_2013/Woidasky\\_Recycling\\_von\\_Windkraftanlagen.pdf](http://hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege_2013/Woidasky_Recycling_von_Windkraftanlagen.pdf); Stand: 12. 10. 2015].
3. WindGuard (2015): WindGuard und die Windenergie. [<http://www.windguard.de/unternehmen/historie.html>; Stand: 12. 10. 2015].
4. Bundesverband WindEnergie e.V. (2015): Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland. [<https://www.windenergie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>; Stand: 12.10. 2015].
5. WIEBERNEIT, J. (2015): Bachelorarbeit. Erfassung und Verwertung von Windenergieanlagen. [[http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/abfall/ressourcenschutz/Erfassung\\_und\\_Verwertung\\_von\\_Windenergieanlagen.pdf](http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/abfall/ressourcenschutz/Erfassung_und_Verwertung_von_Windenergieanlagen.pdf)]
6. BECKMANN, M. (2014): KreislaufwirtschaftsG. München: (Deutscher Taschenbuch Verlag).
7. PAULSEN & THÜRING (Hrsg.) (2015): Jahrbuch Windenergie. Berlin: (Bundesverband WindEnergie e.V.).
8. ULGES, P. (2015): Bachelorarbeit. Potentiale für die Nachnutzung und Entsorgung von Windkraftanlagen. Hochschule RheinMain.
9. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (2012): Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich [[https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/erlass-aenderung\\_2013\\_endg\\_0.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/erlass-aenderung_2013_endg_0.pdf); Stand: 13. 06. 2015].
10. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (2012): FORSCHUNG KOMPAKT - Blitz, schlag' ein! [<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>; Stand: 26. 05. 2015].
11. SEIFERT, S., THOME, V. & KARLSTETTER, C. (2013): Elektrodynamische Fragmentierung. [[http://www.vivis.de/phocadownload/2014\\_rur/2014\\_RuR\\_431\\_438\\_Seifert.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_431_438_Seifert.pdf); Stand: 26. 05. 2015].
12. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE) (2014): Kurzanalyse Nr. 9 - Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. [[http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf); Stand: 24. 04. 2015].
13. Bergische Universität Wuppertal (2015): Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen. [<http://www.bauforumstahl.de/upload/docu>

- ments/nachhaltigkeit/Sachstandsbericht.pdf; Stand: 27. 05. 2015].
14. Öko-Institut e. V. (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. [<http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>; Stand: 01. 06. 2015].
  15. Regierungspräsidium Hessen (2015): Länderinformationssystem für Anlagen (LIS-A). [<http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/energie/windkraftanlagen.htm>; Stand: 01.05.2015].
  16. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2010): Das Energiekonzept 2050. [[http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion.pdf?__blob=publicationFile); Stand: 22. 06. 2015].
  17. Bremer Energie Institut, Bosch & Partner (2012): Gutachten zu den Regionalen Energiekonzepten Hessen unter besonderer Berücksichtigung Erneuerbarer Energien. [[https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/regionale-energiekonzepte\\_hauptbericht.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/regionale-energiekonzepte_hauptbericht.pdf); Stand: 22. 06. 2015].
  18. Bundesverband WindEnergie e.V. (2014): Bundesländer TOP 5: Installierte Leistung gesamt. [<https://www.windenergie.de/infocenter/statistiken/bundeslaender/bundeslaender-im-leistungsvergleich-mw#>; Stand: 22. 06. 2015].
  19. Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Umwelt-Engineering Pfinztal bei Karlsruhe (2013): Recycling von Windkraftanlagen. [<http://www.hamburg.de/contentblob/3577452/data/2010-02-23-nr23-technisches-begleitgutachten-gl.pdf>; Stand: 24. 04. 2015].

## Autoren

Jens B. Wieberneit (B. Eng.)  
Gartenstraße 34  
65239 Hochheim am Main

Prof. Dr. Ulrike Stadtmüller  
Hochschule RheinMain  
Fachbereich Ingenieurwesen  
Studienbereich Umwelttechnik  
Am Brückweg 26  
65428 Rüsselheim

Dipl.-Ing. (FH) Umweltschutz Volker Kummer  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Dezernat I1 Luftreinhaltung, Kataster, Planungen,

Abfall  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden  
E-Mail: [volker.kummer@hlnug.hessen.de](mailto:volker.kummer@hlnug.hessen.de)

Prof. Dr. Thomas Schmid  
Präsident des Hessischen Landesamts für Umwelt  
und Geologie  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden