



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



*Für eine lebenswerte Zukunft*

# Erfassung und Verwertung von Windenergieanlagen

---

## **BACHELORARBEIT**

**Bachelor of Engineering**

**Jens Wieberneit**

am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der  
Hochschule RheinMain im Studiengang Umwelttechnik  
in Zusammenarbeit mit dem  
Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Matrikelnummer: 360558  
Referentin: Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrike Stadtmüller  
Korreferenten: Dipl.-Ing. (FH) Volker Kummer und Prof. Dr. Thomas Schmid  
Abgabedatum: 29.07.2015

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen. Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir. Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift Verfasser

## Zusammenfassung

In den nächsten Jahren werden der Rückbau und die Verwertung von Windenergieanlagen (WEA) eine wichtige Rolle spielen. Allein im Jahr 2000 wurden 1.495 WEA in Deutschland in Betrieb genommen und müssen folglich bei einer Laufzeit von circa 20 Jahren, was in der betriebswirtschaftlichen Auslegung sowie der notwendigen Prüfung der Standsicherheit begründet ist, in den kommenden Jahren rückgebaut oder repowert werden. Daher wurde in Kooperation mit dem *Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)* und der *Hochschule RheinMain* diese Bachelorarbeit verfasst mit dem Ziel, den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Erfassung und Verwertung von WEA zu untersuchen. Hierzu wurden Hersteller und Betreiber von WEA befragt sowie eine in Zukunft anstehende Materialmenge von WEA für Hessen berechnet. Zudem wurde ein Interview mit dem kaufmännischen Projektmanager der Abteilung Repowering des Unternehmens *juwi AG* geführt, um einen praktizierenden Projektentwickler beispielhaft vorstellen zu können.

Eine Rücklaufquote der Befragung von insgesamt 65 % zeigt das hohe Interesse an der Thematik seitens der WEA-Betreiber und Hersteller. Bei der großen Mehrheit der involvierten Unternehmen existieren Konzepte zum Rückbau. Derzeit werden die WEA nach dem gängigen Standard verwertet oder komplett beziehungsweise in Einzelteilen verkauft.

Die Abschätzung der Materialmengen der Windenergieanlagen in Hessen ergab eine Gesamt-Materialmenge von circa 236.000 Tonnen. Im Vergleich zu anderen Bundesländern, wie zum Beispiel Niedersachsen und Brandenburg, hat Hessen eine wesentlich geringere Materialmenge von WEA, die in Zukunft recycelt werden muss.

Bei dem Unternehmen *juwi AG* wurde in Erfahrung gebracht, dass circa 80-90 % der Alt-WEA als komplette Anlage ins Ausland verkauft werden – was sich auch u. a. in der Befragung widerspiegelt. Damit ergibt derzeit die Erfassung und Verwertung der Stoffströme von WEA im Inland wenig Sinn. Eine WEA hat aktuell eine Recyclingquote von 80-90 %. Eine Schwierigkeit ist hingegen noch, dass es noch kein im industriellen Maßstab anwendbares Recycling-Verfahren von Verbundwerkstoffen gibt. Aktuell werden jedoch in verschiedenen Forschungsprojekten Verfahren wie Pyrolyse, Solvolyse und elektrodynamische Fragmentierung untersucht und messbare Erfolge erzielt. Somit ist es von den Forschungsfortschritten abhängig und nur noch eine Frage der Zeit, bis WEA zu 100 % im industriellen Maßstab recycelt werden können.

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	II
Abkürzungsverzeichnis .....	III
1 Einführung .....	1
2 Aufbau und Funktion einer Windenergieanlage .....	3
2.1 Funktion einer Windenergieanlage .....	4
2.2 Verwendete Werkstoffe einer Windenergieanlage .....	7
2.2.1 Beton .....	8
2.2.2 Metalle .....	9
2.2.3 Kunststoffe .....	11
2.2.4 Betriebsflüssigkeiten .....	14
3 Weiter- und Wiederverwendung von Windenergieanlagen .....	15
3.1 Weiterverwendung von ganzen Anlagen .....	16
3.2 Wiederverwendung von ganzen Anlagen .....	17
3.3 Wiederverwendung von Anlagenteilen .....	17
4 Technische Möglichkeiten zur Rückgewinnung der Rohstoffe .....	19
4.1 Stoffliches Recycling von Beton .....	19
4.2 Stoffliches Recycling von Metallen .....	22
4.3 Stoffliches Recycling von Kunststoffen .....	23
4.4 Stoffliches Recycling von Betriebsflüssigkeiten .....	28
5 Materialmengen der Windenergieanlagen in Hessen .....	29
6 Befragung und Auswertung .....	33
7 Diskussion und Ausblick .....	39
Literaturverzeichnis .....	43
Anhang .....	49

## Inhaltsverzeichnis

---

A Fragebogen zum Rückbau und zur Verwertung von Windenergieanlagen .....	49
B Statistische Auswertung des Fragebogens.....	56
C Interview bei juwi AG .....	74
Danksagung .....	82

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der häufigsten WEA-Modelle Hessens in Leistungsklassen .....	29
Tabelle 2: Umrechnung der Prozentangaben aus Abbildung 2 .....	30
Tabelle 3: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse $P < 1$ MW.....	30
Tabelle 4: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse $1 < P < 3$ MW	31
Tabelle 5: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse $P \geq 3$ MW.....	31
Tabelle 6: Gesamtmasse der WEA in Hessen.....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Windenergieanlage .....	3
Abbildung 2: Werkstoffe zur Herstellung von Windkraftanlagen.....	7
Abbildung 3: Verwendete Materialien einer Windenergieanlage.....	8
Abbildung 4: Werkstoffeteilung der Metalle .....	9
Abbildung 5: Werkstoffeteilung der Kunststoffe .....	12
Abbildung 6: Abfallhierarchie.....	15
Abbildung 7: Fraktion nach der Fragmentierung von Altbeton .....	20
Abbildung 8: Recycling-Technologien für CFK-Komposite .....	27
Abbildung 9: Rücklauf Fragebogen insgesamt .....	56
Abbildung 10: Rücklauf Fragebogen Hersteller .....	57
Abbildung 11: Rücklauf Fragebogen Betreiber .....	57
Abbildung 12: Aufteilung der WEA-Hersteller und Betreiber .....	58
Abbildung 13: Konzepte zum Rückbau der befragten Unternehmen.....	59
Abbildung 14: Ende der Einsatzzeit der WEA für die befragten Unternehmen .....	60
Abbildung 15: Vorgehen nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA.....	60
Abbildung 16: Anreize zum Rückbau von WEA.....	62
Abbildung 17: Art der Anreize zum Rückbau der WEA .....	63
Abbildung 18: Erfahrung mit dem Rückbau von WEA (Projekte) .....	63
Abbildung 19: Durchführung des Rückbaus .....	64
Abbildung 20: Verkauf der WEA.....	65
Abbildung 21: Wiederverwendung von Anlagenteilen der WEA.....	66
Abbildung 22: Wiederverwertung von Anlagenteilen der WEA .....	67
Abbildung 23: Konzepte / Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA .....	69
Abbildung 24: Bestehende Konzepte / Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA.....	70
Abbildung 25: Investition in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA .....	71
Abbildung 26: Verwendung von recyceltem Material für Bau von WEA.....	72
Abbildung 27: Interesse an Umfrageergebnissen .....	73

## Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
BauGB	Baugesetzbuch
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BPW	Bewertung und Prüfung zum Weiterbetrieb
CFK	kohlefaserverstärkte Kunststoffe
CNT	Kohlenstoffnanoröhren
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DepV	Deponieverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung
FE-Metalle	Eisenmetalle
GFK	glasfaserverstärkte Kunststoffe
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Megawatt
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
PVC	Polyvinylchlorid
RC-Beton	Recycling-Beton
SEE	Seltene Erden-Elemente
TASi	Technische Anleitung für Siedlungsabfall
TWh	Terra Watt Stunde
WEA	Windenergieanlage

### 1 Einführung

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 Treibhausgaseffekt sowie Gesundheitsbelastungen. 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 Windenergieanlagen (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 Standsicherheit begründet (Bundesverband WindEnergie e.V., 2015), (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Umwelt-Engineering Pfinztal bei Karlsruhe, 2013). 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. (WindGuard, 2015)

Da beispielsweise im Jahr 2000 1.495 WEA in Betrieb genommen wurden (Bundesverband WindEnergie e.V., 2014), ist ab dem Jahr 2020 mit dem Rückbau und der Verwertung dieser WEA zu rechnen. Derzeit gibt es noch keine zufrieden stellenden Entsorgungsoptionen. Aus diesen Gründen wird die Thematik der Erfassung und Verwertung von WEA zukünftig von großem Interesse sein.

Zur Einführung werden Aufbau und Funktion einer WEA und weiterführend die Grundlagen der verwendeten Werkstoffe einer WEA – Beton, Metalle, Kunststoffe sowie Betriebsflüssigkeiten – beschrieben. In Kapitel 3 dieser Arbeit wird auf die Weiter- und Wiederverwendung von WEA eingegangen. Hierbei wird zwischen Weiter- oder Wiederverwendung von ganzen

Anlagen beziehungsweise der Wiederverwendung von Anlagenteilen unterschieden. Ferner wird untersucht, wie WEA sowie ihre Anlagenteile mit heute zur Verfügung stehenden Verfahren am ökologischsten und ökonomischsten recycelt werden können. Ein weiterer Teil der Abschlussarbeit stellt die Analyse dessen dar, welche Stoffgruppen in einer WEA enthalten sowie in welcher Menge sie vorhanden sind und welche Stoffströme somit in den nächsten Jahren für Hessen anfallen werden.

Um Erkenntnisse zu möglichen Rückbaukonzepten, konkreten Recyclingvorhaben und potentiellen Stoffmengen zu erhalten, wurde eine Umfrage mit Herstellern und Betreibern von WEA durchgeführt. Anschließend wurde eine statistische Auswertung erstellt, um mögliche Trends erkennen und ableiten zu können. Bereits bei der Errichtung beziehungsweise Produktion einer WEA können Herstellungsprozesse und Anlagenteile möglicherweise optimiert werden. Diese Optimierungspotentiale werden in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt und erläutert. Zudem wurde mit dem kaufmännischen Projektmanager der Repowering-Abteilung des Unternehmens *juwi AG* ein persönliches Interview bezüglich der Erfassung und Verwertung von WEA geführt, um weitere praxisrelevante Aspekte aus Sicht eines Unternehmers vorzustellen sowie mögliche nach der Befragung noch offene Fragen zu klären.

### 2 Aufbau und Funktion einer Windenergieanlage

WEA werden entweder im Onshore- oder Offshore-Bereich (Festland oder küstennah) eingesetzt. Sie sind vom prinzipiellen Aufbau – bis auf das Fundament und Ausstattungsmöglichkeiten wie Korrosionsschutz, Eisabwurf, Verkabelung etc. – von der Funktionsweise identisch, und unterscheiden sich nur in ihrer Leistung und somit Anlagengröße. WEA im Offshore-Bereich sind aufgrund der zur Verfügung stehenden Fläche größer und können damit einen 2- bis 2,5-fach höheren Ertrag erzielen als WEA im Onshore-Bereich, was neben der Anlagengröße mit der höheren Windgeschwindigkeit und dem stetigeren Wind auf offener See zusammenhängt. (Energie & Technik, 2012)

Eine WEA setzt sich grundsätzlich aus dem Fundament zusammen und dem Turm, welcher aus verschiedenen Materialien, wie zum Beispiel Stahl, Stahlbeton oder Holz, bestehen kann. Auf dem Turm ist die Gondel mit dem Rotor montiert und in der Gondel befindet sich der Generator. Modellabhängig sind zudem auch ein Getriebe und eine Bremse verbaut. Auf der Gondel befinden sich Messinstrumente zum Erfassen der Wetterdaten. Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Onshore-WEA (Broisy, 2013).

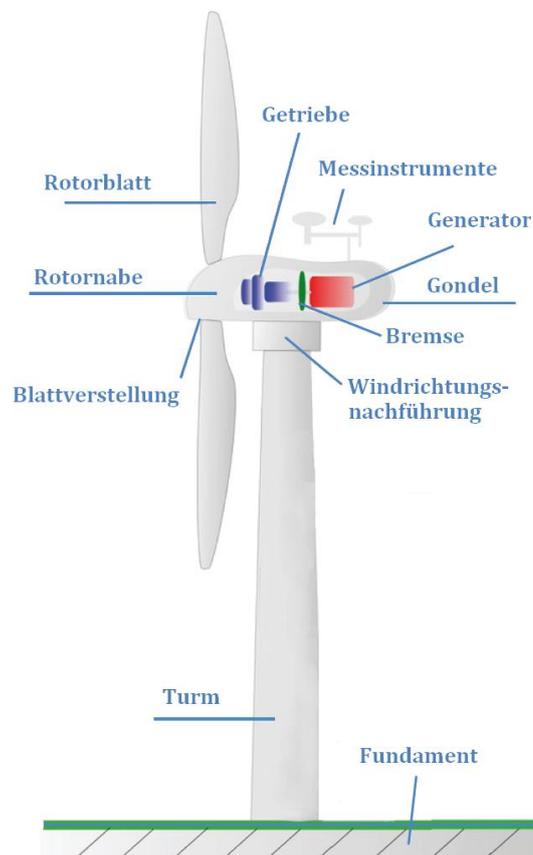


Abbildung 1: Aufbau einer Windenergieanlage, dargestellt nach (Broisy, 2013)

### 2.1 Funktion einer Windenergieanlage

Windenergie ist eine abgeleitete Form von Sonnenenergie. Die unterschiedliche Erwärmung der Erdatmosphäre durch die Sonneneinstrahlung auf verschiedene Gebiete der Erdoberfläche führt zu Dichte- und Druckunterschieden. WEA nutzen die in der Luftströmung enthaltene Energie und diese wird durch die erzeugte Rotationsbewegung mechanisch über die Rotorblätter auf die Nabe in die Gondel übertragen. Die Rotationsbewegung wird von dem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Anschließend wird die erzeugte Energie ins Stromnetz eingespeist. Es kann Gleich- oder Wechselstrom generiert werden, in Abhängigkeit davon, ob ein Synchronmotor oder Asynchronmotor in der WEA verbaut ist. (Quaschnig, 2013)

Im Folgenden werden die verschiedenen Anlagenteile einer WEA sowie ihre Funktionen näher erklärt.

#### Fundament

Das Fundament muss speziell auf die Beschaffenheit des Bodens, die Größe der WEA und die Bauart des Turms abgestimmt sein, um die Standfestigkeit in Hinblick auf die maximalen Kippmomente und die sogenannte Grundbruchfestigkeit gewährleisten zu können (Hau, 2014). Bei weichem Boden werden zusätzlich Pfähle im Boden verankert (Schaffarczyk et al., 2012). Da in Deutschland das Fundament sowie der Turm einer WEA als Bauwerk eingestuft sind, müssen umfangreiche Vorschriften der Baubehörde eingehalten werden, um den geforderten Standsicherheitsnachweis für die Genehmigung der Anlage zu erhalten. Fundamente werden als Flach- oder Tiefengründungen ausgeführt. Entscheidend ist hierbei die Frage, in welcher Tiefe man genügend feste Bodenschichten findet, um die auftretenden Belastungen aufnehmen zu können. Eine weitere Fragestellung bei der Fundamentbauart ist ferner, wie hoch der Grundwasserspiegel im Boden ist. Je höher der Sogwasserdruck im Boden ist, desto schwerer müssen die erforderlichen Auftriebsfundamente sein. (Hau, 2014)

#### Turm

Der Turm ist ein weiterer wesentlicher Bestandteil einer WEA. Die Dimensionierung des Turms wird von mehreren Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen bestimmt. Bruchfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit im Betrieb sowie die Steifigkeit sind im Hinblick auf das Schwingungsverhalten der WEA insbesondere bei extremen Windgeschwindigkeiten zu berücksich-

tigen. (Hau, 2014) Je höher der Turm errichtet wird, umso ertragreicher ist die spezifische Energielieferung (durch höhere Windgeschwindigkeit) durch den Rotor (Quaschnig, 2013). Das bedeutet jedoch auch, dass mehr Baumaterial benötigt wird. Dies wiederum hat einen negativen Einfluss auf die Gesamtkosten der WEA. Die optimale Turmhöhe ergibt sich theoretisch im Schnittpunkt der beiden Wachstumsfunktionen von Baukosten und Ertrag durch die Energielieferung. Für die Konstruktion ist vor allem die Festlegung der ersten Biegeeigenfrequenz entscheidend, da es sich hierbei um eine besonders energiereiche Schwingung handelt. Diese erzeugt im Bereich des Fundaments am Turm die größte Biegespannung und ist nicht als statische, sondern als dynamische Last zu betrachten. Um Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen zu erfüllen, können diese Biegeschwingungen maßgebenden Einfluss auf die Dimensionierung nehmen, da nicht die statische Festigkeit des Materials zur Auslegung verwendet wird, sondern die Betriebsfestigkeit, welche kleiner ausfällt und insbesondere bei spröden Werkstoffen (wie zum Beispiel unverstärktem Beton) deutlich geringer ist als die statische Festigkeit. Damit sind letztlich Materialaufwand und Baukosten verbunden. Die Transportierbarkeit zum Aufstellort wird mit zunehmender Höhe ein Kriterium für die Auswahl der geeigneten Bauart und Konstruktion. Heutzutage sind Turmhöhen von 100 Meter für große Anlagen keine Seltenheit mehr. Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren sehr verschiedene Turmbauweisen entwickelt worden. Es gibt einige Ausführungen des Turms, von Gitterkonstruktionen über Stahlrohtürme mit und ohne Seilabspannung bis hin zu massiven Betonbauten. Auch Hybridtürme werden konstruiert, bei denen die Beton- und Stahlrohrbauweise kombiniert wird. Die häufigsten Baumaterialien für den Turm sind Stahl und Beton. (Hau, 2014) Als Werkstoff bietet sich aber auch Holz als nachwachsender Rohstoff aus ökologischen Gründen an, da es CO<sub>2</sub>-neutral und leicht zu transportieren ist (Schaffarczyk et al., 2012). Hier ist das Unternehmen *TimberTower GmbH* zu nennen, das dies seit 2008 praktiziert und Holz zum Turmbau verwendet.

### Gondel

Die Gondel der WEA nimmt den Generator, das Getriebe und das Rotorlager in sich auf. Da der Generator bauartbedingt meist bei hohen Drehzahlen betrieben wird, ist ein Getriebe nötig, damit die Rotordrehzahl begrenzt werden kann. Die Aufgabe des Getriebes ist es, die langsamere Rotordrehzahl auf die schnellere Generatordrehzahl anzupassen. Das Getriebe bringt einige Nachteile mit sich, da es zum einen materialbedingt höhere Kosten und zum

anderen einen Leistungsverlust aufgrund der Reibung verursacht. Außerdem wird dadurch eine erhöhte Lärmbelastung erzeugt, was mit einem erhöhten Wartungsaufwand einhergeht. Das Betreiben einer getriebelosen WEA setzt voraus, dass eine spezielle Ausführung des Generators verbaut wurde. Dieser Generator muss über eine Vielzahl elektrischer Pole verfügen, damit auch bei niedriger Rotordrehzahl eine gute Anpassung zwischen Rotor und Netz gewährleistet ist. Allerdings werden das Gewicht und die Abmessung des Generators durch die höhere Anzahl der Pole und dem damit verbundenen Querschnitt vergrößert. (Quaschnig, 2013)

### Rotorblätter

Bei den Rotorblättern einer WEA unterscheidet man zwischen Einblattrotoren, 2-Blatt- und 3-Blatt-Rotoren. Die Einblattrotoren müssen auf der gegenüberliegenden Seite ein Gegengewicht befestigt haben, laufen im Betrieb unruhig und haben aufgrund der auftretenden Schwingungen eine hohe Materialbeanspruchung. Die 3-Blatt-Rotoren liegen nur geringfügig über dem optimalen Leistungsbeiwert (auch Erntegrad genannt) der 2-Blatt-Rotoren. Optisch laufen 3-Blatt-Rotoren ruhiger und passen sich visuell besser in die Landschaft ein. Die mechanische Belastung einer WEA ist bei den 3-Blatt-Rotoren ebenfalls geringer als bei 2-Blatt-Rotoren. Die positiven Eigenschaften der 3-Blatt-Rotoren wiegen den Nachteil des höheren Materialeinsatzes wieder auf, sodass heute überwiegend 3-Blatt-Rotoren produziert und verbaut werden. Die Form des Rotorblattes hat einen entscheidenden Einfluss auf den erzielbaren Leistungsbeiwert. Die Tiefe des Rotorblattes sollte sich dabei von der Nabe zur Spitze des Rotorblattes verjüngen. Früher wurde Holz und Metall als Werkstoff für Rotorblätter verwendet. Heutzutage kommen aus Gründen der Formbarkeit und der Gewichtsreduktion fast ausschließlich glasfaserverstärkte Kunststoffe (sogenanntes GFK) und zunehmend auch kohlefaserverstärkte Kunststoffe (sogenanntes CFK) zum Einsatz. (Quaschnig, 2013), (Schaffarczyk et al., 2012)

### 2.2 Verwendete Werkstoffe einer Windenergieanlage

Für die Herstellung einer WEA wird in einigen Prozessen zunächst auf fossile Stoffe wie Erdöl und Erdgas sowie Mineralien und Metalle zurückgegriffen. Anschließend kann eine WEA in Betrieb nachhaltig Strom produzieren.

In Abbildung 2 sind die Werkstoffe zur Herstellung einer WEA zu sehen. Den größten Massenanteil einer WEA macht der Beton mit 60-65 % aus. Mit 30-35 % hat Stahl den zweitgrößten Massenanteil. Die 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 (sogenanntes PVC) und Betriebsflüssigkeiten. (Fraunhofer ICT, 2013)

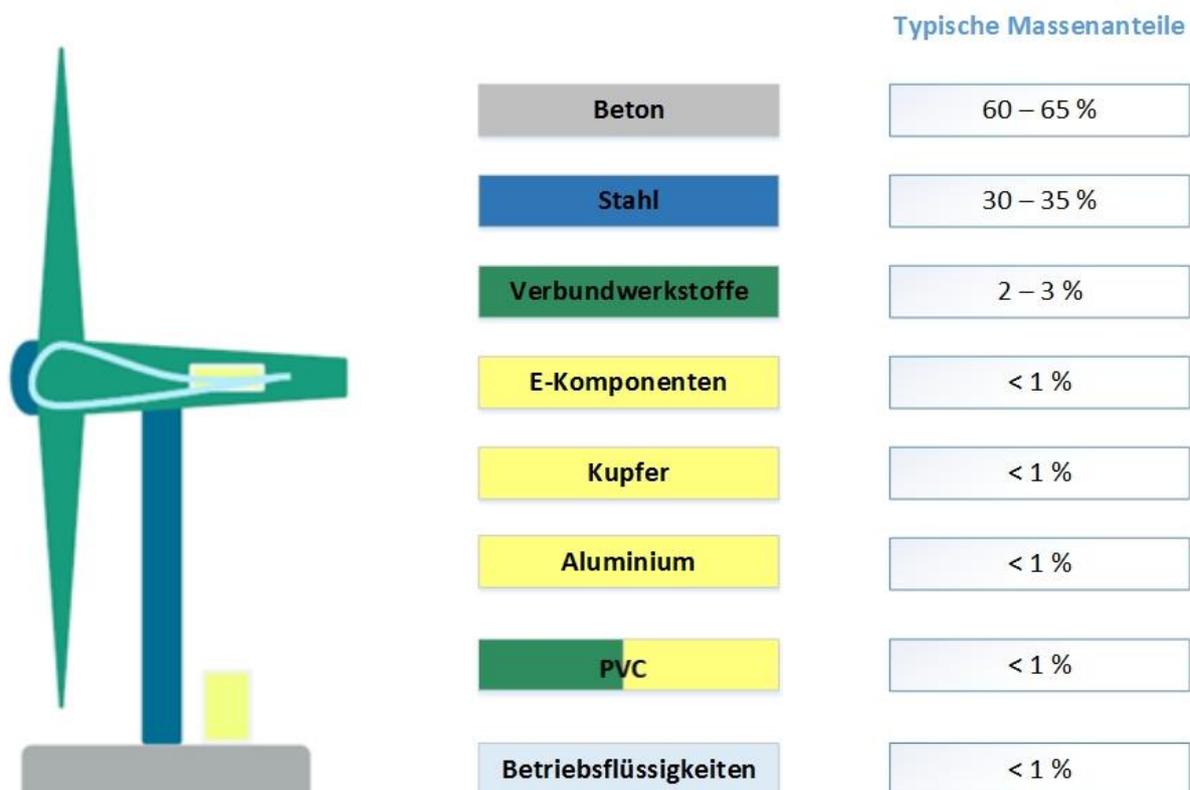


Abbildung 2: Werkstoffe zur Herstellung von Windkraftanlagen, dargestellt nach (Fraunhofer ICT, 2013)

In Abbildung 3 sind die Anlagenteile von WEA mit ihren einzelnen Materialien dargestellt.

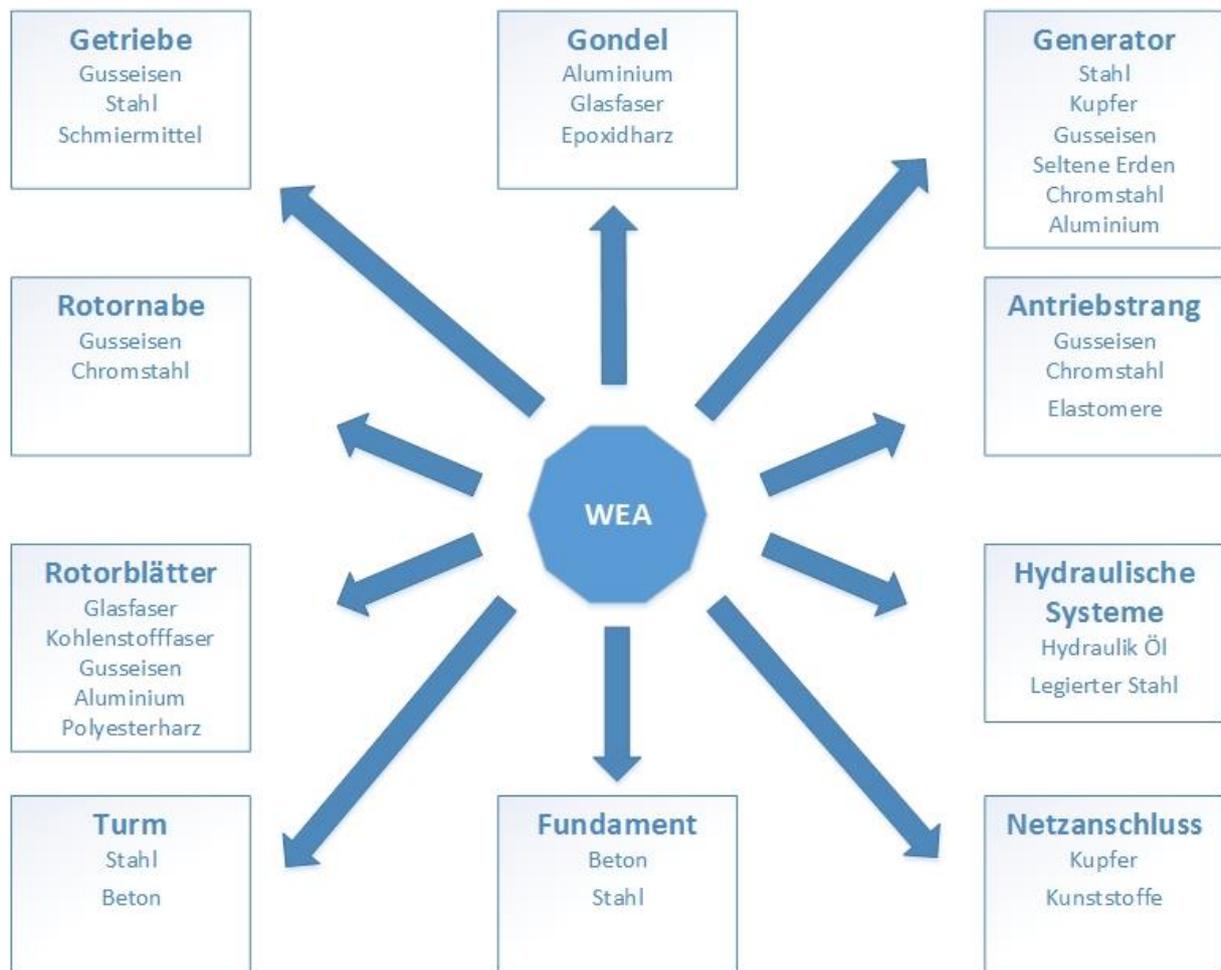


Abbildung 3: Verwendete Materialien einer Windenergieanlage, dargestellt nach (Zimmermann et al., 2013)

Diese Materialien lassen sich übergeordnet in vier Werkstoffkategorien einteilen: Beton, Metalle, Kunststoffe und Betriebsflüssigkeiten. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf diese Materialkategorien eingegangen.

### 2.2.1 Beton

Bei einer WEA bestehen das Fundament und modellbedingt auch einzelne Segmente oder der ganze Turm aus Beton. Beton ist eine Zusammenstellung aus Zement als Bindemittel, einer Gesteinskörnung, die üblicherweise aus Sand und Kies besteht, sowie Wasser. Die Zementherstellung setzt pro hergestellter Tonne Zement 650-700 Kilogramm CO<sub>2</sub> frei. Somit sind 8-15 % des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf die Zementherstellung zurückzuführen. (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2012) Durch ein stoffliches Recycling mit der Rückführung des Zements in die Primärproduktion und damit einer Substitution von Energie beziehungsweise von Rohstoffen könnte dieser Wert reduziert werden. Aus diesem Grund be-

steht an dieser Stelle Optimierungspotential beziehungsweise Handlungsbedarf. Mögliche alternative Verfahren werden in Kapitel 4.1 behandelt.

### 2.2.2 Metalle

Ein weiterer wichtiger Werkstoff einer WEA sind Metalle. Man unterscheidet zwischen Eisen-Metallen (FE-Metallen) und Nicht-Eisen-Metallen (NE-Metallen). Eisen-Metalle werden wiederum in Stahl und Guss-Eisen aufgeteilt, die Nicht-Eisen-Metalle in Schwer- und Leicht-Metalle. Auch die für die WEA-Herstellung unter anderem benötigten Seltenen Erden zählen zu den NE-Metallen. Bis auf Quecksilber sind Metalle bei Raumtemperatur im festen Aggregatzustand und stellen mit 80 % die größte Gruppe der Elemente im Periodensystem dar. (Kalweit et al., 2012)

In Abbildung 4 ist die Werkstoffeinteilung der Metalle dargestellt.

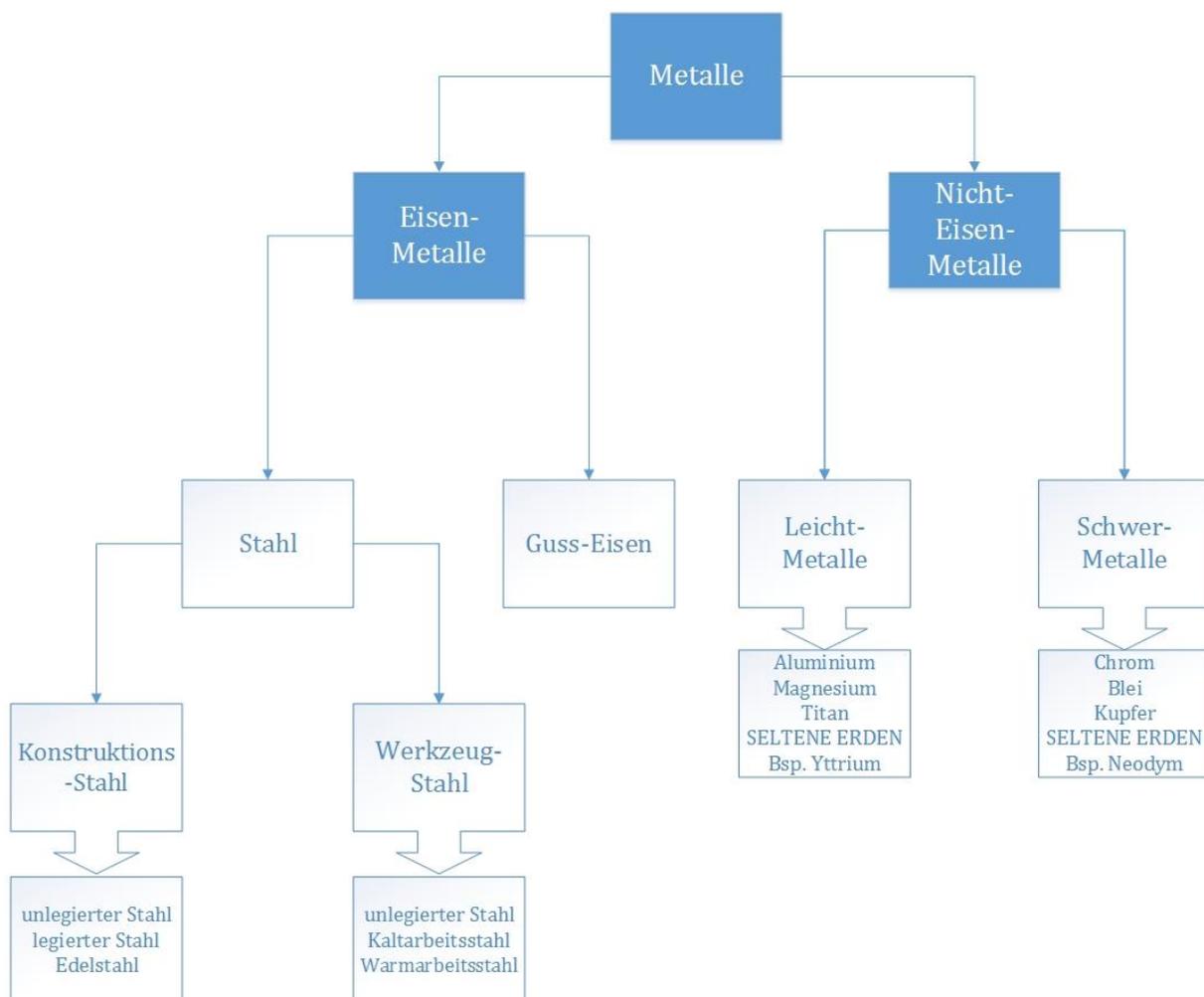


Abbildung 4: Werkstoffeinteilung der Metalle, dargestellt nach (Kalweit et al., 2012)

Bei einer durchschnittlichen Onshore-WEA geht man von circa acht Tonnen benötigtem Kupfer für die elektrischen Maschinen aus. Für 5-MW-Offshoreanlagen werden bis zu 30 Tonnen Kupfer benötigt, sofern das Kabel zur Netzanbindung noch berücksichtigt wird. Für die WEA-Herstellung werden insgesamt zehn Prozent des deutschen Kupferverbrauchs verwendet. Die WEA können mit allen Anlagenteilen, wie Fundament, Turm, Gondel, Getriebe und Generator, aus bis zu 82 % Stahl bestehen. Bei Onshore-WEA fallen aufgrund der geringeren Gewichtsanteile die benötigten Metallmengen geringer aus. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

Vor allem in mechanisch hoch beanspruchten Bauteilen wie der Gondel kommt hochlegierter Stahl zum Einsatz. Der Bedarf an Spezialstählen in Transformatoren und Generatoren sowie hochfesten Stählen in Getrieben ist im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energien, wie beispielsweise Photovoltaik und Wasserkraft, bei der Windkraft am höchsten. (Wuppertal Institut, 2014)

Die Verwendung der sogenannten Seltenen Erden-Elemente (SEE) und die damit verbundene Förderung in China stellen ein Problem dar. SEE sind in der heutigen Gesellschaft ein wichtiger Wertstoff, da die Herstellung von Smartphones, Energiesparlampen und Flachbildschirmen ohne diese nicht möglich wäre. Auch manche WEA sind auf die SEE angewiesen. Die am häufigsten verwendeten SEE in einer WEA sind Neodym und Dysprosium, welche in den Permanentmagneten im Generator enthalten sind. Mit 92 % der Produktion der SEE ist China weltmarktführender Exporteur. Seit dem Jahr 2010 ist ein Wandel auf dem chinesischen Markt zu beobachten. Dies hat großen Einfluss auf die Handelspartner und wird voraussichtlich zu Versorgungsengpässen führen. Es besteht dennoch kein Zusammenhang zwischen der drohenden Verknappung und dem tatsächlichen Vorkommen. Die Bezeichnung „Seltene Erden“ ist irreführend, da sie größtenteils nicht wirklich selten sind. Es gibt viele unerforschte Gebiete und das Vorkommen dieser SEE ist aus geologischer Sicht unproblematisch. Die Verknappung der SEE läge somit nur einzig in der hohen Nachfrage und der geologischen Verteilung begründet. (Bundesverband WindEnergie e.V., 2015), (NATURSTROM AG, 2014) Diese Position wird durch die *Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* untermauert (Elsner, 2011). Getriebelose WEA, welche mit Permanentmagneten im Synchrongenerator ausgestattet sein können, gehören zu den neueren WEA-Modellen. Rund neun Prozent der global neu installierten WEA im Jahr 2010 entfielen auf diesen Antriebstyp. Dieser hat den Vorteil, dass weniger Wartungsaufwand betrieben

werden muss und das Gewicht aufgrund des entfallenen Getriebes eingespart werden kann. Offshore-WEA werden wegen dieser Vorteile vorzugsweise getriebelos mit Permanentmagneten im Synchrongenerator verbaut. Diese Permanentmagneten bestehen aus einer Legierung aus Neodym, Eisen und Bor. Zur Temperaturstabilität wird in die Magnetlegierung zusätzlich Dysprosium beigefügt. Der Bedarf an diesen Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB) ist hoch und wird auf 500 bis 600 kg je MW Leistung geschätzt. (Öko-Institut e. V., 2014) Der Synchrongenerator kann als permanent- oder fremderregtes Modell ausgeführt werden. Permanent erregte Synchrongeneratoren brauchen für die Erzeugung des Läufer-Magnetfeldes Dauermagnete wie zum Beispiel aus NdFeB, wodurch kein zusätzlicher Gleichstrom für den Betrieb benötigt wird. Der fremderregte Synchrongenerator benötigt im Gegensatz dazu Gleichstrom zur Erzeugung des Läufer-Magnetfeldes. (Bundesverband WindEnergie e.V., 2015) Die Synchrongeneratoren mit elektrischer Erregung benötigen keine SEE, haben jedoch andere Nachteile. Diese Ringgeneratoren (auch Vielpolgeneratoren genannt) besitzen vergleichsweise ein wesentlich höheres Gewicht aufgrund der benötigten Kupferspulen. (Hau, 2014)

Bei der Recherche der SEE ist aufgefallen, dass es bezüglich ihres Abbaus und ihrer Gesamtproduktion sowie genauerer Zahlen über verbaute NdFeb-Magneten wenig detaillierte Informationen beziehungsweise unzuverlässige Zahlen zur Produktion von SEE gibt. Es wird daher der Vorwurf geäußert, dass auf diesen Werten basierend oftmals Tendenzen und Prognosen aufgestellt werden, die zu falschen Annahmen und Ergebnissen führen (Zepf, 2015). Im *Jahrbuch Windenergie 2015* vom *Bundesverband WindEnergie e.V.* wird erläutert, dass zwischen den Jahren 2000 und 2009 circa zehn Prozent getriebelose WEA in Deutschland in Betrieb waren (Paulsen, 2015). Diese Information gibt keine Auskunft darüber, ob die getriebelosen Synchrongeneratoren der WEA mit Permanentmagneten oder mit elektrisch erregten Magneten ausgestattet sind. Aus diesem Grund ist festzuhalten, dass SEE zwar verwendet werden und durchaus auch kritisch zu betrachten sind, aber überwiegend im Offshore-Bereich Verwendung finden.

### 2.2.3 Kunststoffe

Kunststoffe sind organische Werkstoffe (sogenannte Makromoleküle). Diese lassen sich wie in Abbildung 5 dargestellt in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste einteilen. Die wichtigsten Merkmale sind ihre unterschiedlichen technischen Eigenschaften wie Formbarkeit, Elastizität, Bruchfestigkeit, Wärmeformbeständigkeit und chemische Beständigkeit. Die un-

terschiedlichen Eigenschaften werden durch die Zugabe von Additiven bei der Herstellung maßgeblich bestimmt. (Baur, 2013)

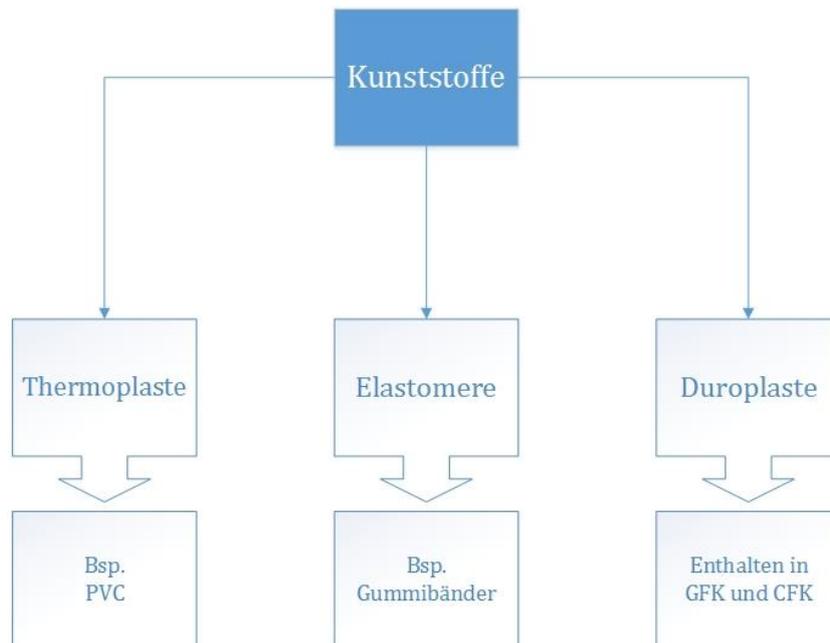


Abbildung 5: Werkstoffeinteilung der Kunststoffe, dargestellt nach (Domininghaus et al., 2008)

Die größten Materialmengen von Kunststoffen in einer WEA fallen in Ausführung von Faser-verbundwerkstoffen (Kompositwerkstoffen), wie GFK und CFK, bei den Rotorblättern an. Faserverbundwerkstoffe bestehen aus zwei Hauptkomponenten, einer bettenden Matrix und verstärkenden Fasern. Als sogenannte Matrixpolymere werden derzeit überwiegend Duroplaste (Epoxidharze, Phenolharze) verwendet. Diese weisen allerdings nach der Härtung eine bestimmte Sprödigkeit auf, die eine Hauptursache für Schäden an Rotorblättern ist. Wenn ein Rotorblatt defekt ist, kann es bis zu einem gewissen Schadensbild wieder repariert werden. Für die hoch belasteten Abschnitte von neuen, großen Rotorblättern wird als Verstärkungsmaterial heutzutage wegen der besseren Eigenschaften und der automatisierten Herstellung CFK benutzt (Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014).

„Für CFK – und das ist die gute Nachricht – ist die Windkraftindustrie ein absoluter Wachstumsmarkt. 2011 betrug das Wachstum hier rund 23 Prozent. Bis 2015 wird den Experten zufolge mit einem Jahresbedarf an Carbonfasern von rund 22.700 Tonnen, für 2020 gar von rund 54.270 Tonnen gerechnet. Dazu würden vor allem die immer größer werdenden Windkraft-Anlagen (bis zu 10 Megawatt) und die damit verbundenen länger werdenden Rotorblätter (bis zu 100 Meter) beitragen.“  
(Windkraft-Journal, 2013)

Das Bestreben ist, dass eine vermehrt automatisierte CFK-Verarbeitung im großen Stil statt händische Fertigung bei der Herstellung von Rotorblättern aus GFK stattfindet (Windkraft-Journal, 2013).

„Smart Blades“ und „BladeMaker“ sind zwei von der Bundesregierung geförderte Forschungsprojekte, welche das Ziel haben, Rotorblätter von WEA leistungsfähiger zu machen und kostengünstiger zu produzieren. Die Herausforderung bei der Herstellung von Rotorblättern ist komplex, da ein Rotorblatt der neueren Generation bis zu 85 Meter lang ist und über 20 Jahre den Umweltbedingungen standhalten muss. Das *Fraunhofer-IWES* untersucht gemeinsam mit 15 Industrie- und Forschungspartnern, wie bei dem gesamten Produktionsprozess Fertigungsschritte maschinell übernommen werden und dadurch günstigere Materialien eingesetzt werden können. Bei dem Projekt „BladeMaker“ besteht ein wichtiger Teilschritt darin, ein Demonstrationszentrum aufzubauen (2015), worin Fertigungsprozesse (weiter) entwickelt und an 25 Meter großen Rotorblattstücken getestet und vorgeführt werden sollen. Das verfolgte Ziel von „BladeMaker“ ist, automatisierte Fertigungsverfahren und ein neuartiges Rotorblatt-Design neu zu entwickeln, das besonders gut für die automatisierte Herstellung geeignet ist. Das Projekt „Smart Blades“ verfolgt einen anderen Ansatz: Die Windlastspitzen sollen durch Blattgeometrie, Materialaufbau und aktive bewegliche Klappen besser aufgefangen werden. Dadurch könnte eine geringere Spitzenlast erreicht werden und somit das Gesamtgewicht der WEA sinken. Dies hat zum einen den Vorteil, dass beim Bau der WEA ressourceneffizient Material und folglich Geld gespart werden kann. Zum anderen könnte man die Entwicklung zur Verlängerung der Rotorblätter der Anlage nutzen. Dies hätte zur Folge, dass der Stromertrag der WEA erhöht wird, da der Kreis größer ist, den die Rotoren beschreiben. Das Projekt „Smart Blades“ läuft bis zum Jahr 2016 und wird mit 12 Millionen Euro gefördert. „BladeMaker“ läuft bis 2017 und wird mit 8 Millionen Euro gefördert. (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2013)

Um den hohen Anforderungen an Rotorblattmaterialien gerecht zu werden, bedient man sich neuartiger Werkstoffsysteme. Das Besondere an den neuen Hybridwerkstoffen wie Nanokompositen in Form von Kohlenstoffnanoröhren (CNT) oder GFK/Bioverbund-Hybridbauweise ist, dass bei diesen gegenüber den bisher eingesetzten Verbundwerkstoffen leichtere und stabilere Materialien eingesetzt werden. Zudem verfügen sie über verbesserte Materialeigenschaften. Da Rotorblätter von WEA in ihrer Länge aufgrund ihres Gewichts eingeschränkt sind, lassen sich mit einem neuen sogenannten Composite-Material Rotorblätter

herstellen, die circa 10 bis 30 % leichter als reine Epoxid-Systeme sowie deutlich stabiler sind. Dieses Composite-Material ist aus CNT-additivierten mit Kohlenstoff- und Glasfasern verstärkten Epoxiden aufgebaut. Durch die verbesserte Belastbarkeit ist die Schlagzähigkeit um 20-30 % höher, wodurch auch die Ermüdungseigenschaften verbessert wurden. (Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014)

### 2.2.4 Betriebsflüssigkeiten

Die in einer WEA enthaltenen Betriebsflüssigkeiten sind Kühlflüssigkeit im Generator und ggf. im Umrichter, Fett im Generatorlager und ggf. in Pitchdrehverbindungen sowie synthetisches Öl im Getriebe, sofern eines verbaut ist. Im Transformator kommt modellabhängig ein spezielles Transformatoröl zum Einsatz. Für diese Betriebsflüssigkeiten stehen bezüglich der Gefahrenstoff-, Wassergefährdungsklasse und Gesundheitsschädlichkeit Sicherheitsblätter gemäß Richtlinie 91/155/EWG im Internet zur Verfügung (EUR-Lex, 2015). Die Betriebsflüssigkeiten einer WEA werden bei planmäßigen Wartungen auf Dichtigkeit sowie nach Ölproben geprüft, welche bei Bedarf im Labor untersucht oder nach maximaler Betriebsdauer gewechselt werden. Diese Betriebsflüssigkeiten müssen gemäß der bundesweiten Richtlinien und Gesetze ordnungsgemäß entsorgt werden. (Nordex, 2014)

### 3 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. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

Abbildung 6 zeigt § 6 (Abfallhierarchie) des KrWG grafisch dargestellt.



Abbildung 6: Abfallhierarchie, dargestellt nach (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

Ein ökologisch nachhaltigerer Schritt im Sinne der Vermeidung 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 Le-

benszeit produziert, umso nachhaltiger ist dies für den Stoffkreislauf. Eine WEA hat einen Erntefaktor, der um ein Vielfaches höher ist als der Energieeinsatz zu ihrer Herstellung und hat sich bereits in drei bis sieben Monaten energetisch amortisiert – je nach Energieaufwand und Standort (Thomas, 2011).

Durch die Novellierung des EEG zum 01.08.2014 (Übergangsfrist 31.12.2014) im Bereich der Windenergie, welches keinen Repowering-Bonus mehr für WEA enthält, ist ein spürbarer Rückgang von Repowering-Projekten bei Betreibern, Projektierern und Projektentwicklungsunternehmen, wie zum Beispiel bei *juwi AG*, eingetreten (siehe vollständiges Interview im Anhang C). Die vorige EEG-Novellierung und der damit verbundene Repowering-Bonus zum Austausch von Alt-WEA zu neueren, leistungstärkeren WEA haben den Rückbau nach beziehungsweise vor dem Ablauf der Lebenszeit der WEA gefördert. Somit ist aktuell durch den Wegfall der Zulagen des Repowering-Bonus die Weiterverwendung von WEA mehr in den Fokus gerückt.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Weiter- und Wiederverwendung von ganzen Anlagen sowie die Wiederverwendung von Anlagenteilen erklärt.

#### 3.1 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. Viele WEA-Betreiber haben sich jedoch mit der Frage des Weiterbetriebs noch nicht beschäftigt. Damit eine WEA auch weiterhin Strom erzeugen kann, muss allerdings erneut ihre Standsicherheit nachgewiesen werden. (Paulsen, 2015) Der *Bundesverband WindEnergie e.V.* setzt sich in einem Arbeitskreis mit dem Weiterbetrieb von WEA (BPW) auseinander. Das Ziel dieses Arbeitskreises ist es, für die WEA-Branche eine einheitliche Regelung, Richtlinien und Empfehlungen mit Konzepten und Lösungswegen auszuarbeiten (Bundesverband WindEnergie e.V., 2015).

Um eine WEA nach ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer weiter betreiben zu dürfen, muss diese einer technischen Prüfung unterzogen werden, wobei ihr Zustand erfasst wird und ein Nachweis bezüglich der Betriebsfestigkeit und Standsicherheit erfolgt. Dabei kann es zum Beispiel vorkommen, dass sich herausstellt, dass die Verschraubung der Rotorblätter in ihrer Lebensdauer begrenzt war. Um die Standsicherheit weiterhin zu gewährleisten, müssen alle verschlissenen Bauteile ersetzt werden. Nach dem erfolgreichen Gutachten befindet sich die WEA im sogenannten Weiterbetrieb. Jede WEA hat ihre individuelle Nutzungsdauer, die ab-

hängig von dem Standort und der damit verbundenen Belastung ist. So ist es nicht ungewöhnlich, dass WEA aus demselben Windpark eine unterschiedliche Restnutzungsdauer haben und demzufolge auch zeitlich verschiedene Weiterbetrieb-Gutachten ausgestellt bekommen. (Paulsen, 2015) Diese können erfahrungsgemäß zwischen 4 und 22 Jahren liegen (Holzmüller in: (Paulsen, 2015)).

#### **3.2 Wiederverwendung von ganzen Anlagen**

Der ursprüngliche Sinn einer Wiederverwendung ist, 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. Diese Verfahren werden in der Bachelorarbeit von Patrick Ulges (Ulges, 2015) erklärt.

#### **3.3 Wiederverwendung von Anlagenteilen**

Die Wiederverwendung von Anlagenteilen einer WEA ist ein weiterer positiver Schritt im Sinne der Abfallhierarchie des KrWG (siehe Abbildung 6).

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 (siehe Anhang B). Defekte oder verschlissene Anlagenteile einer WEA (zum Beispiel das Getriebe) werden ausgebaut und ggf. generalüberholt, sodass das Getriebe für die Wiederverwendung einsatzbereit ist. Dieser Vorgang kann auch mit anderen Großkomponenten einer WEA, wie beispielsweise Rotorblättern und Generatoren, erfolgen. Prinzipiell kann jedes Bauteil einer WEA repariert und wiederverwendet werden. Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Reparatur ist nicht zu vernachlässigen. Wenn ein Rotorblatt sehr verschlissen oder defekt ist, kann der Aufwand zur Wiederinstandsetzung höher als der zur Verwertung und Verwendung eines neu produzierten Rotorblattes sein. Im Falle eines defekten Rotorblattes werden aus Sicherheitsgründen bei einer WEA nicht nur eines, sondern alle Rotorblätter ausgetauscht. Über den langjährigen Betrieb der WEA können sich gemeinsame Unwuchten der Rotorblät-

ter bilden, welche bei Austausch nur eines Rotorblatts nicht ohne größeren Aufwand reparabel sind. (Fraunhofer ICT, 2013)

### 4 Technische Möglichkeiten zur Rückgewinnung der Rohstoffe

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.

Im folgenden Kapitel werden diese technischen Möglichkeiten zur Rückgewinnung der einzelnen Rohstoffe in den Materialgruppen beschrieben und damit verbundene Probleme analysiert.

#### 4.1 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. (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2012) In Deutschland betrug für das gesamte Baugewerbe im Jahr 2010 die jährliche Abfallmenge an Beton fast 130 Millionen Tonnen. Für diesen bedeutenden Abfallstrom gibt es jedoch derzeit noch kein effektives Recycling-Verfahren für Betonabbruch. Aktuell wird Altbeton durch Mühlen zerkleinert und die dadurch entstehende Gesteinsfraktion mit spezieller Körnung im Straßenbau wiederverwendet. Die Qualität der Materialeigenschaften wird bei diesem Verfahren von Vorgang zu Vorgang verschlechtert. Deshalb wird dieser Vorgang auch Downcycling genannt. Ein besserer Ansatz ist es, die Gesteinskörnung von der Zementmasse zu trennen. So kann der Kies als Zusatz – auch Zuschlag genannt – wieder in den Frischbeton eingesetzt werden. (Fraunhofer IBP, 2012) Nach Einschätzung von Thome ließ sich eine Recyclingquote von 80 % erreichen, wenn die Rückgewinnung von hochwertigen Zuschlägen aus Altbeton erfolgen würde (Fraunhofer IBP, 2012).

Während in Betonwerken durch angeschlossene Recyclinganlagen der Frischbeton beziehungsweise der Produktionsabfall wieder in seine Ausgangsstoffe zerlegt und dem Stoffkreislauf erneut zugeführt werden kann, ist das Recycling von Altbeton wesentlich aufwendiger (VDI Technologiezentrum GmbH, 2014).

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 Abbildung 7).



Abbildung 7: Fraktion nach der Fragmentierung von Altbeton, dargestellt nach (Seifert et al., 2013)

Bei diesem Verfahren werden Blitze durch den Festkörper Beton geleitet. Das Prinzip beruht darauf, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit, also der Widerstand, den jede Flüssigkeit und jeder Feststoff einem elektrischen Impuls entgegensetzt, keine physikalische Konstante ist. Diese ändert sich mit Dauer des Blitzes. „Bei einem äußerst kurzen Blitz unterhalb von 500 Nanosekunden besitzt Wasser plötzlich eine höhere Durchschlagfestigkeit als die meisten Festkörper“ (Thome in: (Fraunhofer IBP, 2012)). Der Altbeton wird dazu unter Wasser gelegt, die Forscher generieren einen 150 Nanosekunden-Blitz und dieser schlägt nicht mehr ins Wasser, sondern in den Festkörper ein. Der Blitz sucht sich im Beton den Weg des geringsten Widerstands – dies sind die Grenzen zwischen Kies und Zementsteinmasse. In dieser tausendstel Sekunde bildet sich in dem Beton ein Plasmakanal aus, der wie eine Druckwelle von innen nach außen wächst. Thome erläutert: „Die Kraft dieser Druckwelle ist vergleichbar mit einer kleinen Sprengstoffexplosion“. (Fraunhofer IBP, 2012) Der Beton wird somit auseinander gezogen und in seine Bestandteile zerlegt. Um mit diesem Verfahren wirtschaftlich arbeiten zu können, muss die Grenze von mindestens 20 Tonnen Durchsatzrate in der Stunde erreicht werden, was nach Thome das Ziel sei (Fraunhofer IBP, 2012).

Das *Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)* hatte sich bei der Initiative „Deutschland – Land der Ideen“ mit seinem Forschungsprojekt „Recycling von Altbeton“ beworben und wurde zum Bundessieger in der Kategorie Wissenschaft 2013 gekürt (Fraunhofer IBP, 2013). In einem Telefonat am 26.05.2015 mit Dr. Seifert vom *Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)* aus der Gruppe der Betontechnologie in Holzkirchen, schätzte dieser die Lage so ein, dass in ferner Zukunft die elektrodynamische Fragmentierung eines der bedeutendsten Recycling-Verfahren, nicht nur für Altbeton, sondern auch für die Auftrennung von MVA-Schlacke und die Freilegung von C-Fasern aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen sein wird. Derzeit ist jedoch noch keine industrielle Anlage in Betrieb. Es wurden in letzter Zeit größere elektrodynamische Fragmentierungs-Laboranlagen gebaut, mit denen schon gute Ergebnisse bei der Durchsatzrate erzielt werden konnten.

Zur Energiebilanz gibt es derzeit jedoch noch keine offiziell verfügbaren Daten.

#### Recycling-Beton

Das Recyceln von Baustoffen wie Beton schont die Ressourcen und hilft somit die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verbessern. Die Zweitnutzung von Kies beispielsweise verringert in großem Umfang die Rohstoffentnahme. Wenn der sogenannte RC-Beton regional aufbereitet wird und in nahe liegender Umgebung wieder eingesetzt werden kann, können Transporte und damit verbundene Emissionen erheblich eingespart werden. Aufgrund der großen Mengen an Bauschutt ist ein hohes Potential für RC-Beton gegeben. (Informations Zentrum Beton, 2015)

Die Güte des RC-Betons wird maßgeblich durch die Qualität der RC-Gesteinskörnung beeinflusst (VDI Technologiezentrum GmbH, 2014). Die Freiheit von Verunreinigungen durch beispielsweise Holzstückchen, die chemischen Eigenschaften sowie eine exakte Körnungsabstufung sind hierbei wichtig. Die Einhaltung dieser und anderer Vorgaben werden durch die deutschen Beton-Normen DIN 4226-100, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 und deren Rahmenbedingungen gewährleistet. Die Einhaltung dieser Normen wird durch Vorgaben einer bestimmten Qualitätssicherung bestimmt, die sich aus einer Kombination von Eigen- und Fremdüberwachung sowie Zertifizierungen zusammensetzt. (ifeu-Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2015)

Der Wasser- und Zementbedarf ist aufgrund der höheren Porosität der Gesteinskörnungen von RC-Beton höher als bei herkömmlichem Beton. Auch ist eine höhere Zugabe von Fließmitteln erforderlich. Ohne bauchemische Zusatzmittel wie Verflüssiger, Beschleuniger und

Verzögerer ist kein Beton oder RC-Beton leistungsfähig genug, um eine ausreichende Dichtigkeit und Festigkeit gewährleisten zu können. (VDI Technologiezentrum GmbH, 2014)

Zur Vermeidung von Schwindrissen beim Aushärten muss auch RC-Beton durch Abdecken, Feuchthalten oder Berieseln nachbehandelt werden (Informations Zentrum Beton, 2015). Der RC-Beton hat sich trotz vorhandener DIN-Normen und positiver Praxisbeispiele als Baustoff bisher nicht auf dem Markt etablieren können. Das *Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr* in Baden-Württemberg hat als Hauptgrund dafür eine mangelnde Wahrnehmung des RC-Betons bei Architekten und Bauingenieuren genannt. (VDI Technologiezentrum GmbH, 2014)

### 4.2 Stoffliches Recycling von Metallen

Aus 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. Folglich sind Stahl, Kupfer und Aluminium auf dem Rohstoffmarkt nach dem Rückbau der WEA zurzeit gut vermarktbar. Zudem kann Baustahl zu 99 % recycelt und wiederverwendet werden. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

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 Elektrostahl 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. (Bergische Universität Wuppertal, 2015)

Beim Recycling von Kupfer und Aluminium sind ähnliche Fakten wie bei dem von Stahl zu nennen. Kupfer- und Aluminiumschrott kann – sofern sortenrein erfasst – ebenfalls qualitätsverlustfrei wiederverwendet werden. Diese Metalle gehören damit zu den wenigen Roh beziehungsweise Werkstoffen, die innerhalb eines vollständig geschlossenen Recycling-Systems wieder für die ursprüngliche Nutzung Verwendung finden. (Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2015), (BauNetz Media GmbH, 2015)

Bei den 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 ist es, 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. (Öko-Institut e. V., 2014)

Das *Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)* beschäftigt sich mit mehreren Partnern unter der Leitung von *Siemens* mit diesem Thema im Projekt More (Motor Recycling). Bei diesem wird die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet. Dieses Konsortium hat das Ziel, verschiedene Ansätze für das Recycling von Elektromotoren zu verfolgen. Das von 2011 bis 2014 laufende Projekt wurde vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* gefördert. Dennoch ist derzeit noch kein Ergebnis veröffentlicht. Ein anderes Projekt der Fraunhofer-Gesellschaft ist ein Forschungsprogramm, das zum Ziel hat, unter der Leitung des *Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik (IVM)* in Freiburg und Halle Strategien gegen die Knappheit wichtiger chemischer Elemente zu entwickeln. Ein Teil der Arbeit besteht darin, Dysprosium von außen in den Magneten diffundieren zu lassen anstatt es mit anderen Metallen wie Eisen, Neodym und Bor komplett einzuschmelzen. In den nächsten Jahren wird voraussichtlich ein serienreifer Produktionsprozess erzielbar sein. Ein genereller Verzicht auf dieses Element ist in Aussicht, indem die Korngrößen der anderen Metallbestandteile auf die Größenordnung von Nanometern verkleinert und zu Kompositen „verbacken“ werden. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

### 4.3 Stoffliches Recycling von Kunststoffen

Die in einer WEA enthaltenen Massenanteile von Kunststoffen setzen sich, wie in Abbildung 2 grafisch dargestellt, 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. Es gilt, diese wieder zurück in den Stoffkreislauf aufzunehmen. In diesem Kapitel werden die damit verbundenen Herausforderungen aufgezeigt sowie die heute zur Verfügung stehenden Verfahren zum Recycling von Kunststoffen erklärt.

#### Abfallrechtliche Grundlage

Auf der Grundlage der Technischen Anleitung für Siedlungsabfall (TASi, 1993) und nach Inkrafttreten der Abfallablagereverordnung (AbfAbIV) ist das Deponieren von Abfällen mit einem Organik-Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz über fünf Prozent nicht mehr zulässig (Bundesministerium der Justiz, 2001). Die Deponieverordnung (DepV) hat am

16.07.2009 die AbfAbIV abgelöst. In dieser ist geschrieben, dass es zulässig ist, Abfälle bis zu einem Organik-Anteil von zehn Prozent der Deponieklasse III zurückzuführen (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, 2009). Faserverstärkte Kunststoffe haben einen Trockenrückstand von circa 30 % organischer Substanz. Aufgrund der Zuordnungswerte der DepV besteht das Erfordernis zur Vorbehandlung beziehungsweise stofflichen oder thermischen Verwertung der anfallenden Anlagenbauteile und somit stellt das Recycling von Rotorblättern und Gondeln ein Problem dar. (Schmidl, 2010)

##### Problematik und Stand der Technik

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 zum Beispiel Parkbänken und Lärmschutzwällen, weiter verarbeitet. Die durch das Schreddern klein gemahlene 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 abgeschieden, 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. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014) Dieses trockenmechanische Verfahren zur Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen als Ersatzstoff für die Zementindustrie wird als „Composite Recycling®“ bezeichnet. Dies ist ein eingetragenes Label im Eigentum der *Zajons Zerkleinerungs GmbH*. Hierbei schließt sich der Abfallbesitzer einem Entsorgungsvertrag der auditierten Composite Recycling®-Partner an und nimmt somit aktiv an der Entsorgung teil. Laut *Zajons* garantiert dies die schadlose Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen im Lizenzsystem. Das Unternehmen kann jährlich bis zu 60.000 Tonnen GFK-Produktionsreste in

der Verwertungsanlage verarbeiten. (Zajons Zerkleinerungs GmbH, 2015) Für die Entwicklung dieses Rücknahme- und Recyclingsystems mit einer Verwertungsquote von 100 % hat die *Zajons Zerkleinerungs GmbH* im Jahr 2011 den Innovationspreis der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AKV) gewonnen (AVK e. V., 2011). Dennoch musste die *Zajons Zerkleinerungs GmbH* den Betrieb vorübergehend aus Insolvenzgründen einstellen. Der Grund dafür ist die mangelnde Nachfrage, da die Verwendung in Zementwerken für Anlagenbetreiber derzeit nicht wirtschaftlich ist (Ulges, 2015).

Die Rückgewinnung und Wiederverwendung der Fasern der Rotorblätter wäre nach der Abfallhierarchie (Abbildung 6) des KrWG eine wesentlich nachhaltigere Anwendung als die thermische oder stoffliche Verwertung. Aktuell haben die produzierten Rotorblätter einen Anteil von circa 70 % GFK. CFK wird derzeit nur an hochbelasteten Stellen der Rotorblätter zur Verstärkung verbaut. Wegen des vergleichsweise niedrigen Materialpreises von GFK erscheint ein stoffliches Recycling dafür nicht wirtschaftlich. Die Entwicklung steht folglich noch am Anfang. Bei CFK sieht es anders aus: Wegen des extrem energieaufwendigen Herstellungsverfahrens für Kohlenstofffasern könnten durch die Bereitstellung recycelter Fasern erhebliche Mengen an Rohstoffen und Energie eingespart werden. 65.000 Tonnen Carbonfasern insgesamt werden für das Jahr 2015 prognostiziert (inklusive der 10 bis 20 % herstellungsbedingten Abfälle). Dies zeigt, welche Mengen an hochwertigen CFK-Materialien ungenutzt bleiben, wenn diese nicht durch Recycling zurückgewonnen werden. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

#### Pyrolyse

Ein mögliches Verfahren zum Recyceln von CFK könnte von dem deutschen Unternehmen *CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG* kommen. Das Unternehmen hat Anfang 2011 in Wischhafen die erste Recyclinganlage für CFK-Abfälle in Betrieb genommen und dafür im selben Jahr den ersten „Deutschen Rohstoffeffizienzpreis“ gewonnen. Bei dem auf pyrolysebasierten Verfahren werden trockene Kohlenstofffaser-Reste, vorimprägnierte Fasern (sogenannte Prepreg-Materialien) und End-of-Life-Bauteile sortiert, zerkleinert und anschließend im Pyrolyseprozess auf 400 bis 1.000 °C erhitzt, sodass das Matrixmaterial verdampft. Dieser Prozess findet unter Schutzgas-Atmosphäre statt, da sonst die Kohlenstofffasern mit dem Luft-Sauerstoff reagieren und somit verbrennen. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2014) Die bei der Pyrolyse entstehende Wärme wird zurück gewonnen und so wird nahezu

keine externe Energie benötigt. In dieser Anlage kann eine Kapazität von rund 1.500 Tonnen CFK pro Jahr recycelt und somit wieder zurück in den Stoffkreislauf geführt werden. Die freigelegten Fasern werden durch weitere Aufbereitungsschritte zu qualitativ hochwertigen Faserprodukten verarbeitet und sind mit denen aus einem primären Herstellungsprozess vergleichbar. Diese Anlage kann für sämtliche zurzeit in Europa anfallende CFK-Abfälle sinnvoll genutzt werden. Auf die WEA-Branche bezogen beschränkt sich die Rückgewinnung von Carbonfasern aktuell auf Produktionsabfälle aus der Herstellung von Rotorblättern. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

### Solvolyse

Bei *Siemens* wird an einem anderen Verfahren zum Recyceln von CFK geforscht. Es ist ein chemisches Verfahren auf Basis einer Solvolyse. Bei dem solvolytischen Recyclingverfahren wird die Harzkomponente eines CFK-Bauteils, wie zum Beispiel eines Rotorblatts, bei 200 °C unter Druck mit Hilfe von Wasser in niedermolekulare lösliche Alkohole überführt. Bei diesem Prozess werden keine umweltschädlichen Lösemittel verwendet und es wird deutlich weniger Energie als bei der Faserherstellung verbraucht. Das Gewebe des Bauteils bleibt in seiner Form mit intakten Fasern zurück und kann direkt wieder verarbeitet werden, wobei die mechanischen Eigenschaften der Fasern nahezu erhalten bleiben. Die Forscher wollen in der Zukunft die wiedergewonnen Fasern auch in neuen, anders geformten Werkstücken einsetzen. (Siemens, 2013)

In Abbildung 8 sind die in diesem Kapitel vorgestellten möglichen Recycling-Technologien von CFK mit Endprodukten und Wiederverwendungsmöglichkeiten grafisch dargestellt.

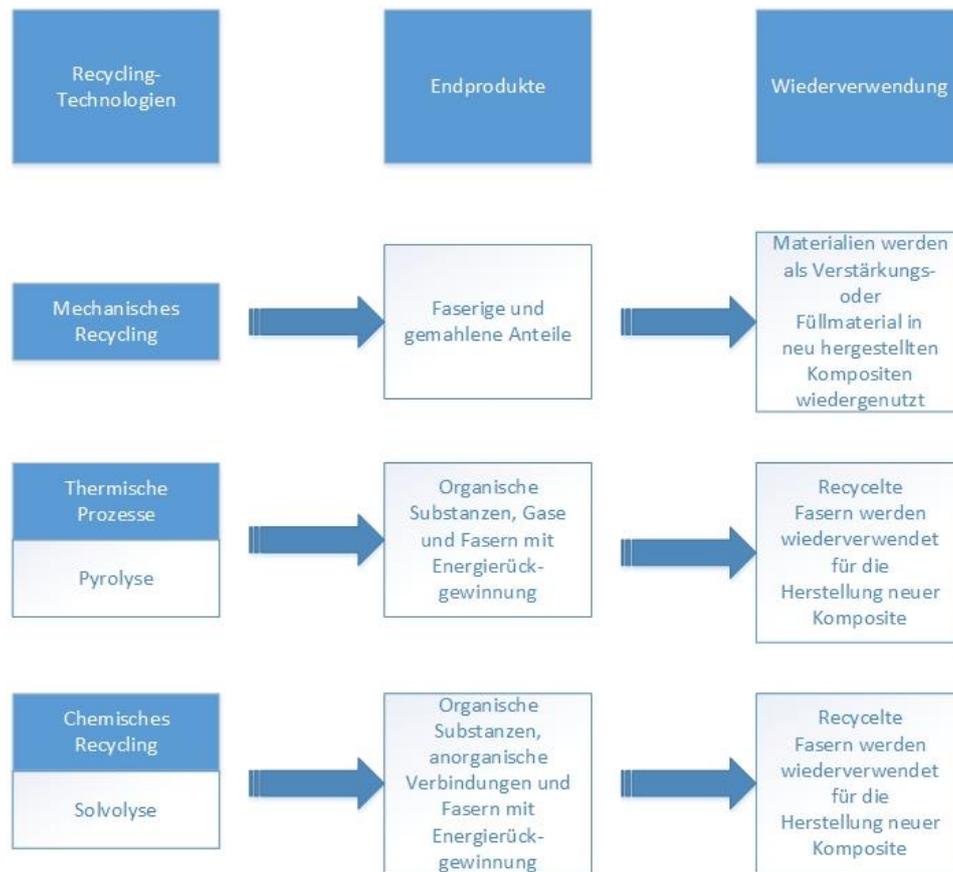


Abbildung 8: Recycling-Technologien für CFK-Komposite, dargestellt nach (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014)

### Elektrodynamische Fragmentierung

Auch die elektrodynamische Fragmentierung bietet sich – wie in Kapitel 4.1 erklärt – für das Recycling von CFK an. Die bei diesem Verfahren erzeugten elektrischen Impulse verlaufen dabei entlang der Phasengrenzen zwischen Fasern und Polymermatrix. Dadurch werden die Fasern aus dem gebundenen Polymer herausgetrennt und somit wieder zurück gewonnen. Sofern diese heraus gelösten Fasern zu lange in der Prozesszone der Fragmentierung verbleiben, werden diese immer weiter zerkleinert und zerfallen zu Carbonstaub. Es müssen noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorgenommen werden, damit dieses Verfahren wirtschaftlich und im Industriemaßstab anwendbar ist. (Seifert et al., 2013)

### Fraktionierung

Im *Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)* wird eine Möglichkeit zur Fraktionierung der gewünschten Materialien durch eine zielgerichtete Sprengung des Rotorblatts für ein CFK-Recycling untersucht. Dadurch können verschiedene Bruchstücke für eine Weiterverwendung gewonnen werden. (Fraunhofer ICT, 2013)

Da aktuell sowie in der nächsten Zeit anfallende Mengen an Rotorblättern aus GFK bestehen werden und derzeit noch kein Recycling-Verfahren existiert, das im industriellen Maßstab anwendbar ist, werden die zerschnittenen Rotorblätter als Rohstoffsubstitut beziehungsweise Ersatzbrennstoff in der Zementherstellung eingesetzt oder thermisch in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) verwertet. Diese vermeintlich einfache thermische Verwertung in der MVA gestaltet sich in der Praxis jedoch schwierig: Die Rotorblätter müssen einer umfangreichen Vorzerkleinerung unterzogen werden. Durch den hohen Siliziumanteil kann es durch das geschmolzene Glas bei höheren Rotorblattmengen zu Verklebungen der Anlagenteile der MVA kommen. (Schmidl, 2010)

### 4.4 Stoffliches Recycling von Betriebsflüssigkeiten

Betriebsflüssigkeiten von WEA werden gemäß der bundesweiten Richtlinien und Gesetze von dafür zugelassenen Entsorgungsbetrieben gegen Nachweis entsorgt (Nordex, 2014). Anschließend werden in einer Zweitraffination – soweit wie möglich – die Betriebsflüssigkeiten wieder aufbereitet und somit zurück in den Stoffkreislauf geführt, oder wenn dies nicht möglich ist, in MVA thermisch verwertet (GL Renewables Consulting & Engineering, 2010). Die bisher genutzten Mineralöle werden in jüngster Zeit und in neuen WEA-Modellen durch Ester-Isolierflüssigkeiten ersetzt, die ebenfalls schwer entflammbar, aber biologisch abbaubar sind und erheblich besser stofflich recycelt werden können (Siemens, 2015).

## 5 Materialmengen der Windenergieanlagen 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 (Hoch, 2015), (Volkswind GmbH, 2015). 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 773 WEA in Hessen in Betrieb. Diese haben eine Gesamtleistung von 1.131,35 MW. Um das Materialaufkommen der einzelnen verbauten Materialmengen zu erfassen, werden aus den am häufigsten verbauten WEA-Modellen in verschiedenen Leistungsklassen Mittelwerte berechnet. Zur Übersicht sind diese in Leistungsklassen von  $P < 1$  MW,  $1 < P < 3$  MW und  $P \geq 3$  MW aufgeteilt. Tabelle 1 sind die Leistungsklassen mit den häufigsten in Hessen verbauten WEA-Modellen zu entnehmen (Regierungspräsidium Hessen, 2015).

**Tabelle 1: Einteilung der häufigsten WEA-Modelle Hessens in Leistungsklassen, erstellt aus (Regierungspräsidium Hessen, 2015)**

	Leistungsklassen		
	P < 1 [MW]	1 < P < 3 [MW]	P ≥ 3 [MW]
<b>WEA in Betrieb:</b>	350	363	60
<b>WEA-Modelle</b>			
Enercon	E-40	E-82	E-101
Nordex	N 43	N 117	N 117-3.0
Vestas	V 44	V 90	V 112

Um eine Abschätzung über die in Hessen verbauten Materialmengen in WEA geben zu können, wurde bei den Herstellern eine Anfrage auf Informationen der meist verbauten WEA gestellt. Es wurden Datenblätter ausgehändigt, welche nur begrenzt die benötigten Informationen bereitstellen und vertraulich behandelt werden müssen. Aus den Datenblättern und weiteren Informationsquellen konnten die Gesamtmassen der WEA in den verschiedenen Leistungsklassen mit den Massenanteilen wie in Abbildung 2 berechnet werden. Aufgrund der beabsichtigten Aussagekraft der Abschätzung wurde der Prozentanteil von Beton aus dem Fundament wegen der bereits in Kapitel 2.1 erwähnten Umstände (benötigte Beton-

menge abhängig vom Standort und der dort vorherrschenden Bodenbeschaffenheit) heraus gerechnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Umrechnung der Prozentangaben aus Abbildung 2

Insgesamt	43 %	100 %
Stahl	35 %	81,5 %
Verbundwerkstoffe	3 %	7 %
E-Komponenten	1 %	2,3 %
Kupfer	1 %	2,3 %
Aluminium	1 %	2,3 %
PVC	1 %	2,3 %
Betriebsflüssigkeiten	1 %	2,3 %

In Tabelle 3 sind die Mittelwerte für die Leistungsklasse P < 1 MW dargestellt.

Der Mittelwert besteht aus den Daten der drei meist verbauten WEA.

$$\text{Varianz} = s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\text{Standardabweichung} = s = \sqrt{s^2}$$

Durch die Mittelwertberechnung ergibt sich eine Standardabweichung von  $s = \pm 26,2 \text{ t}$  ( $\pm 22,8 \%$ ) bezogen auf das Gesamtgewicht.

Tabelle 3: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse P < 1 MW

Insgesamt	100 %	115 t
Stahl	81,5 %	93,7 t
Verbundwerkstoffe	7 %	8 t
E-Komponenten	2,3 %	2,7 t
Kupfer	2,3 %	2,7 t
Aluminium	2,3 %	2,7 t
PVC	2,3 %	2,7 t
Betriebsflüssigkeiten	2,3 %	2,7 t

In Tabelle 4 sind die prozentualen Massenanteile für die Leistungsklasse  $1 < P < 3$  MW dargestellt. Der Mittelwert besteht aus den Daten der drei meist verbauten WEA. Durch die Mittelwertberechnung ergibt sich eine Standardabweichung von  $s = \pm 34,2\text{t}$  ( $\pm 7,5 \%$ ) bezogen auf das Gesamtgewicht.

**Tabelle 4: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse  $1 < P < 3$  MW**

<b>Insgesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>455,1 t</b>
Stahl	81,5 %	370,1 t
Verbundwerkstoffe	7 %	31,9 t
E-Komponenten	2,3 %	10,5 t
Kupfer	2,3 %	10,5 t
Aluminium	2,3 %	10,5 t
PVC	2,3 %	10,5 t
Betriebsflüssigkeiten	2,3 %	10,5 t

Aus Tabelle 5 sind die prozentualen Massenanteile für die Leistungsklasse  $P \geq 3$  MW zu entnehmen. Der Mittelwert besteht aus den Daten der zwei meist verbauten WEA.

Durch die Mittelwertberechnung ergibt sich eine Standardabweichung von  $s = \pm 32,8$  t ( $\pm 6,2 \%$ ) bezogen auf das Gesamtgewicht

**Tabelle 5: Massenanteile der einzelnen Komponenten in der Leistungsklasse  $P \geq 3$  MW**

<b>Insgesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>532,2 t</b>
Stahl	81,5 %	433,7 t
Verbundwerkstoffe	7 %	37,3 t
E-Komponenten	2,3 %	12,2 t
Kupfer	2,3 %	12,2 t
Aluminium	2,3 %	12,2 t
PVC	2,3 %	12,2 t
Betriebsflüssigkeiten	2,3 %	12,2 t

In Tabelle 6 sind die gesamten Massenanteile der einzelnen Leistungsklassen mit der Anzahl der WEA aufsummiert und ergeben eine gesamte Materialmenge von 237.223,5 t.

Durch Zusammenfassen der Streuung aller Leistungsklassen ergibt sich eine Gesamtstreuung von  $s = \pm 23.552,6$  t ( $\pm 9,9 \%$ ) bezogen auf das Gesamtgewicht.

Tabelle 6: Gesamtmasse der WEA in Hessen

<b>Gesamte Materialmasse in Hessen</b>	
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>

Diese Massen an verschiedenen Materialien der WEA gilt es in Zukunft mit den in Kapitel 4 beschriebenen Recycling-Verfahren in den Stoffkreislauf zurückzuführen.

Eine qualifizierte Schätzung über die in Hessen verwendeten SEE ist nicht möglich. Neodym und Dysprosium werden nur in getriebelosen Synchrongeneratoren eingesetzt. Nach (Paulsen, 2015) wurden in Deutschland von 2000 bis 2010 zehn Prozent getriebelose WEA verbaut. Eine Angabe über den Anteil getriebeloser WEA nur für Hessen liegt nicht vor. Ebenfalls gibt es keine Angaben zur Darstellung mit Permanentmagneten oder elektrisch erregten Magneten. Diese fehlende Datenbasis erlaubt keine verantwortungsvolle Abschätzung der SEE-Mengen in hessischen WEA.

### 6 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 ist es, einen Trend für die WEA-Branche abzuleiten.

Der unausgefüllte Fragebogen ist im Anhang A zu finden. Die gesamte statistische Auswertung inklusive aller detaillierten Antworten befindet sich im Anhang B. Zudem wurde ein persönliches Interview mit dem kaufmännischen Projektmanager von der Abteilung Repowering bei *juwi AG* geführt. Erkenntnisse aus diesem Gespräch werden u. a. mit in die Auswertung der Befragung einbezogen. Das vollständige Interview befindet sich im Anhang C. Neben allgemeinen Fragen zu Konzepten oder Ansätzen zum Rückbau von WEA und zum Ende der Einsatzzeit dieser in den jeweiligen Unternehmen wurden mögliche Verfahren nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA erfragt. Weiterhin wurden Fragen zu bestehenden Anreizen zum Rückbau beziehungsweise zu Erfahrungen durch Projekte in diesem Bereich und der Übernahme des Rückbaus sowie zur Wiederverwendung und -verwertung von Alt-WEA und Anlagenteilen gestellt. Ferner sind Fragen zu bestehenden Konzepten oder Projekten zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA beziehungsweise Investitionen in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten sowie dem Einsatz von recyceltem Material für den Bau von WEA enthalten.

### Frage 1: Sind Sie Hersteller, Betreiber oder Hersteller und Betreiber von WEA?

Unter den befragten Unternehmen befinden sich 35 Betreiber, 6 Hersteller sowie 3 Hersteller-Betreiber von WEA. Eine Rücklaufquote der Befragung von insgesamt 65 % zeigt das hohe Interesse an der Thematik seitens der angefragten WEA-Unternehmen sowie die Bereitschaft, Auskunft über unternehmensinterne Fortschritte und Verfahren diesbezüglich zu geben.

### Frage 2: Existieren in Ihrem Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von WEA?

Es ist festzustellen, dass bei der großen Mehrheit der WEA-Unternehmen Konzepte zum Rückbau existieren. Dies lässt eine Tendenz der meisten Unternehmen hin zur Auseinandersetzung mit dem Rückbau von WEA erkennen. Jedoch fällt auf, dass keine genaueren Angaben zu diesen bestehenden Konzepten gemacht werden.

### Frage 3: Wann endet für Sie die Einsatzzeit der WEA?

Bei den Herstellern steht in puncto Einsatzzeit der WEA die technische Lebenszeit im Vordergrund. Bei Betrachtung der gegebenen Antworten der Betreiber ist festzustellen, dass die wirtschaftlichen Erträge vorrangig für die Beendigung der Einsatzzeit der WEA sind. Dies ist damit zu begründen, dass für einen Hersteller von WEA die Langlebigkeit seiner produzierten WEA im Vordergrund steht, da er diese an einen Betreiber zu möglichst guter Qualität und demnach angemessenen Preis verkaufen möchte. Ziel eines WEA-Betreibers hingegen ist es, nach der Amortisationszeit der WEA einen möglichst hohen Gewinn aus dem Betrieb dieser zu erzielen.

### Frage 4: Was passiert nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA?

Nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA wird in den verschiedenen WEA-Unternehmen unterschiedlich verfahren. Nach Rücksprache mit einigen der befragten Unternehmen sowie im Interview mit Herrn Hoch von der *juwi AG* stellte sich heraus, dass mit den rückgebauten WEA nicht immer gleich verfahren wird. Aus einem rückgebauten Windpark werden zum Beispiel demnach WEA als komplette Einheit verkauft, andere WEA werden zerlegt und davon wertvolle Großkomponenten eingelagert oder als Einzelteil verkauft und der Rest verwertet. Dies ist Grund dafür, dass die Antworten auf Frage 4 vielfältig ausfielen.

### Frage 5: Liegen in Ihrem Unternehmen Anreize zum Rückbau von WEA außerhalb der gesetzlichen Verpflichtung vor?

Bei einem Großteil der befragten WEA-Unternehmen liegen Anreize zum Rückbau von WEA außerhalb der gesetzlichen Verpflichtung vor. Der Anreiz der meisten WEA-Unternehmen ist, leistungsstärkere WEA zu errichten. Dies verdeutlicht, dass offensichtlich Optimierungspotential im Zusammenhang mit dem Rückbau von WEA besteht. Durch das Errichten von leistungsstärkeren WEA und der damit verbundenen angestrebten Wirtschaftlichkeit der Unternehmen ist ein zukünftiger Fortschritt der Windkraft als Teil der erneuerbaren Energien in Deutschland insgesamt abzuleiten.

### Frage 6 und 7: Haben Sie Erfahrungen durch Projekte mit dem Rückbau von WEA und wenn ja, wer übernimmt den Rückbau?

Die meisten der befragten WEA-Unternehmen haben bereits Erfahrung mit dem Rückbau von WEA. Auf Herstellerebene sind die Erfahrungen mit dem Rückbau jedoch nicht so fortgeschritten wie auf Betreiber- oder Hersteller-Betreiberebene. Der Rückbau wird bei den Herstellern und Betreibern überwiegend von Subunternehmen übernommen. Bei den befragten Hersteller-Betreiberunternehmen wird der Rückbau von WEA zu gleichen Teilen selbst oder über Subunternehmen abgewickelt. Hier spielen wirtschaftliche Aspekte sowie fachliche Qualifikationen eine Rolle. Da sich die jeweiligen Subunternehmen auf den Rückbau spezialisiert haben, wäre ein eigens von den WEA-Unternehmen durchgeführter Rückbau oftmals kosten- und arbeitsintensiver.

### Frage 8: Wenn Verkauf der WEA, dann ...

Bei den WEA-Unternehmen überwiegt der Verkauf der kompletten WEA. Bei der gesonderten Betrachtung der Antworten der Hersteller fiel auf, dass gleichermaßen komplette WEA und Anlagenteile verkauft werden und zudem ein relativ hoher Anteil der Antworten entweder ausblieb oder die Hersteller unsicher sind. Es bleibt fraglich, warum ein solch hoher Anteil auf die zuletzt genannten Antwortmöglichkeiten entfällt. Durch das Interview bei *juwi AG* wurde zudem in Erfahrung gebracht, dass der größte Anteil der Alt-WEA nach Osteuropa verkauft wird. Dies ist damit zu begründen, dass ein Verkauf der kompletten WEA noch Gewinn einbringen kann, da diese nicht im Inland mit kostenverbundenem Aufwand entsorgt

werden muss. Die Rückbaukosten der WEA können je nach Anlagengröße und Standort zwischen 40.000-70.000 Euro ohne Fundament betragen (siehe hierzu Anhang C).

### Frage 9: Werden bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwendet?

Die WEA-Unternehmen verwenden nach dem Rückbau überwiegend einzelne Anlagenteile wie Hauptkomponenten (u. a. Rotorblätter, Getriebe, Generator) sowie Kleinteile wieder. Wenn die Wiederverwendung der Anlagenteile von den Unternehmen nicht bereits praktiziert wird, wird dies auch nicht angestrebt. Diese Erkenntnis verdeutlicht, dass derzeit in der WEA-Branche bei der Mehrheit der befragten Unternehmen der Fokus auf Wiederverwendung gesetzt wird. Ebenso bei einem Großteil der WEA-Unternehmen wird auf einen nachhaltigeren Umgang mit den Anlagenteilen geachtet. Dies ist vor allem mit wirtschaftlichen Gründen zu belegen. Wenn Anlagenteile in anderen WEA wiederverwendet werden können (Windpark), muss das WEA-Unternehmen dieses Anlagenteil nicht neu beziehen.

### Frage 10: Werden bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwertet?

Es werden überwiegend in allen WEA-Unternehmen Anlagenteile wiederverwertet. Die gängige Praxis im Umgang mit Verbundwerkstoffen (zum Beispiel GFK) – wie in Rotorblättern und Gondeln – ist aktuell eine Kombination aus stofflicher und thermischer Verwertung. Da noch kein im industriellen Maßstab anwendbares Recycling-Verfahren zur Verfügung steht, handelt es sich bei der klassischen Wiederverwertung (Recycling) nur um die Stahl-/ Kupfer-/ Aluminium-Rückgewinnung sowie das Betonrecycling.

Dies verdeutlicht die Bemühungen der Branche in puncto Wiederverwertung von Anlagenteilen. Es ist somit ein Trend zu erkennen, dass zukünftig die wiederverwendbaren Materialien in die Stoffstromkreisläufe – soweit wie möglich – zurückgeführt werden.

### Frage 11: Bestehen Konzepte und Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA?

Bei fast allen der Hersteller- und Hersteller-Betreiberunternehmen existieren Konzepte und Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA. Die Bereitstellung einer möglichst ökologisch nachhaltigen WEA ist die Aufgabe eines Herstellers, da dieser die WEA produziert und an Betreiber verkauft. Betreiber sind nicht zwangsläufig verantwortlich dafür, dass die WEA in Zukunft ökologisch nachhaltiger produziert werden. Dies spiegelt sich auch

in der Befragung wider: Nur bei annähernd der Hälfte der Betreiber gibt es Konzepte und Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA. Da offenbar Konzepte und Projekte von Hersteller- und Hersteller-Betreiberunternehmen vorliegen, können hier in Zukunft voraussichtlich durch die in diesem Bereich gemachten Erfahrungen Fortschritte erzielt werden.

### Frage 12: Investiert Ihr Unternehmen in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA?

Der Großteil der WEA-Unternehmen investiert nicht in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA. Dies ist wahrscheinlich damit zu begründen, dass zurzeit der Verkauf der Alt-WEA als komplette Anlage (zum Beispiel ins Ausland) eine rentablere Lösung für die Unternehmen ist und somit noch kein Bedarf für eine vollwertige Verwertung der WEA besteht. Sofern die Unternehmen in Forschung und Entwicklung investieren, dann in die Werkstoffforschung, zum Beispiel für Magnete, das Recycling von Rotorblattmaterial und die Wiederverwertung von Holz (Holzturm) im Wohnungsbau.

### Frage 13: Wird recyceltes Material für den Bau Ihrer WEA verwendet?

Die Mehrheit der WEA-Hersteller- und Hersteller-Betreiberunternehmen verwendet recyceltes Material für den Bau von WEA und nutzt u. a. Stahl, Kupfer, Eisen und Aluminium (indirekt über Wertstoffkreisläufe) sowie Recycling-Schotter und -Beton (für Wege und Kranstellflächen). Seitens der Betreiberunternehmen besteht hier kein hohes Interesse. Dies lässt sich damit begründen, dass es die Aufgabe der Hersteller sein sollte, recyceltes Material für den Bau von WEA zu verwenden.

### Frage 14: Haben Sie Interesse an den Ergebnissen der Umfrage?

Das große Interesse an den Umfrageergebnissen steht in engem Zusammenhang mit der hohen Rücklaufquote des Fragebogens. Die WEA-Unternehmen sind sehr interessiert, zu erfahren, wie andere Wettbewerber der Thematik gegenüberstehen und wie weit diese fortgeschritten sind. Sie füllten deshalb größtenteils den Fragebogen aus und wünschten sich fast ausnahmslos die Aushändigung der Ergebnisse.

Abschließend 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 weitere mögliche Begründung dafür, dass keine Informationen zu Rückbaukonzepten öffentlich verfügbar gemacht werden, ist, dass die Konzepte entweder noch nicht ausreichend ausgereift beziehungsweise 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 beziehungsweise in Einzelteilen verkauft. Sofern sich neue beziehungsweise effektivere Verfahren in der Industrie etablieren würden, wäre die WEA-Branche höchstwahrscheinlich empfänglich dafür. Oftmals hängt dies mit der Wirtschaftlichkeit zusammen und somit sind die Unternehmen von den Forschungsfortschritten abhängig. Es gilt abzuwarten, wie sich dies in Zukunft entwickeln wird.

### 7 Diskussion und Ausblick

In Deutschland wird aktuell ein Anteil von zehn Prozent erneuerbaren Energien durch Windkraft bereitgestellt (25 % erneuerbare Energien in Deutschland insgesamt). Die energiepolitisch gesteckten Ziele der Bundesregierung bestehen darin, bis zu dem Jahr 2050 80 % aus erneuerbaren Energien zu beziehen. 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 (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2010), (Bremer Energie Institut, Bosch & Partner, 2012).

Zur Erreichung dieser energiepolitischen Ziele stellt demnach Repowering aktuell und in kommender Zukunft einen großen Markt dar. Geeignete Standorte in Deutschland sind jedoch begrenzt. Durch Repowering wird ermöglicht, dass auf den vorhandenen Flächen Alt-WEA durch neue, leistungsstärkere WEA ersetzt werden können und dadurch mehr Leistung (höhere Ausbeute der Energie) erzielt werden kann. Durch den Wegfall des Repowering-Bonus aufgrund der aktuellen EEG-Novellierung ist ein spürbarer Rückgang der Auftragslage von Repowering-Projekten – wie zum Beispiel bei der *juwi AG* – eingetreten. In absehbarer Zeit jedoch werden WEA-Unternehmen voraussichtlich – auch ohne Bonus – wieder in leistungsstärkere WEA durch Repowering der Alt-WEA investieren.

In Kapitel 5 wurde statistisch mit Mittelwerten eine Gesamt-Materialmenge von circa 236.000 Tonnen – die in Zukunft zum Recycling ansteht – errechnet. Es sind aktuell 773 WEA (Stand 2015) in Hessen in Betrieb, welche eine Gesamtleistung von 1.131 MW haben. Im Vergleich zu anderen Bundesländern, wie zum Beispiel Niedersachsen (8.233 MW) und Brandenburg (5.456 MW) (Stand 2014) (Bundesverband WindEnergie e.V., 2014), hat das Bundesland Hessen zum jetzigen Zeitpunkt eine wesentlich geringere Materialmenge von WEA, die in Zukunft recycelt werden muss.

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 und ist außerdem aufgrund des vorherrschenden Standortmangels für WEA in Deutschland kontraproduktiv. Auch die Wiederverwendung von gebrauchten Anlagenteilen hat einen positiven Einfluss auf die Nachhaltig-

keit und Ressourcenschonung. Bevor Anlagenteile recycelt oder verwertet werden, ist es sinnvoller, diese in anderen WEA weiterzuverwenden, bevor dieses Ersatzteil dafür neuproduziert 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 in dieser Bachelorarbeit erarbeitenden Inhalte 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 (Fraunhofer ICT, 2013). Schwierig ist hingegen noch das Recycling von Verbundwerkstoffen wie GFK und CFK. Beton kann in Form von RC-Beton wieder zurück in den Stoffkreislauf geführt werden, wird aber derzeit aufgrund mangelnder Wahrnehmung von Architekten und Bauingenieuren selten verwendet. Dieser Missstand kann behoben werden, indem eine geeignetere Vermarktung des RC-Betons stattfindet oder Gesetze erlassen werden, welche eine Verwendung von RC-Beton vorschreiben. Metalle wie Stahl, Kupfer und Aluminium gehören zu Roh beziehungsweise Werkstoffen, die innerhalb eines vollständig geschlossenen Recycling-Systems wieder für die ursprüngliche Nutzung Verwendung finden (Recyclingquote circa 99 %).

Die größte Menge an anfallenden Verbundwerkstoffen in einer WEA – die es wieder zurück in den Stoffkreislauf zu führen gilt – ist GFK in den Rotorblättern und der Gondel. CFK wird derzeit bei neueren Rotorblättern an besonders beanspruchten Stellen verwendet. Da aktuell sowie in der nächsten Zeit anfallende Mengen an Rotorblättern aus GFK bestehen und derzeit noch kein im industriellen Maßstab anwendbares Recycling-Verfahren existiert, werden die zerschnittenen Rotorblätter als Rohstoffsubstitut beziehungsweise Ersatzbrennstoff in der Zementherstellung eingesetzt oder in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) thermisch verwertet. Eine andere Möglichkeit mit dem Umgang von defekten Rotorblättern ist eine Reparatur, welche aber nur bis zu einem gewissen Schadensbild realisierbar ist. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist das sogenannte Downcycling. Bei diesem Verfahren werden Verbundwerkstoffe zu neuen Produkten, wie beispielsweise Parkbänke und Lärmschutzwälle, weiterverarbeitet. Nach der Recherche über das Recycling von Verbundwerkstoffen ist festzustellen, dass in diesem Bereich in den vergangenen Jahren Fortschritte zu verzeichnen sind. Es sind derzeit Forschungseinrichtungen mit der Rückgewinnung und Wiederverwen-

derung von Fasern aus Verbundwerkstoffen mit Verfahren wie der Pyrolyse, Solvolyse und der elektrodynamischen Fragmentierung beschäftigt. „Smart Blades“ und „BladeMaker“ sind zwei von der Bundesregierung geförderte Forschungsprojekte, welche das Ziel haben, Rotorblätter von WEA leistungsfähiger zu machen und kostengünstiger zu produzieren. Um den hohen Anforderungen an Rotorblattmaterialien gerecht zu werden, setzt man auch auf neuartige Werkstoffsysteme. Neue Hybridwerkstoffe in Form von Nanokompositen (CNT) oder GFK/Bioverbund-Hybridbauweise zeichnen sich gegenüber den bisher eingesetzten Verbundwerkstoffen besonders durch leichtgewichtiger und stabilere Materialien sowie verbesserte Materialeigenschaften aus.

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. Auch im Onshore-Bereich werden diese WEA mit Permanentmagneten verwendet. Zwischen den Jahren 2000 und 2009 waren circa zehn Prozent dieser getriebelosen WEA in Deutschland in Betrieb und es lässt sich keine qualifizierte Auskunft darüber geben, wie viele davon mit Permanentmagneten oder mit elektrisch erregten Magneten (ohne SEE) verbaut worden sind. Die Recherche für die Betrachtung der SEE in Hessen hat ergeben, dass die häufig verbauten WEA-Modelle in Hessen keine SEE enthalten. Zahlen und Informationen zu den asiatischen Herstellern, die in der Branche dafür bekannt sind, SEE zu verwenden, sind nicht in der Datenbank hinterlegt. Das namentliche Hinterlegen der exakten WEA-Modellbezeichnung eines Windparks ist freiwillig und gesetzlich nicht verpflichtend. (Regierungspräsidium Hessen, 2015) Aus diesen vorliegenden Daten ist festzuhalten, dass die in Hessen zu erwartende Menge an SEE gering bis nicht vorhanden sein wird.

Derzeit ist man in der Forschung mit dem Thema Recycling und Optimierung von SEE beschäftigt. Aktuelle Forschungsprojekte wie „More (Motor Recycling)“ von *Siemens* und Partnern untersuchen die gesamte Wertschöpfungskette der SEE mit dem Ziel, verschiedene Ansätze für das Recycling von Elektromotoren zu verfolgen. Es gibt ein weiteres Projekt unter der Leitung des *Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik (IVM)*, welches Strategien gegen die Knappheit wichtiger chemischer Elemente entwickelt. Hierbei liegt ein Teil der Arbeit darin, Dysprosium von außen in den Magneten diffundieren zu lassen anstatt es mit

anderen Metallen wie Eisen, Neodym und Bor komplett einzuschmelzen. Motorenhersteller arbeiten außerdem an Verfahren, um die Verwendung von SEE zu reduzieren beziehungsweise ganz darauf verzichten zu können (Klingler-Deiseroth, 2013).

Durch den Fragebogen zu Rückbau und Verwertung von WEA wurde in Erfahrung gebracht, dass sich die WEA-Unternehmen zum großen Teil mit der Thematik Rückbau, Weiter- und Wiederverwendung sowie Verwertung von WEA befassen. Derzeit wenden sie die ihnen zur Verfügung stehenden Verfahren an, wobei die Wirtschaftlichkeit jedoch stets im Vordergrund steht. Auf Seiten der Unternehmen werden nur Verfahren zur Verwertung und Wiederverwendung von WEA und ihren Komponenten angewandt, welche einen (direkten oder indirekten) finanziellen Vorteil bringen. Dies zeigt sich am Beispiel des Weiterverkaufs von WEA ins Ausland, welcher als gewinnbringender erachtet wird als das selbst durchgeführte Recycling. Der Trend zur (inländischen) Wiederverwertung kann also nur initiiert werden, wenn Recyclingverfahren für Unternehmen wirtschaftlicher sind als der Verkauf von Altteilen und die anschließende Neuanschaffung. Das Beispiel der mangelnden Akzeptanz des Abnehmermarktes von RC-Beton zeigt, dass wirtschaftliche Verfahren entweder besser vermarktet werden oder entsprechende Gesetze eine Anwendung verpflichtend machen müssen. Außerdem ist festzuhalten, dass bei den WEA-Unternehmen konkrete Projekte und Planungen bezüglich des Rückbaus und der Verwertung von WEA aufgrund von Betriebsgeheimnissen nicht bereitgestellt wurden, was auf das Konkurrenzverhalten zurückzuführen ist.

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 die Verwendung von Hybridwerkstoffen in Zukunft gelöst werden können. Voraussichtlich werden in den nächsten Jahren WEA zu 100 % recycelt werden können.

## Literaturverzeichnis

**AVK e. V. 2011.** Pressemitteilung: Zajons gewinnt AVK- Innovationspreis 2011. [Online] 04. 10. 2011. [Zitat vom: 11. 06. 2015.] [http://www.avk-tv.de/files/pressclip/vk-pc/2011004\\_zajons\\_gewinnt\\_avk-\\_innovationspreis\\_2011.pdf](http://www.avk-tv.de/files/pressclip/vk-pc/2011004_zajons_gewinnt_avk-_innovationspreis_2011.pdf).

**BauNetz Media GmbH. 2015.** Recycling von Aluminium. [Online] 2015. [Zitat vom: 27. 05. 2015.] [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fenster-und-Tueren\\_Recycling-von-Aluminium\\_155381.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fenster-und-Tueren_Recycling-von-Aluminium_155381.html).

**Baur, Brinkmann, Osswald, Rudolph, Schmachberg. 2013.** Saechtling Kunststoff Taschenbuch. München : Carl Hanser Verlag, 2013. 978-3-446-43442-4.

**Bergische Universität Wuppertal. 2015.** Sachstandsbericht zum STAHLRECYCLING IM BAUWESEN. [Online] 2015. [Zitat vom: 27. 05. 2015.] <http://www.bauforumstahl.de/upload/documents/nachhaltigkeit/Sachstandsbericht.pdf>.

**Bremer Energie Institut, Bosch & Partner. 2012.** Gutachten zu den Regionalen Energiekonzepten Hessen unter besonderer Berücksichtigung Erneuerbarer Energien. [Online] 09. 2012. [Zitat vom: 22. 06. 2015.] [https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/regionale-energiekonzepte\\_hauptbericht-kurzfassung.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/regionale-energiekonzepte_hauptbericht-kurzfassung.pdf).

**Brosy, Martin. 2013.** Aufbau eines Windrades. [Online] 2013. [Zitat vom: 23. 06. 2015.] [http://www.energienpoint.de/fileadmin/templates-energienpoint/Aufbau\\_eines\\_Windrades.png](http://www.energienpoint.de/fileadmin/templates-energienpoint/Aufbau_eines_Windrades.png).

**Bundesministerium der Justiz. 2001.** Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAbIV). [Online] 20. 02. 2001. [Zitat vom: 11. 06. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abfablv/gesamt.pdf>.

**Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2009.** Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). [Online] 27. 04. 2009. [Zitat vom: 11. 06. 2015.] [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv\\_2009/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf).

**Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2012.** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. [Online] 24. 02. 2012. [Zitat vom: 09. 06. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>.

**Bundesverband WindEnergie e.V. 2014.** Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland.

[Online] 31. 12. 2014. [Zitat vom: 23. 03. 2015.] [https://www.wind-](https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland)

[energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland](https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland).

— **2014.** Bundesländer TOP 5: Installierte Leistung gesamt. [Online] 31. 12. 2014. [Zitat vom:

22. 06. 2015.] [https://www.wind-](https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/bundeslaender/bundeslaender-im-leistungsvergleich-mw#)

[energie.de/infocenter/statistiken/bundeslaender/bundeslaender-im-leistungsvergleich-mw#](https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/bundeslaender/bundeslaender-im-leistungsvergleich-mw#).

— **2015.** A bis Z - Fakten zur Windenergie. [Online] 04. 2015. [Zitat vom: 23. 04. 2015.]

[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).

— **2015.** Arbeitskreis Weiterbetrieb. [Online] 2015. [Zitat vom: 09. 06. 2015.]

<https://www.wind-energie.de/verband/fachgremien/arbeitskreise/weiterbetrieb>.

— **2015.** Konzepte mit Synchrongenerator (permanent- und fremderregt). [Online] 2015.

[Zitat vom: 01. 06. 2015.] [https://www.wind-](https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/anlagenkonzepte/konzepte-mit-synchrongenerator-permanent-und-fremderregt)

[energie.de/infocenter/technik/anlagenkonzepte/konzepte-mit-synchrongenerator-permanent-und-fremderregt](https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/anlagenkonzepte/konzepte-mit-synchrongenerator-permanent-und-fremderregt).

— **2015.** Referent. [Online] 2015. [Zitat vom: 30. 06. 2015.] [http://www.bwe-](http://www.bwe-seminare.de/referenten-carsten-hoch)

[seminare.de/referenten-carsten-hoch](http://www.bwe-seminare.de/referenten-carsten-hoch).

**Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V. 2015.** Recycling von Kupfer und

Kupferlegierungen. [Online] 05. 2015. [Zitat vom: 27. 05. 2015.]

<https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/recycling-kupfer.html>.

**Dominghaus, Hans et al. 2008.** Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen. Berlin

Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. 978-3-540-72400-1.

**Elsner, Dr. Harald. 2011.** Seltene Erden - Lagerstätten, Projekte und Entwicklungen. [Online]

3. 02. 2011. [Zitat vom: 11. 07 2015.] [http://www.deutsche-](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/elsner_seltene_erden_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

[rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/elsner\\_seltene\\_erden\\_2011.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/elsner_seltene_erden_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=2).

**Energie & Technik. 2012.** Windenergie: zu Lande oder zu Wasser? [Online] 23. 2. 2012. [Zitat

vom: 15. 04. 2015.] [http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-](http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-energien/artikel/86110/1/)

[energien/artikel/86110/1/](http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-energien/artikel/86110/1/).

**EUR-Lex. 2015.** Dokument 31991L0155. [Online] 2015. [Zitat vom: 05. 06 2015.] [http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31991L0155)

[lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31991L0155](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31991L0155).

**Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. 2012.** FORSCHUNG KOMPAKT - Blitz, schlag' ein!

[Online] 10. 2012. [Zitat vom: 26. 05. 2015.]

<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>.

— **2013.** Betonrecycling zum Leuchtturmprojekt gekürt - Fraunhofer IBP wird Bundessieger im Land der Ideen. [Online] 14. 11. 2013. [Zitat vom: 26. 05. 2015.]

[http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse\\_und\\_Medien/Presseinformationen/pm-14-11-13\\_betonrecycling.html](http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/pm-14-11-13_betonrecycling.html).

**Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Umwelt-Engineering Pfinztal bei**

**Karlsruhe. 2013.** Recycling von Windkraftanlagen. [Online] 06. 02. 2013. [Zitat vom: 24. 04. 2015.]

[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).

**GL Renewables Consulting & Engineering. 2010.** Technisches Begleitgutachten. Ausweisung von Vorrangflächen für Windenergieanlagen, Freie und Hansestadt Hamburg. [Online] 23. 02. 2010. [Zitat vom: 24. 06. 2015.]

<http://www.hamburg.de/contentblob/3577452/data/2010-02-23-nr23-technisches-begleitgutachten-gl.pdf>.

**Hau, Erich. 2014.** Windkraftanlagen. Krailling bei München : Springer Science+ Business Media, 2014. 978-3-642-28876-0.

**Heier, Siegfried. 2012.** Nutzung der Windenergie. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2012. 978-3-8167-8607-8.

**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. [Online] 15. 03. 2012. [Zitat vom: 13. 06. 2015.]

[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).

**Hoch, Carsten. 2015.** Interview bei juwi AG. Wörrstadt, 04. 05. 2015.

**ifeu-Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2015.** Was ist RC-Beton?

[Online] 05. 2015. [Zitat vom: 27. 05. 2015.] <http://www.rc-beton.de/rc-beton.html>.

- Informations Zentrum Beton. 2015.** Recyclingbeton. [Online] 2015. [Zitat vom: 2015. 05. 27.] [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton-Recycling-Beton\\_930267.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton-Recycling-Beton_930267.html).
- Kalweit, Andreas et al. 2012.** Handbuch für Technisches Produktdesign. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012.
- Klingler-Deiseroth, Carmen. 2013.** Motorenhersteller meiden Seltene Erden. [Online] 22. 11. 2013. [Zitat vom: 22. 06. 2015.] <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Motorenhersteller-meiden-Seltene-Erden>.
- NATURSTROM AG. 2014.** Weniger bringt mehr. [Online] 17. 03. 2014. [Zitat vom: 08. 06. 2015.] <http://www.energiezukunft.eu/wind/forschung/weniger-bringt-mehr-gn101985/?printView=1>.
- Nordex. 2014.** Schmierstoffe, Kühlflüssigkeit, Transformatoröl und Maßnahmen gegen unfallbedingten Austritt. 2014.
- Öko-Institut e. V. 2014.** Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. [Online] 01. 2014. [Zitat vom: 01. 06. 2015.] <http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>.
- Paulsen, Thorsten und Thüring, Hildegard. 2015.** Jahrbuch Windenergie 2015. [Hrsg.] Bundesverband WindEnergie e.V. Berlin : s.n., 2015. 978-3-942579308.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. 2010.** Das Energiekonzept 2050. [Online] 09. 2010. [Zitat vom: 22. 06. 2015.] [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).
- . **2013.** Windmühlenflügel der Zukunft. [Online] 24. 11. 2013. [Zitat vom: 12. 06. 2015.] [http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Forschung\\_konkret/11\\_rotorblaetter/\\_node.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Forschung_konkret/11_rotorblaetter/_node.html).
- Quaschnig, Volker. 2013.** Regenerative Energiesysteme. München : Hanser Verlag, 2013. 978-3-446-43571-1.
- Regierungspräsidium Hessen. 2015.** Länderinformationssystem für Anlagen (LIS-A). [xls] Wiesbaden : s.n., 2015.
- Schaffarczyk, Alois, Beurskens, Jos und Dannenberg, Lothar. 2012.** Einführung in die Windenergietechnik. München : Carl Hanser Verlag München, 2012.

**Schmidl, Dr. Erwin. 2010.** Der Kreislauf schließt sich. [Online] 31. 08. 2010. [Zitat vom: 11. 06. 2015.] <http://www.erneuerbareenergien.de/der-kreislauf-schliesst-sich/150/475/28812/>.

**Seifert, Severin, Thome, Volker und Karlstetter, Christof. 2013.** Elektrodynamische Fragmentierung. [Online] 2013. [Zitat vom: 26. 05. 2015.] [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).

**Siemens. 2013.** Recycling von Carbonfasern aus Verbundwerkstoffen. [Online] 06. 2013. [Zitat vom: 16. 06. 2015.] [http://www.siemens.com/innovation/de/news/2013/inno\\_1316\\_1.htm](http://www.siemens.com/innovation/de/news/2013/inno_1316_1.htm).

— . **2015.** Energy Management. [Online] 11. 03. 2015. [Zitat vom: 24. 06. 2015.] [http://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2015/energymanagement/pr2015030151emde.htm&content\[\]=EM](http://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2015/energymanagement/pr2015030151emde.htm&content[]=EM).

**Thomas, Torsten. 2011.** Ökobilanzen für Onshore-Windenergieanlagen im Blick. [Online] 02. 09. 2011. [Zitat vom: 23. 06. 2015.] <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Windenergie/Oekobilanzen-fuer-Onshore-Windenergieanlagen-im-Blick>.

**Ulges, Patrick. 2015.** Potentiale für die Nachnutzung und Entsorgung von Windkraftanlagen. [Bachelorarbeit an der Hochschule RheinMain] 2015.

**VDI Technologiezentrum GmbH. 2014.** Kurzanalyse Nr. 8: Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich. [Online] 06. 2014. [Zitat vom: 26. 05. 2014.]

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). 2014.** Kurzanalyse Nr. 9 - Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. [Online] 08. 2014. [Zitat vom: 24. 04. 2015.] [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).

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. 2014.** Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. [Online] 03. 2014. [Zitat vom: 12. 06. 2015.] [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf).

**Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2014.** Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. [Online] 04. 2014. [Zitat vom: 11. 06. 2015.]

[http://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur/dps\\_bilder/SK/Homepage\\_-\\_quadrat/VDI-Studie\\_Werkstoffinnovationen.pdf](http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur/dps_bilder/SK/Homepage_-_quadrat/VDI-Studie_Werkstoffinnovationen.pdf).

**Volkswind GmbH. 2015.** Repowering. [Online] 2015. [Zitat vom: 23. 06. 2015.]

<http://www.volkswind.de/windparks-konzepte/repowering.html>.

**WindGuard. 2015.** WindGuard und die Windenergie. [Online] 04. 2015. [Zitat vom: 30. 03. 2015.] <http://www.windguard.de/unternehmen/historie.html>.

**Windkraft-Journal. 2013.** Wachstumsmarkt: Kohlefaserverstärkte Kunststoffe für die Windkraftindustrie. [Online] COMPOSITES EUROPE, 29.. 06 2013. [Zitat vom: 22.. 05 2015.] <http://www.windkraft-journal.de/2013/07/29/wachstumsmarkt-kohlefaserverstaerkte-kunststoffe-fuer-die-windkraftindustrie/>.

**Wuppertal Institut. 2014.** KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Mitarbeit von Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Michael Ritthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen. [Online] 2014. [Zitat vom: 06. 05. 2015.] <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38/>.

**Zajons Zerkleinerungs GmbH. 2015.** Composite Recycling®. [Online] 2015. [Zitat vom: 11. 06. 2015.] <http://www.zajons-zerkleinerung.de/index.php/de/composites>.

**Zepf, Volker. 2015.** Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden. [Online] 05. 03. 2015. [Zitat vom: 01. 06. 2015.]

[http://www.vivis.de/phocadownload/2015\\_rur/2015\\_RuR\\_463-476\\_Zepf.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/2015_rur/2015_RuR_463-476_Zepf.pdf).

**Zimmermann, Till, Rehberger, Max und Gößling-Reisemann, Stefan. 2013.** Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind. [Online] 27. 08. 2013. [Zitat vom: 23. 06. 2015.] <http://www.mdpi.com/2079-9276/2/3/303>.

## Anhang

### A Fragebogen zum Rückbau und zur Verwertung von Windenergieanlagen

#### Allgemein

**1. Sind Sie ...**

- Hersteller von Windenergieanlagen
- Betreiber von Windenergieanlagen
- Hersteller und Betreiber von Windenergieanlagen

**2. Existieren in Ihrem Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von Windenergieanlagen?**

- Ja
- Nein

**3. Wann endet für Sie die Einsatzzeit der Windenergieanlagen?**

- Nach Ablauf der Genehmigung
- Nach Ablauf der technischen Lebenszeit
- Nach Ablauf der wirtschaftlichen Erträge (Wartung vs. Erlöse)

**4. Was passiert nach Ablauf der Einsatzzeit der Windenergieanlagen?**

- Rückbau und Verkauf der Windenergieanlagen
- Rückbau und Verwertung der Windenergieanlagen (Bsp. therm.-Verwertung)
- Rückbau und Wiederverwendung der Windenergieanlagen
- Repowering der Windenergieanlagen

Noch nicht sicher

Sonstiges, und zwar

A:

**5. Liegen in Ihrem Unternehmen Anreize zum Rückbau von Windenergieanlagen außerhalb der gesetzlichen Verpflichtung vor?**

Ja

Nein

**Wenn ja, welche sind es?**

um der vertraglichen Verpflichtung gegenüber dem Grundstückseigentümer nachzukommen

um leistungsstärkere Windenergieanlagen zu errichten

um Fremd-Windenergieanlagen durch eigene Windenergieanlagen zu ersetzen

um die Immissionen zu reduzieren

um mehr Windenergieanlagen zu errichten

um interne Ausbauziele zu erreichen

Sonstiges, und zwar

A:

**6. Haben Sie Erfahrungen durch Projekte mit dem Rückbau von Windenergieanlagen?**

Ja

Nein

**7. Wer übernimmt den Rückbau?**

- Hersteller
- Betreiber
- Subunternehmen
- Sonstige

**Verkauf der Windenergieanlagen**

**8. Wenn Verkauf der Windenergieanlagen, dann ...**

- Verkauf der kompletten Anlage
- Verkauf von Anlageteilen
- noch nicht sicher

**Wiederverwendung der Windenergieanlagen**

**Definition**

**Wiederverwendung:** Die Rotorblätter werden in einem anderen Projekt wiederverwendet.

**Wiederverwertung:** Die Rotorblätter werden zum Beispiel durch Pyrolyse dem Stoffkreislauf für Neuproduktion wieder zugeführt (sogenanntes Recycling).

**Verwertung:** Die Rotorblätter werden zum Beispiel thermisch verwertet.

**9. Werden bestimmte Anlagenteile der Windenergieanlagen wiederverwendet?**

- Ja
- Nein

**Wenn ja, welche Anlagenteile werden wiederverwendet?**

A:

**Wenn nein, wird angestrebt Anlagenteile wiederzuverwenden?**

Ja

Nein

**Welche Anlagenteile werden angestrebt wiederzuverwenden?**

A:

**Welche Materialien sind für Sie zur Wiederverwendung von Bedeutung?**

A:

## Verwertung der Windenergieanlagen

**10. Werden bestimmte Anlagenteile der Windenergieanlagen wiederverwertet?**

Ja

Nein

**Wenn ja, welche werden wiederverwertet und mit welchem Verfahren?** (stichpunktartig: Bsp.: Rotorblätter – Pyrolyse / Rotorblätter – Verwertung)

A:

**Wenn nein, wird angestrebt Anlagenteile wiederzuverwerten?**

Ja

Nein

**Welche Anlagenteile werden angestrebt wiederzuverwerten?**

A:

**Wird ein spezielles Verfahren zur Wiederverwertung von Anlagenteilen angestrebt?**

Ja

Nein

**Welches Verfahren zur Wiederverwertung von Anlagenteilen wird angestrebt?**

A:

## Sonstiges

**11. Bestehen Konzepte oder Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren Windenergieanlagen?**

Ja

Nein

**Wenn ja, welche sind es?**

Reduktion von seltenen Erden

Reduktion des Eigenstrombedarfs

Reduktion von wassergefährdenden Stoffen

Reduktion des Gewichts einzelner Anlagenteile

Welcher?

A:

Anderes Kühlsystem der Windenergieanlagen

Einsatz nachwachsender Rohstoffe

Welche?

A:

Sonstiges und zwar

A:

**12. Investiert Ihr Unternehmen in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von Windenergieanlagen?**

Ja

Nein

**Wenn ja, in welche Art der Forschung und Entwicklung?**

A:

*(Ich wäre Ihnen sehr dankbar, wenn Sie mir Infomaterial diesbezüglich zur Verfügung stellen könnten.)*

**13. Wird recyceltes Material für den Bau Ihrer Windenergieanlagen verwendet?**

Ja

Nein

**Wenn ja, welches Material?**

A:

**14. Haben Sie Interesse an den Ergebnissen der Umfrage?**

Ja

Nein

**Wenn ja, bitte E-Mail-Adresse angeben.**

E-Mail:

**Bemerkungen, Ideen oder Anregungen:**

Vielen Dank für Ihre Mithilfe.

## B Statistische Auswertung des Fragebogens

Es wurden 14 Hersteller und 51 Betreiber von WEA angeschrieben. Abbildung 9 zeigt die gesamte Rücklaufquote der Befragung.

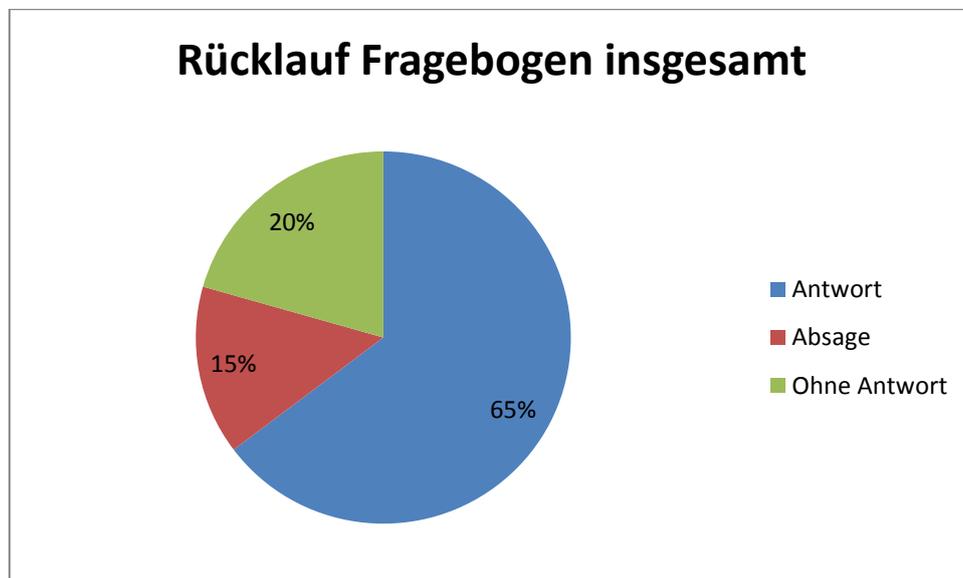


Abbildung 9: Rücklauf Fragebogen insgesamt

65 % der befragten Unternehmen sendeten einen ausgefüllten Fragebogen zurück, 15 % verweigerten entweder aus zeitlichen Gründen oder geschäftsinternen Bestimmungen eine Auskunft beziehungsweise die Vervollständigung des Fragebogens. 20 % der WEA-Hersteller und Betreiber gaben in der gesetzten Frist sowie nach Verlängerung keinerlei Antwort.

Zur Veranschaulichung der Bereitschaft der jeweiligen befragten Unternehmungsgruppen (Hersteller und Betreiber) in Bezug auf Vervollständigung des Fragebogens werden diese nochmals getrennt dargestellt.

64 % der befragten Hersteller füllten den Fragebogen aus. 14 % erteilten eine Absage und 22 % der Hersteller verblieben in der gesetzten Frist sowie nach Verlängerung ohne Antwort.

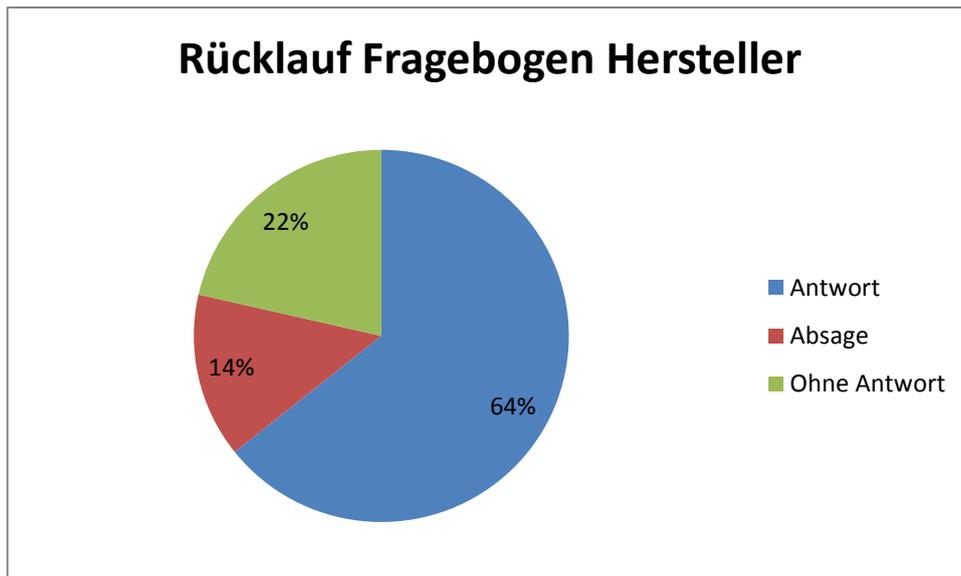


Abbildung 10: Rücklauf Fragebogen Hersteller

63 % der befragten Betreiber gaben Auskunft in Bezug auf den ihnen gesendeten Fragebogen, 18 % gaben keine Auskunft und von 19 % der Betreiber blieb eine Antwort aus.

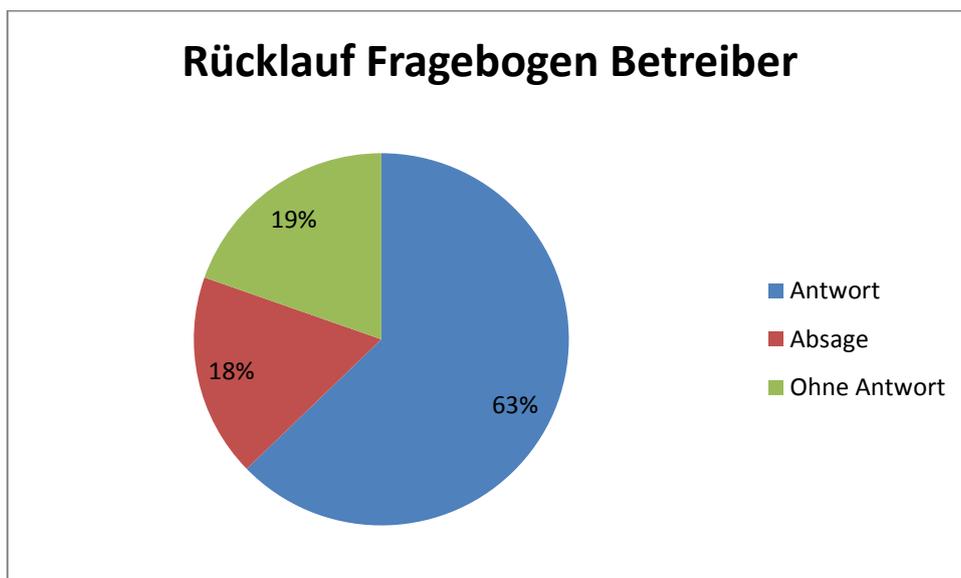


Abbildung 11: Rücklauf Fragebogen Betreiber

#### Frage 1: Sind Sie Hersteller, Betreiber oder Hersteller und Betreiber von WEA?

Durch Beantwortung der ersten Frage des Fragebogens ergab sich folgende Aufteilung:

Wie dem unten stehenden Diagramm zu entnehmen ist, handelte es sich bei den Befragten, die Rückmeldung zum Fragebogen gaben, um 35 Betreiber, 6 Hersteller und 3 Firmen, die zugleich Hersteller und Betreiber von WEA sind. Die Unterteilung in diese drei Unternehmensgruppen wird in der nachfolgenden Auswertung beibehalten, da die Motivation von

Herstellern, Betreibern oder Hersteller-Betreiberunternehmen jeweils eine andere ist, dies sich womöglich in den Antworten niederschlägt und deshalb eine gesonderte Betrachtung erfordert.

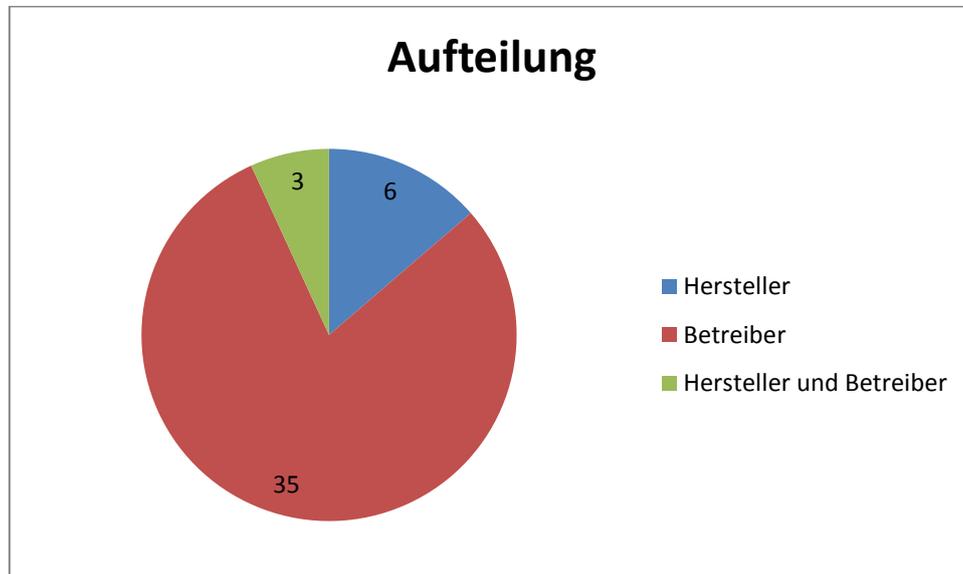


Abbildung 12: Aufteilung der WEA-Hersteller und Betreiber

Frage 2: Existieren in Ihrem Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von WEA?

Hier wurde ersichtlich, ob in den jeweiligen Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von WEA existieren: 67 % der Hersteller verfügen über solche, 33 % nicht.

Von den befragten Betreibern haben 68 % Konzepte und Ansätze zum Rückbau. 29 % gaben an, keine Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von WEA zu haben und 3 % der Betreiber gaben keine Auskunft.

Alle Hersteller, welche auch selbst WEA betreiben, gaben an, Konzepte und Ansätze zum Rückbau von WEA zu haben.

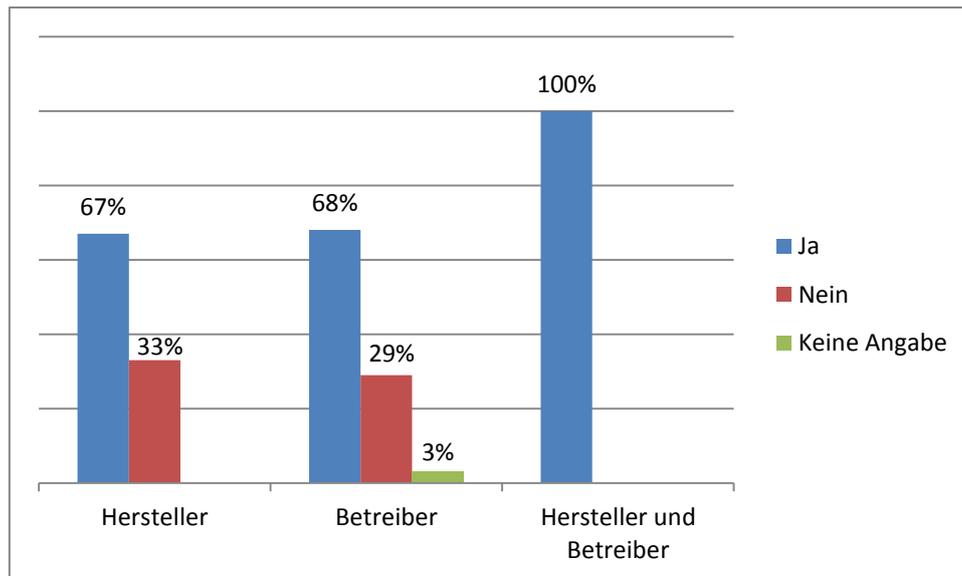


Abbildung 13: Konzepte zum Rückbau der befragten Unternehmen

### Frage 3: Wann endet für Sie die Einsatzzeit der WEA?

Hier wurde gefragt, wann für die Unternehmen der Einsatz der WEA endet. Wie in Abbildung 14 in der Farbe blau dargestellt, endet von den befragten Herstellern für 50 % die Einsatzzeit nach Ablauf der technischen Lebenszeit, für 38 % nach Ablauf der wirtschaftlichen Erträge und für 12 % nach Ablauf der Genehmigung.

Von den befragten Betreibern (rot) endet die WEA-Einsatzzeit für 40 % nach Ablauf der wirtschaftlichen Erträge, für 34 % die Einsatzzeit nach Ablauf der technischen Lebenszeit, und für 24 % nach Ablauf der Genehmigung.

Von den befragten Herstellern und Betreibern (grün) endet für 50 % die Einsatzzeit nach Ablauf der technischen Lebenszeit, für 17 % nach Ablauf der wirtschaftlichen Erträge und für 33 % nach Ablauf der Genehmigung.

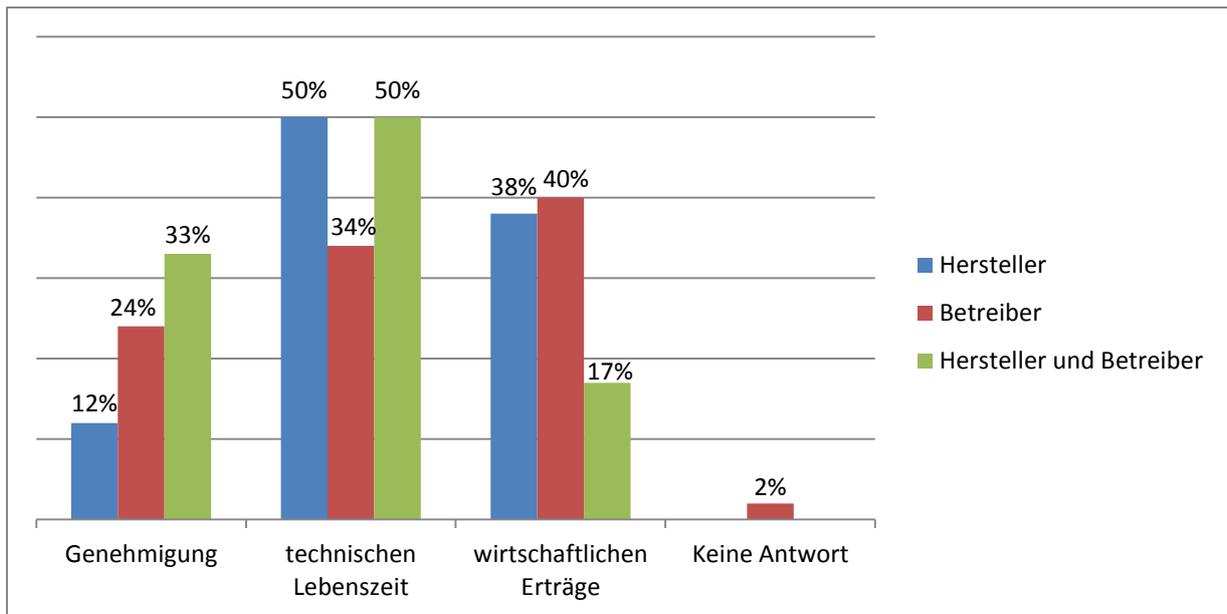


Abbildung 14: Ende der Einsatzzeit der WEA für die befragten Unternehmen

Frage 4: Was passiert nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA?

Bei der vierten Frage konnten die Unternehmen mehrere Antworten auswählen und so angeben, was nach Ablauf der Einsatzzeit mit den WEA geschieht.

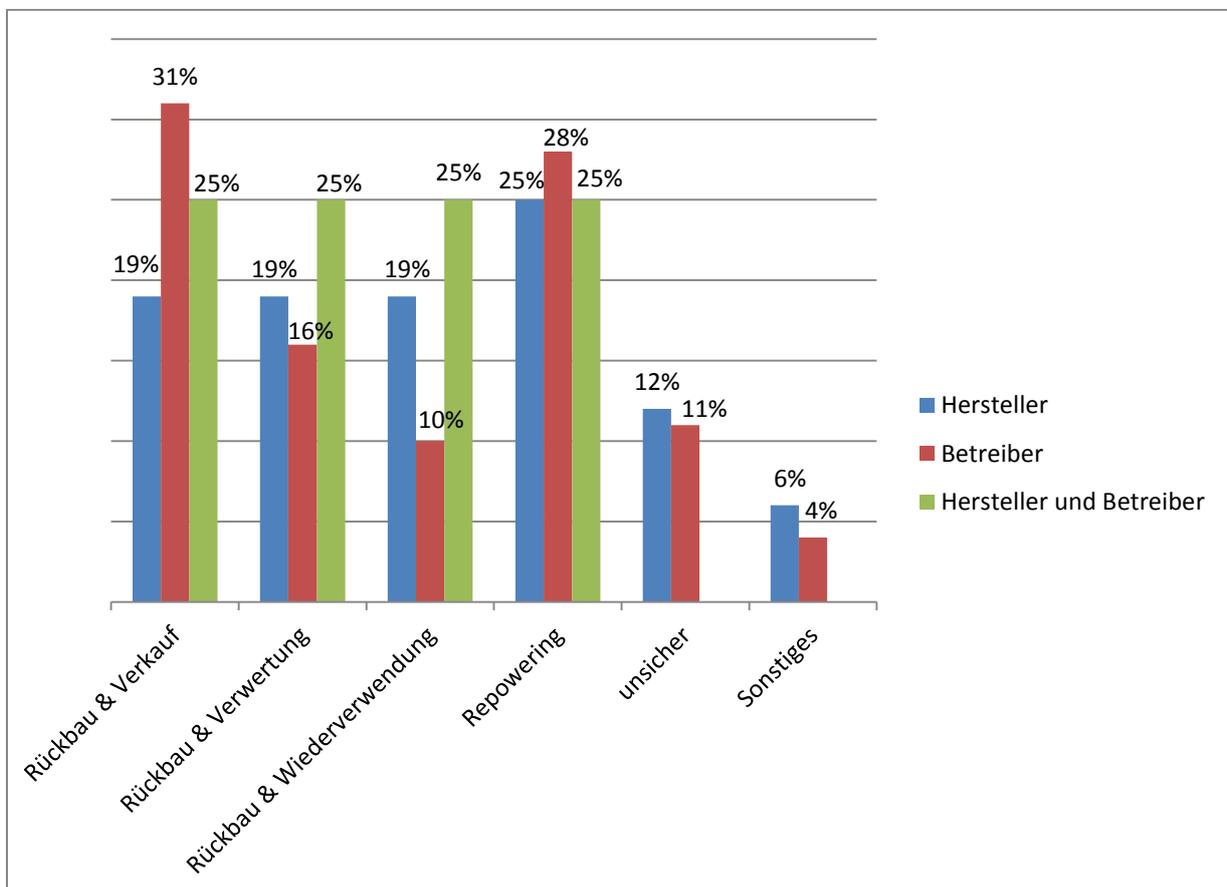


Abbildung 15: Vorgehen nach Ablauf der Einsatzzeit der WEA

Bei 19 % der Hersteller findet ein Rückbau und Verkauf der WEA statt. Ebenfalls 19 % gaben an, dass ein Rückbau und eine Verwertung der WEA vorgenommen werden. Ebenso 19 % nehmen Rückbau und Wiederverwendung vor. Repowering der WEA findet bei 25 % der befragten Hersteller statt. 12 % der Hersteller sind sich noch nicht sicher über das weitere Vorgehen nach Einsatzzeit der WEA. Es gab zudem die Möglichkeit, unter „Sonstiges“ selbst eine Antwort zu verfassen. Es wurde beispielsweise angegeben, dass nach Rückbau die Stahlfundamente verschrottet und somit dem Kreislauf der Neustahlgewinnung zurückgeführt werden. Dies ist jedoch genau genommen unter Rückbau und Verwertung zu fassen.

31 % der Betreiberunternehmen gaben an, dass ein Rückbau und Verkauf der WEA stattfindet. Repowering der WEA findet bei 28 % der befragten Betreiber statt. Bei 16 % findet Rückbau und Verwertung der WEA statt. 11 % der Betreiber sind sich noch nicht sicher über das weitere Vorgehen der Einsatzzeit der WEA. 10 % der Betreiber nehmen Rückbau und Wiederverwendung vor. Unter „Sonstige“ gaben die Betreiber Praxisbeispiele an, welche eigentlich zu Rückbau und Verwertung zu zählen sind.

Bei 25 % der Hersteller-Betreiberunternehmen findet ein Rückbau und Verkauf der WEA und bei 25 % ein Rückbau und eine Verwertung der WEA statt. Ebenso 25 % nehmen Rückbau und Wiederverwendung vor. Repowering der WEA findet bei 25 % der befragten Hersteller-Betreiberunternehmen statt.

### Frage 5: Liegen in Ihrem Unternehmen Anreize zum Rückbau von WEA außerhalb der gesetzlichen Verpflichtung vor?

Die fünfte Frage gab Aufschluss darüber, ob in den befragten Unternehmen Anreize zum Rückbau von WEA außerhalb der gesetzlichen Verpflichtung vorliegen: Exakt bei 50 % der Hersteller ist dies der Fall, bei den Betreibern sind es 69 % und bei den Hersteller-Betreiberunternehmen 33 %.

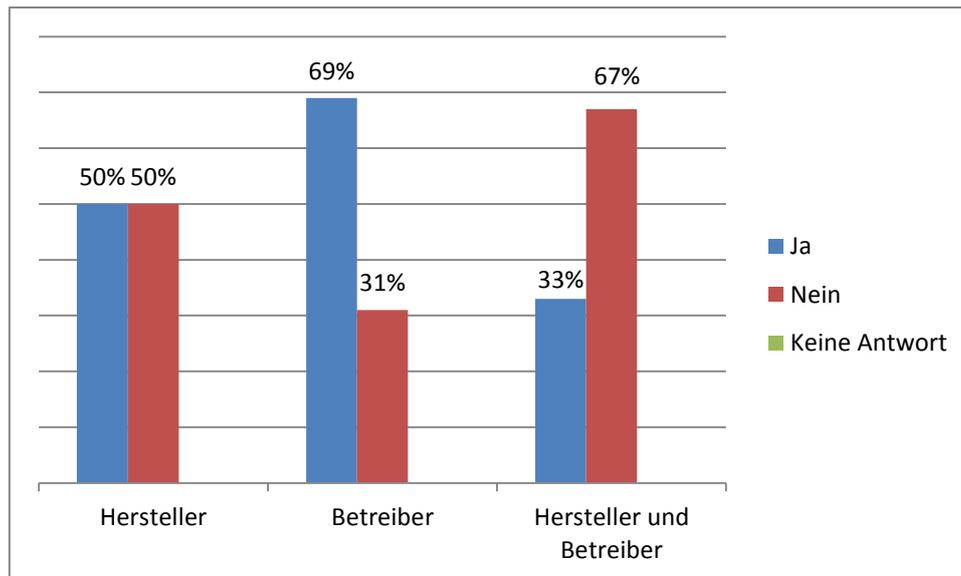


Abbildung 16: Anreize zum Rückbau von WEA

Die vorliegenden Anreize in den Herstellerunternehmen sind folgende: Bei 28 % sollen leistungsstärkere WEA errichtet, bei 27 % Fremd-WEA durch eigene WEA ersetzt und bei weiteren 27 % weitere WEA errichtet werden. 9 % gaben den Anreiz der Immissionsreduzierung an und weitere 9 % wählten „Sonstiges“ aus und nannten den Ab- und Wiederaufbau alter WEA wirtschaftlich interessant.

Bei 41 % der befragten Betreiber sollen leistungsstärkere WEA errichtet werden. 25 % der Betreiberunternehmen haben den Anreiz, der vertraglichen Verpflichtung gegenüber dem Grundstückseigentümer nachzukommen. 6 % gaben an, dass Fremd-WEA durch eigene WEA ersetzt und bei weiteren 10 % weitere WEA errichtet werden sollen. 8 % gaben den Anreiz der Immissionsreduzierung an und weitere 6 % wählten „Sonstiges“ aus und fügten hinzu, dass die mögliche Freisetzung stiller Reserven sowie auch weitere wirtschaftliche Gründe Anreize darstellen. 4 % gaben an, interne Ausbauziele erreichen zu wollen.

50 % der Hersteller-Betreiberunternehmen gaben den Anreiz der Vertragsverpflichtung gegenüber dem Grundstückseigentümer an und weitere 50 % Sonstiges mit dem Kommentar, Reparatur/Wiederherstellung/Erneuerung der Altanlage und Weiterverkauf an andere Standorte.

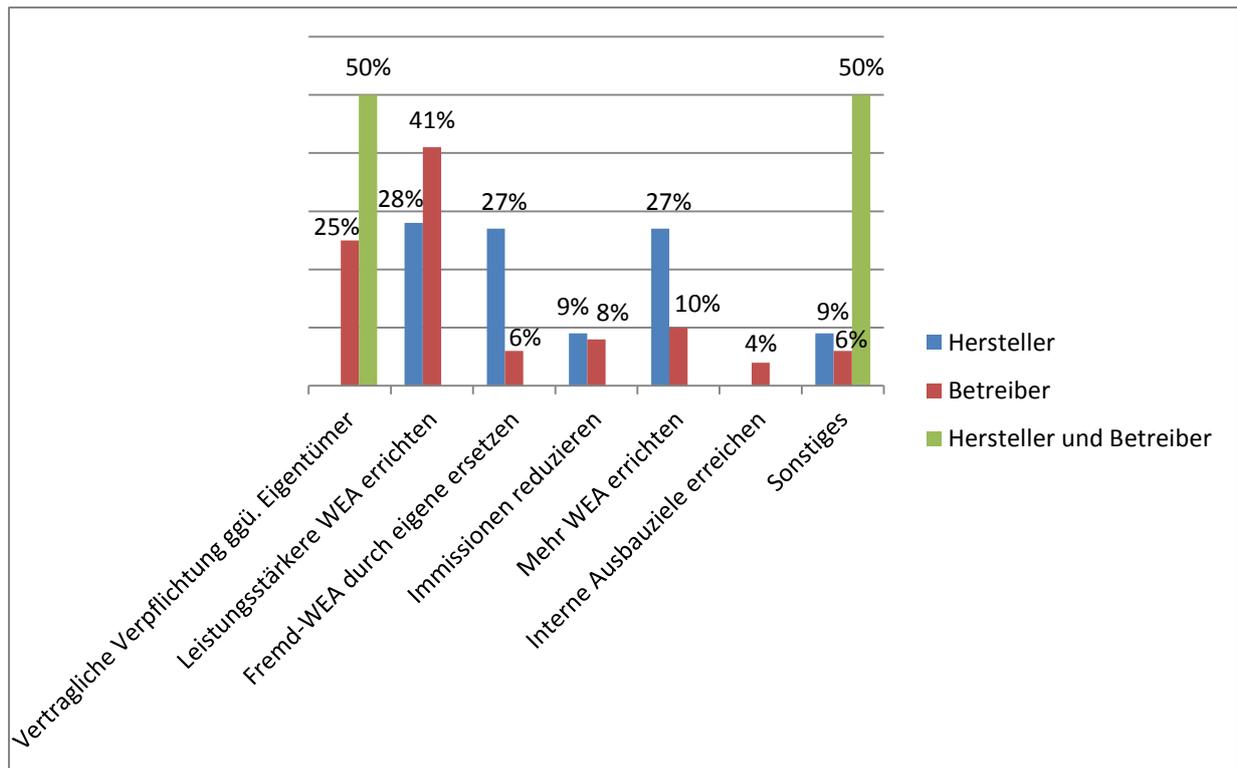


Abbildung 17: Art der Anreize zum Rückbau der WEA

Frage 6: Haben Sie Erfahrungen durch Projekte mit dem Rückbau von WEA?

Durch Beantwortung der sechsten Frage ergab sich, dass 50 % der Hersteller bereits Erfahrung mit dem Rückbau von WEA haben, beispielsweise durch Projekte. Dies ist bei 66 % der Betreiber und allen befragten Hersteller-Betreiberunternehmen ebenso der Fall.

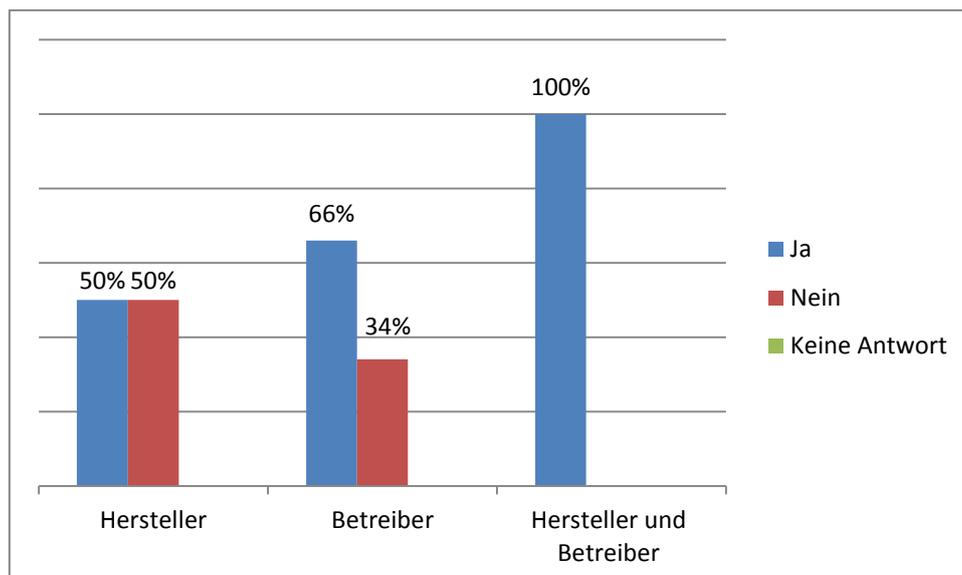


Abbildung 18: Erfahrung mit dem Rückbau von WEA (Projekte)

Frage 7: Wer übernimmt den Rückbau?

Auf die Frage, wer den Rückbau in den jeweiligen Unternehmen übernimmt, wurde wie folgt geantwortet: Bei den befragten Herstellern übernehmen zu 50 % Subunternehmen den Rückbau der WEA, 30 % die Betreiber und 20 % der Hersteller selbst.

Die Betreiber antworteten, dass zu 54 % Subunternehmen, 24 % Betreiber selbst und 11 % Sonstige den Rückbau durchführen.

Hersteller- und Betreiberunternehmen gaben an, dass zu 37 % Hersteller, 24 % Betreiber, 25 % Subunternehmen, sowie 13 % Sonstige den Rückbau der WEA übernehmen.

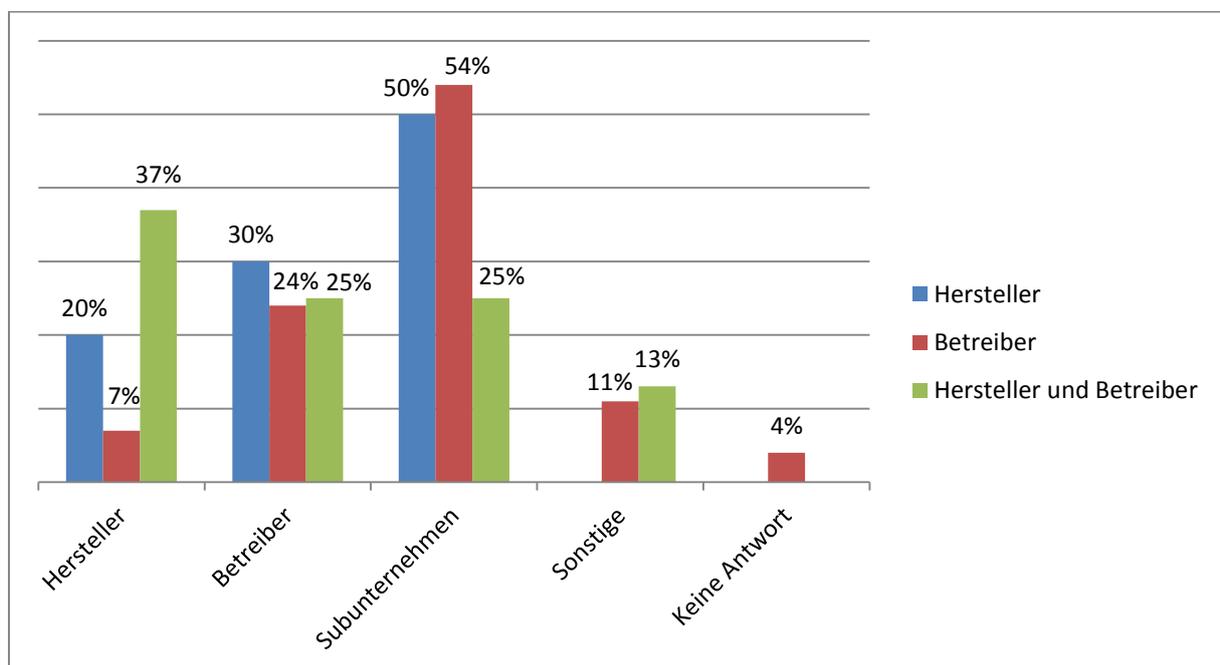


Abbildung 19: Durchführung des Rückbaus

Frage 8: Wenn Verkauf der WEA, dann ...

Sofern WEA verkauft werden, erfolgt dies folgendermaßen: 30 % der Hersteller verkaufen die komplette WEA, 30 % die Anlagenteile und 40 % sind entweder noch unentschieden oder machten keine Angaben über den Verkauf der WEA.

48 % der Betreiber gaben an, dass ihre WEA komplett verkauft werden, 34 % veräußern nur Anlagenteile und 18 % sind sich noch nicht sicher in Bezug auf den Verkauf der WEA.

75 % der Hersteller-Betreiberunternehmen verkaufen ihre WEA komplett und 25 % einzelne Anlagenteile.

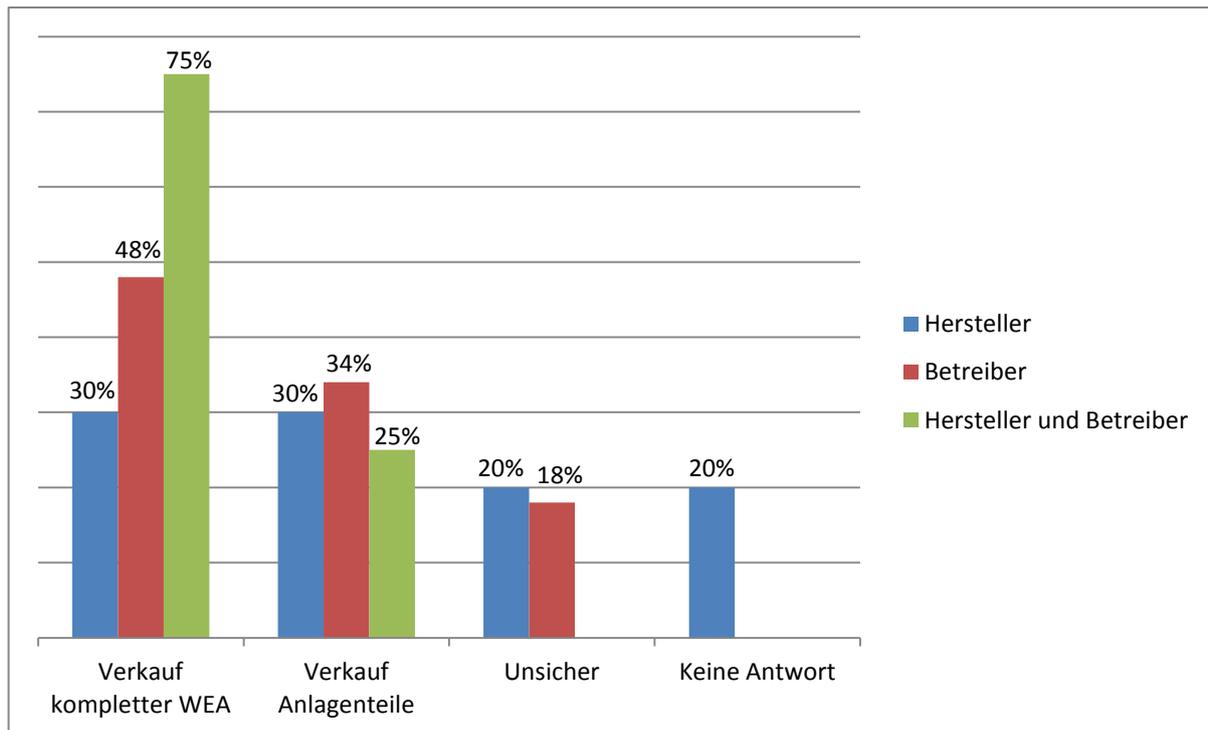


Abbildung 20: Verkauf der WEA

Frage 9: Werden bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwendet?

50 % der Hersteller verwenden bestimmte Anlagenteile der WEA wieder, 33 % nicht und 17 % gaben keine Auskunft.

Die Betreiber verwenden zu 60 % die Anlagenteile der WEA wieder, 34 % nicht und 6 % gaben keine Antwort.

Die befragten Hersteller-Betreiberunternehmen verwenden alle Anlagenteile ihrer WEA wieder.

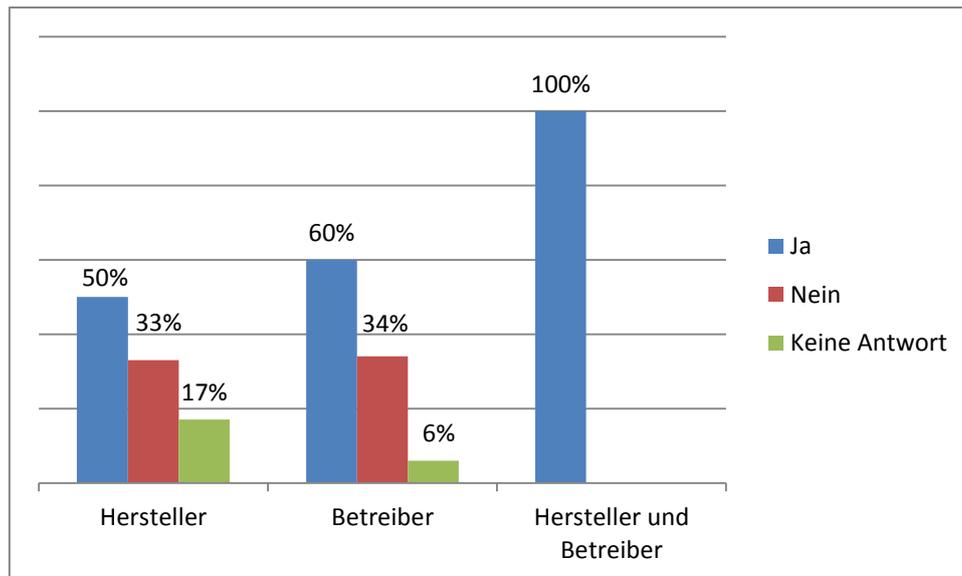


Abbildung 21: Wiederverwendung von Anlagenteilen der WEA

Es fällt auf, dass die WEA-Unternehmen überwiegend einzelne Anlagenteile wiederverwenden.

Die meistgenannten wiederverwendeten Anlagenteile sind folgende:

- Komplette WEA (für Export zur Wiedererrichtung im Ausland)
- Alle Hauptkomponenten und ggf. Kleinteile, falls vom Lieferant nicht mehr verfügbar
- Rotorblätter, Getriebe, Generatoren und Steuerungseinheiten (als Ersatzteile eingelagert)
- Alle Stahl- und Verbundwerkstoffteile, sofern nicht wiederverwendbar

Sofern die befragten Herstellerunternehmen Anlagenteile nicht wiederverwenden, streben sie dies in Zukunft auch nicht an. Die Mehrheit der befragten Betreiberunternehmen, die derzeit Anlagenteile nicht wiederverwenden, beabsichtigt dies ebenfalls nicht.

Für angestrebte wiederzuverwendende Anlagenteile wurden folgende am häufigsten genannt:

- Gesamte WEA
- Turm, Getriebe und Generator
- Prinzipiell alles das, was Erlöse einbringt und somit den Rückbaukosten entgegensteht

Von Bedeutung zur Wiederverwendung sind folgende Materialien laut den Antworten im Rahmen von Frage 9:

- Stahl
- Kupfer
- Beton (als Recycling-Schotter)
- GFK

Die oben genannten Anlagenteile und Materialien wurden zusammengefasst aufgelistet, da sich an dieser Stelle die Antworten der verschiedenen WEA-Unternehmen deckten und somit eine Unterteilung nicht erforderlich ist.

Frage 10: Werden bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwertet?

Bei 67 % der Hersteller werden bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwertet.

46 % der Betreiber gaben an, dass bestimmte Anlagenteile ihrer WEA wiederverwertet werden, bei 34 % findet keine Wiederverwertung bestimmter Anlagenteile statt. Die restlichen 20 % entfallen auf Nicht-Antworten.

Die Antworten der Hersteller-Betreiberunternehmen ergaben, dass 67 % dieser bestimmte Anlagenteile der WEA wiederverwerteten werden.

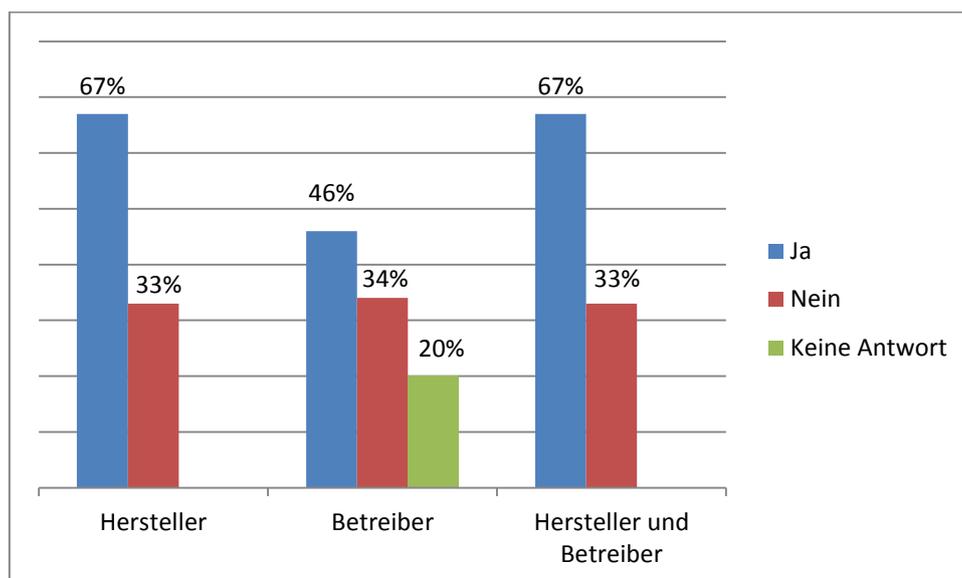


Abbildung 22: Wiederverwertung von Anlagenteilen der WEA

Das obige Diagramm zeigt, dass überwiegend in allen WEA-Unternehmen Anlagenteile wiederverwertet werden. Es ist fraglich, warum speziell bei den Betreiberunternehmen

20 % auf Nicht-Antworten entfallen.

Auf die Frage, welche Anlagenteile wiederverwertet werden und mit welchem Verfahren dies geschieht, antworteten die drei WEA-Unternehmensarten am häufigsten mit:

- Rotorblätter, Verkleidung – Schreddern / thermische oder stoffliche Verwertung
- Generator, Kabel – Kupfer- / Aluminium-Rückgewinnung
- Stahlturm, Getriebe, Bewehrung, Triebstrang – Stahlrückgewinnung
- Fundament – Betonrecycling

Von den befragten Unternehmen, die bestimmte Anlagenteile nicht wiederverwerten, streben zwei Drittel dies auch in Zukunft nicht an. Unter den drei befragten Hersteller-Betreiberunternehmen befindet sich ein Unternehmen, das derzeit keine Wiederverwertung durchführt und dies auch in Zukunft nicht plant.

Folgende Anlagenteile werden zur Wiederverwertung angestrebt (sowohl Hersteller als auch Betreiber):

- Rotorblätter
- Stahlturm
- Fundament
- Getriebe
- Generator mit Bauteilen, wie zum Beispiel Schalter etc.

Es ist zu beobachten, dass bei den drei befragten WEA-Unternehmensarten vorwiegend die Bereitschaft dafür da ist, Wiederverwertung von Anlagenteilen vorzunehmen. Dies lässt den Trend erkennen, dass zukünftig die zuvor genannten Materialien vermehrt in die Stoffstromkreisläufe zurückgeführt werden können. Die Unternehmen, die es jedoch derzeit ohnehin nicht tun, streben dies auch in Zukunft nicht an.

Im Rahmen von Frage 10 ergab sich, dass unter den befragten Unternehmen insgesamt nur ein geringer Teil ein spezielles Verfahren zur Wiederverwertung von Anlagenteilen nutzen möchte: Ein Drittel der befragten Hersteller strebt an, spezielle Verfahren zu nutzen, um Anlagenteile in Zukunft wiederzuverwerten. Bei den Betreibern und Hersteller-

Betreiberunternehmen besteht kein Interesse an einem speziellen Verfahren zur Wiederverwertung.

Frage 11: Bestehen Konzepte und Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA?

Bei 83 % der Hersteller, 20 % der Betreiber und allen der Hersteller- und Betreiberunternehmen existieren Konzepte oder Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA.

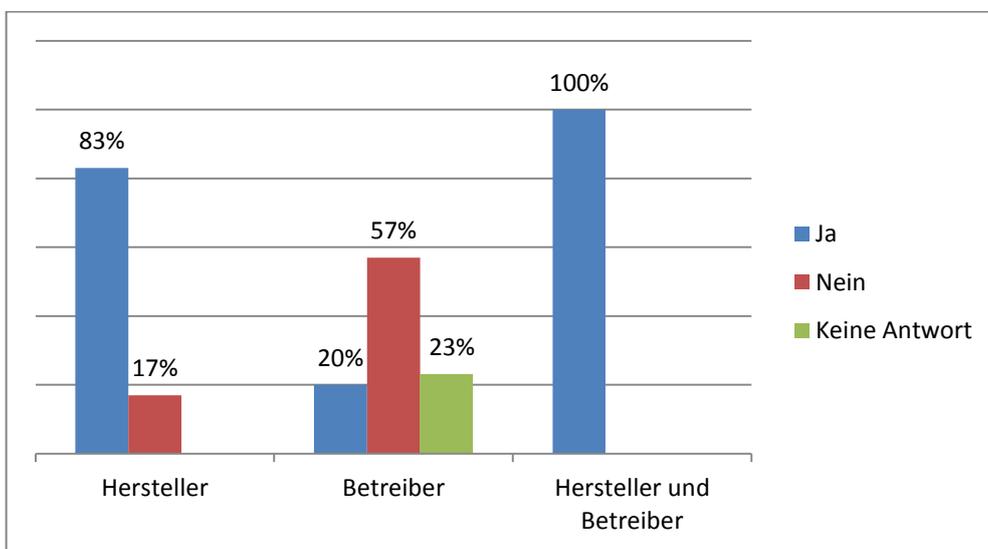


Abbildung 23: Konzepte / Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA

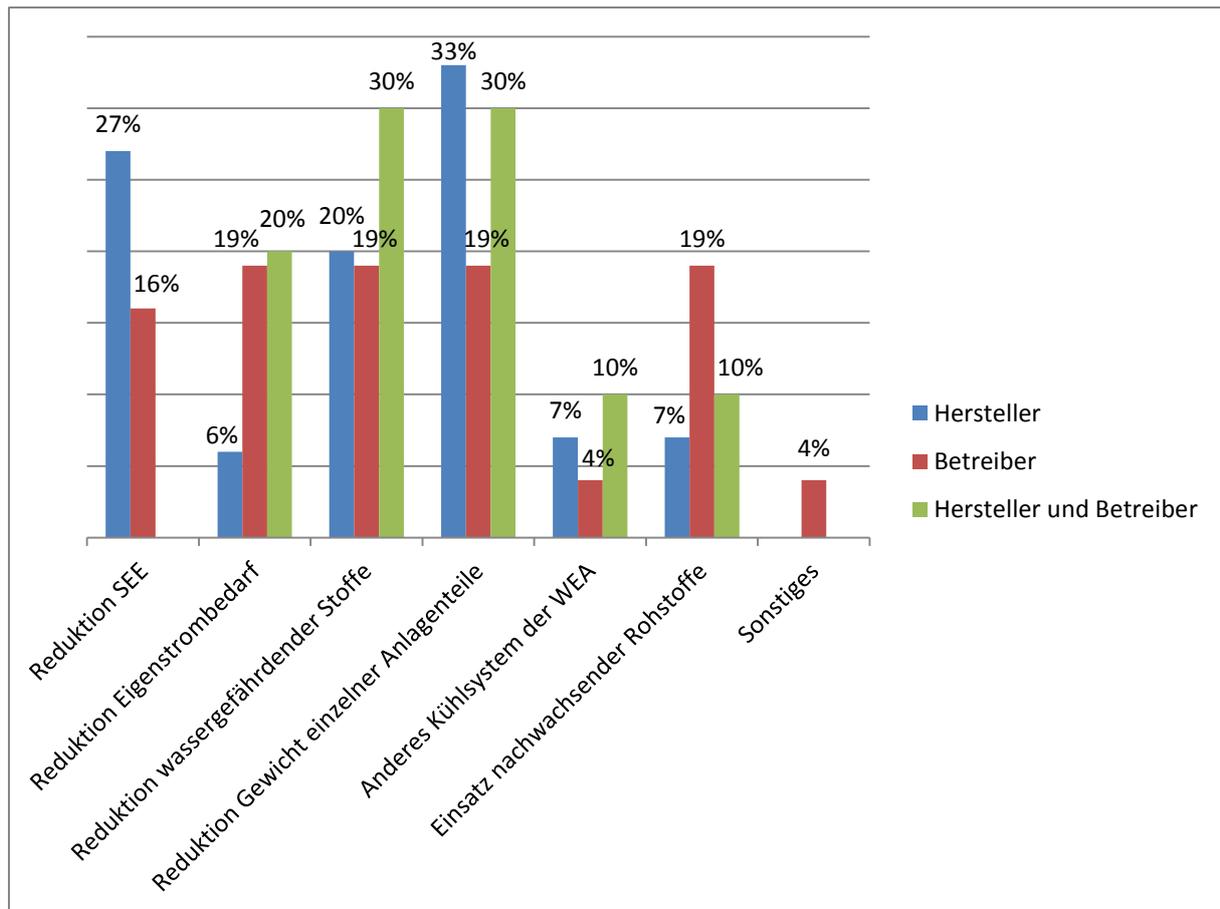


Abbildung 24: Bestehende Konzepte / Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA

33 % der Hersteller, die über o. g. Konzepte oder Projekte verfügen, haben solche zur Reduktion des Gewichts einzelner Anlagenteile – wie beispielsweise durch Design-Optimierung und Verwendung von Holz für den Turm der WEA –, 27 % zur Reduktion von SEE, 20 % zur Reduktion von wassergefährdenden Stoffen. Jeweils 7 % haben Konzepte oder Projekte zur Entwicklung eines anderen Kühlsystems oder zum Einsatz nachwachsender Rohstoffe – wie beispielsweise durch die Verwendung von Holz im Turmbau. Zur Reduktion des Eigenstrombedarfs haben außerdem 6 % derartige Konzepte oder Projekte.

Bei den Betreibern hingegen bestehen in 20 % der Unternehmen Konzepte oder Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA und in 57 % nicht. 23 % gaben keine Auskunft.

19 % der befragten Betreiber verfügen über Konzepte oder Projekte zur Reduktion des Gewichts einzelner Anlagenteile, ebenfalls 19 % zur Reduktion von wassergefährdenden Stoffen und weitere 19 % zur Reduktion des Eigenstrombedarfs. Weitere 19 % entfielen bei den Betreibern auf Projekte oder Konzepte zum Einsatz nachwachsender Rohstoffe, wie bei-

spielsweise Holz als Turmbaumaterial. In 16 % der Betreiberunternehmen gibt es Konzepte oder Projekte zur Reduktion von SEE und in 4 % zur Entwicklung eines anderen Kühlsystems. Die restlichen 4 % entfallen auf „Sonstige“ mit Nennung biologisch abbaubaren Getriebeöls. Alle befragten Hersteller-Betreiberunternehmen verfügen über Konzepte oder leiten Projekte zur Produktion von ökologisch nachhaltigeren WEA.

30 % der befragten Hersteller-Betreiberunternehmen gaben an, Konzepte oder Projekte zur Reduktion des Gewichts einzelner Anlagenteile, weitere 30 % zur Reduktion von wassergefährdenden Stoffen, 20 % zur Reduktion des Eigenstrombedarfs, 10 % zur Entwicklung eines anderen Kühlsystems und 10 % für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen.

Frage 12: Investiert Ihr Unternehmen in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA?

67 % der Hersteller, 88 % der Betreiber (9 % ohne Angabe) und 67 % der Hersteller-Betreiberunternehmen investieren nicht in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA.

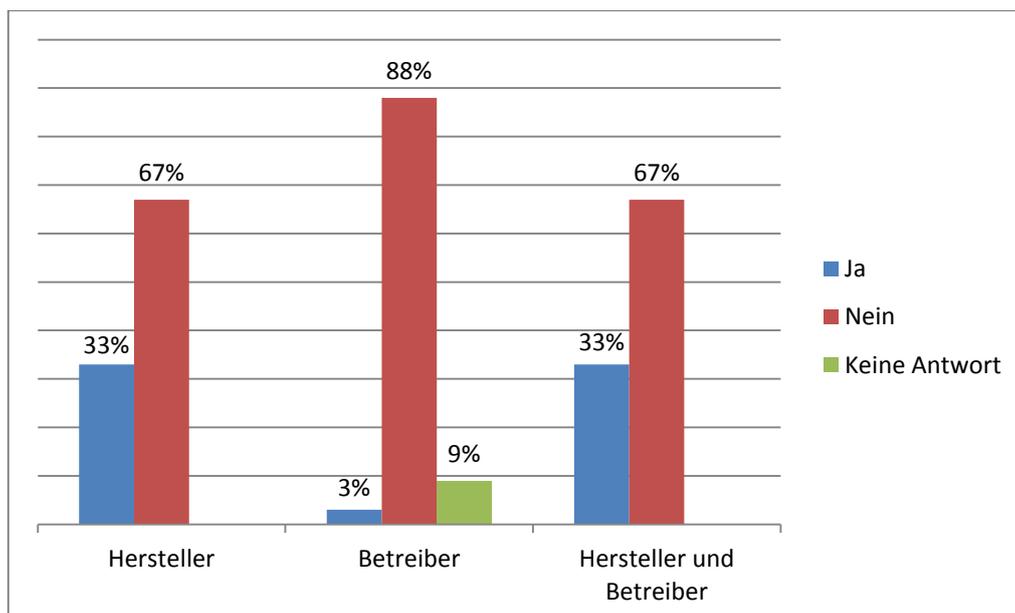


Abbildung 25: Investition in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA

Sofern die Unternehmen in Forschung und Entwicklung investieren, dann in folgende Bereiche:

- Werkstoffforschung, zum Beispiel für Magnete, Recycling von Rotorblattmaterial
- Wiederverwertung von Holz im Wohnungsbau

Derzeit überwiegt jedoch die Tatsache, dass größtenteils in den Unternehmen keine Investitionen in Forschung und Entwicklung von Recycling-Konzepten von WEA gemacht werden. Dies ist wahrscheinlich damit zu begründen, dass zurzeit der Verkauf der Alt-WEA als komplette Anlage ins Ausland eine rentable Lösung für die Unternehmen ist und somit noch kein Bedarf für eine vollwertige Verwertung der WEA besteht.

Frage 13: Wird recyceltes Material für den Bau Ihrer WEA verwendet?

In 67 % der Herstellerunternehmen wird recyceltes Material für den Bau von WEA verwendet, in 16 % nicht und 17 % gaben keine Auskunft.

Bei 46 % der Betreiberunternehmen wird kein recyceltes Material für den Bau von WEA verwendet, in 26 % schon und 28 % gaben keine Auskunft.

67 % der Hersteller-Betreiberunternehmen verwenden recyceltes Material für den Bau von WEA und 33 % nicht.

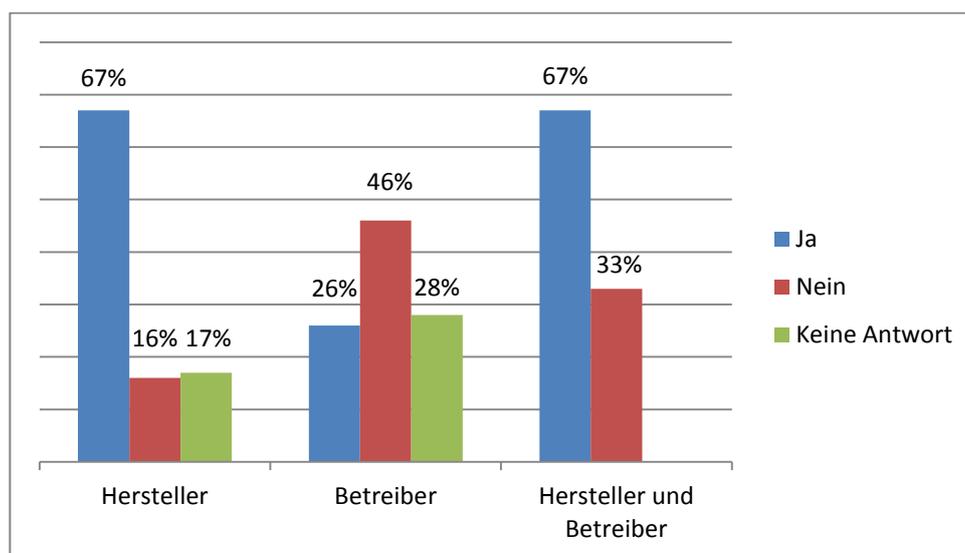


Abbildung 26: Verwendung von recyceltem Material für Bau von WEA

Die Unternehmen, die recyceltes Material für den Bau von WEA verwenden, nutzen u. a. folgende Materialien:

- Stahl, Kupfer, Eisen und Aluminium (indirekt über Wertstoffkreisläufe)
- Recycling-Schotter und -Beton (für Wege und Kranstellflächen)

An den Antworten auf Frage 13 ist zu erkennen, dass Hersteller- sowie Hersteller-Betreiberunternehmen größtenteils recyceltes Material für den Bau von WEA verwenden.

Frage 14: Haben Sie Interesse an den Ergebnissen der Umfrage?

89 % der befragten Unternehmen zeigten Interesse in Bezug auf Aushändigung der Umfrageergebnisse, 9 % haben kein Interesse und 2 % gaben keine Antwort.

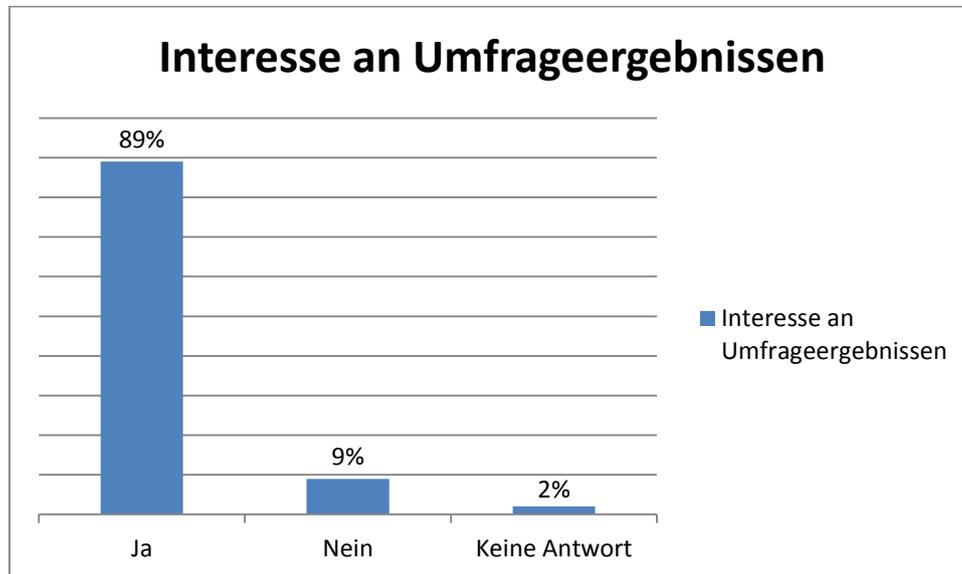


Abbildung 27: Interesse an Umfrageergebnissen

## C Interview bei juwi AG



04.05.2015

mit

Herrn Carsten Hoch, Diplom-Kaufmann

(Vertretung für Herrn Sebastiani)

### **Carsten Hoch**

#### **Kaufmännischer Projektmanager Repowering bei *juwi AG***

Carsten Hoch absolvierte das Studium der Wirtschaftswissenschaften an der Universität Mainz und erhielt den Abschluss als Diplom-Kaufmann. Er war unter anderem bei Automobilherstellern, Banken und als Unternehmensberater bei einer Münchner Unternehmensberatung beschäftigt. Seit dem Jahr 2011 ist er als Projektmanager Repowering bei der Firma *juwi* tätig. Das Unternehmen gehört zu den führenden Projektentwicklern im Bereich der erneuerbaren Energien und hat seit 1996 mehr als 640 WEA an über 100 Standorten realisiert. Das erste Repowering-Projekt wurde von *juwi* bereits vor zehn Jahren durchgeführt, wobei sich das Unternehmen als einer der Marktführer im Bereich Repowering etablierte. Die Repowering-Projekte von *juwi* haben die Nennleistung der Anlagen im Durchschnitt vervierfacht. Der Stromertrag mit gleicher Anlagenanzahl wurde außerdem gesteigert. Herr Hoch ist für die Durchführung von Repoweringprojekten über den gesamten Projektlebenszyklus verantwortlich. Zu diesem gehören die Standortanalyse, die Ansprache von Altanlagenbetreibern, die Vertragsgestaltung und -verhandlung sowie die Koordination des Abbaus und der Verkauf der Altanlage. (Bundesverband WindEnergie e.V., 2015)

**Interviewstart um 14 Uhr in Wörrstadt, anwesend waren:**

Carsten Hoch (*juwi*)

Tina Pavelt (*HLUG*)

Jens Wieberneit (*HLUG*)

**1.**

**In dem „Fragebogen zum Rückbau und zur Verwertung von Windenergieanlagen“ hat Herr Sebastiani auf Frage 2 „Existieren in Ihrem Unternehmen Konzepte oder Ansätze zum Rückbau von Windenergieanlagen?“ mit „Ja“ geantwortet.**

**Welche Konzepte sind das?**

**A:**

Es handelt sich um verschiedene „Repowering-Konzepte“. Beim Repowering werden an schon bestehenden Anlagenstandorten eine oder mehrere Bestandsanlagen durch neue Windenergieanlagen ersetzt. Das Ziel ist es, die für den jeweiligen Standort am besten geeigneten Anlagen auf Basis des neuesten Stands der Technik zu errichten und somit eine Verdoppelung beziehungsweise sogar Vervielfachung der Nennleistung zu erreichen.

Bsp. 600 kW (Enercon E-40 6.44) auf 3000 kW (Enercon E-101)

Jedes Repowering-Konzept wird individuell mit dem Betreiber zusammen erarbeitet.

Aber es gibt Infomaterial (Beschreibung eines Repowering-Konzepts) für den Betreiber im Vorfeld, die kann ich Ihnen gerne zukommen lassen.

**2.**

**Bei Frage 4 „Was passiert nach Ablauf der Einsatzzeit der Windenergieanlagen“ antwortete Herr Sebastiani Folgendes:**

- **Rückbau und Verkauf der Windenergieanlagen**
- **Rückbau und Verwertung der Windenergieanlagen (Bsp. therm.- Verwertung)**
- **Rückbau und Wiederverwendung der Windenergieanlagen**
- **Repowering der Windenergieanlagen**

**Wie hoch ist der prozentuale Anteil der jeweiligen Antworten?**

**A:**

Diese Frage ist für mich nur in puncto Repowering zu beantworten, da wir bisher nur Windenergieanlagen mit dem Ziel des Repowerings abgebaut haben. Ich kann dazu sagen, dass wenn die Anlage rückgebaut ist, wir bisher circa 80-90 % der Alt-WEA als komplette Anlage ins Ausland verkauft haben. Mit dem reinen Rückbau ohne Repowering haben wir in unserer Abteilung wenig bis gar nichts zu tun. Dazu haben wir andere Abteilungen im Haus.

**3.**

**Wie viele WEA hat juwi bis jetzt rückgebaut / repowert?**

**A:**

Über „100“ alte WEA wurden abgebaut und durch neue WEA ersetzt. Viele alte WEA wurden ins Ausland verkauft (alle WEA hatten einen Stahlurm).

**4.**

**Wie lange dauert Erfahrungsgemäß ein Rückbau / Repowering-Projekt? (Projektstart – Projektende)**

**A:**

Diese Frage ist pauschal nicht zu beantworten, da jedes Projekt individuell ist.

Wenn „repowert“ wird, muss ein komplett neues Genehmigungsverfahren eingeleitet werden, so als wenn an diesem Standort nie eine WEA gestanden hätte. Aber um eine Dauer zu nennen, würde ich sagen ungefähr 1-3 Jahre. Es ist durchaus möglich, dass es länger dauern kann. Die eigentliche Durchführung des Abbaus dauert zum Beispiel nur ungefähr 2-3 Wochen plus die Zeit für die Planung und den Erhalt aller notwendigen Genehmigungen.

**Zwischenfrage: Übernehmen Sie nach dem Abbau dann auch wieder den Aufbau im Ausland?**

**A:**

Wir haben auch schon das anschließende Projekt des Aufbaus im Ausland übernommen, aber das passiert eher selten.

5.

**Auf Frage 8 „Wenn Verkauf der Windenergieanlage, dann ...“ lautete Herr Sebastianis**

**Antwort:**

- Verkauf der kompletten Anlage
- Verkauf von Anlageteilen

**Wie hoch ist der prozentuale Anteil der jeweiligen Antworten?**

**A:**

Ungefähr 75-80 % bei dem Verkauf der kompletten Anlage und 20-25 % werden als Einzelkomponenten weiterverkauft.

6.

**In welche Länder werden die „kompletten Anlagen“ oder „Anlagenteile“ verkauft?**

**A:**

Wir haben Anfragen aus der ganzen Welt, wie zum Beispiel aus Asien, Afrika und Amerika usw. Da stellt sich aber die Frage der Logistik und Wirtschaftlichkeit. Größtenteils werden die Alt-WEA nach Osteuropa wie zum Beispiel Polen, Bulgarien, Rumänien, Russland, die Ukraine und Weißrussland usw. verkauft.

7.

**Wie sehen Sie die aktuelle Situation mit dem Verkauf von WEA ins Ausland und wie lange wird dieser Markt noch bestehen?**

**A:**

Derzeit erleben wir sogar eine leichte Delle im Inland, durch den Wegfall des Repowering-Bonus. Durch die Novellierung des EEG mit dem Eintritt am 01.08.2014 (Übergangsfrist 31.12.2014) im Bereich der Windenergie, entfällt der Repowering-Bonus und das ist für uns spürbar. Was wir aktuell auch merken, ist, dass im näheren Ausland die Rückfrage nicht mehr so groß ist, da der Sekundärmarkt teilweise gesättigt ist und die geänderte lokale Gesetzgebung den Zubau von gebrauchten Windenergieanlagen teilweise blockiert.

Der bis jetzt umsatzstärkste Markt in Polen wird durch aktuelle Gesetzgebungen immer schwieriger zugänglich. Durch eine Novellierung in diesem Jahr wird auf Anlagen, die älter als 5 Jahre sind, keine oder eine niedrige Einspeisungsvergütung gezahlt.

Derzeit haben wir eine gestiegene Nachfrage aus entfernteren Ländern wie Weißrussland, Litauen und Lettland. Aber auch da ist die Frage der Logistik und Wirtschaftlichkeit nicht zu vernachlässigen.

**8.**

**Gibt es bevorzugte WEA-Modelle beim Käufer? Wenn ja, welche?**

**A:**

Die Anfrage ist meistens standortbezogen, da nicht jede WEA überall errichtet und in Betrieb genommen werden kann. An der Nordsee weht ein anderer Wind als im Binnenland. Weitere Kaufkriterien sind, ob ein Pitchsystem (flexible Steuerung der Rotorblätter) verbaut ist und ob das Modell getriebelos ist. Denn wer eine Alt-WEA mit Getriebe kauft muss ggf. höhere Reparaturrücklagen bilden. Getriebelose Enercon-WEA waren zum Beispiel in der Vergangenheit gefragt.

**9.**

**Auf Frage 10 „Werden bestimmte Anlagenteile der Windenergieanlage wiederverwertet“ antwortete Herr Sebastiani mit: „Ja“ – Rotorblattverwertung**

**Wie wird das Rotorblatt genau verwertet und welches Unternehmen übernimmt das Pyrolyseverfahren?**

**A:**

Wir arbeiten mit Subunternehmen zusammen. Ich kann Ihnen gerne Kontaktdaten für weitere Rückfragen übersenden.

**10.**

**Welchen Stellenwert wird in Zukunft das Pyrolyseverfahren einnehmen?**

**A:**

siehe Frage 9

**11.**

**Welche Verfahren zum Recyceln einer WEA sind Ihrer Meinung nach am wichtigsten?**

**A:**

siehe Frage 9

**12.**

**Wo sehen Sie die Problematik, bei der Verwertung einer Windenergieanlage?**

**A:**

siehe Frage 9

**13.**

**Was kostet in etwa der durchschnittliche Rückbau einer Windenergieanlage?**

**A:**

Hier ist die Antwort wieder abhängig von der Größe und dem Standort der WEA. Wenn man von einer durchschnittlichen WEA ausgeht, d. h. 600 kW – 1000 kW mit einer Nabenhöhe von ungefähr 65 m, belaufen sich die Rückbaukosten circa zwischen 40.000 € – 70.000 € ohne Fundament, dafür kommen circa 20.000 € – 40.000 € hinzu (Angaben abhängig von der WEA-Leistungsklasse).

**Zwischenfrage: Warum werden die Rückbaukosten zwischen der WEA und dem dazugehörigen Fundament separat betrachtet?**

**A:**

Weil häufig verschiedene Unternehmen die Arbeiten durchführen, d. h. wenn die Anlage wieder errichtet werden kann, beauftragt des Öfteren der Käufer der Anlage das Abbaununternehmen.

**14.**

**Welche Kosten verursachen die einzelnen Anlagenteile?**

**A:**

Auch hier kann man keine pauschale Antwort geben. Sie können grob mit folgenden Werten rechnen:

Rotor: circa 2.500 € - 5.000€ pro Rotorblatt

Gondel: circa 5.000 €

Turm: Beim Stahlturm abhängig von dem aktuellen Stahlpreis, mit Betontürmen habe ich leider noch keine Erfahrung gemacht.

15.

**Wie wird die Branche der WEA Ihrer Meinung nach in der Zukunft aussehen? (Repowering / Rückbau / Recycling)**

**A:**

Repowering ist ein Markt der Zukunft. Der Strom in Deutschland wird aktuell erst zu 25 % aus erneuerbaren Energien erzeugt. Für die Erreichung der Klimaschutzziele ist eine 100 % emissionsfreie Stromerzeugung notwendig. Dieser wachsende Stromerzeugungsbedarf kann durch das Repowering ohne eine Erhöhung der Anlagenanzahl erfolgen. Leider werden durch die Änderung des EEG die Repowering-Aktivitäten gebremst, aber wir arbeiten weiter durch eine erfolgreiche Projektumsetzung daran, dass das Thema weiter vorangetrieben wird. Das Thema des Recyclings ist ein wichtiger Punkt und es ist abzuwarten, was sich in der Zukunft für Märkte erschließen lassen.

**Zwischenfrage: Würden Sie es für sinnvoll halten, wenn von der Bundesregierung finanzielle Anreize in puncto Recycling der WEA geschaffen werden würde?**

**A:**

Es wäre sinnvoll Konzepte zu entwickeln, die das Repowering unterstützen. So existieren bereits in verschiedenen Bundesländer Konzepte und Ideen, um über das Planungs- und Genehmigungsrecht Anreize zum Repowering zu setzen, zum Beispiel indem vorgegeben wird, dass in bestimmten Gebieten nur neue Anlagen errichtet werden dürfen wenn sich die Anlagenanzahl halbiert.

**Zwischenfrage: Wie sehen Sie diese Problematik bezogen auf Hessen bezogen, da Hessen ja leider bei der Windenergieplanung etwas hinterher ist?**

**A:**

Hessen hat an für sich ein klares Konzept hinsichtlich des Zubaus von WEA. Der Zubau von WEA ist nur innerhalb von ausgewiesenen Vorranggebieten zur Windenergienutzung möglich. Leider gibt es keine planungsrechtlichen Anreize für das Repowering. Die konkrete Umsetzung von Projekten ist abhängig von den zuständigen Behörden und den Bürgern vor Ort. Hier gibt es positive Tendenzen zur Unterstützung der Energiewende, leider ist dieses Bewusstsein noch nicht in allen Regionen gleichstark vorhanden.

**16.**

**Welche Eckpunkte enthält Ihr Seminar „Weiterbetrieb Windkraftanlagen und Repowering“ beim BWE?**

**A:**

Herr Sebastiani und ich halten abwechselnd dieses Seminar und wir beleuchten die Möglichkeiten des Repowering aus Betreibersicht ausführlich. Der Bereich des Weiterbetriebs wird ergänzt durch andere Referenten. Gerne kann ich Ihnen die Seminarunterlagen zukommen lassen.

## Danksagung

*„Der Mann, der den Wind der Veränderung spürt, sollte keinen Windschutz, sondern eine Windmühle bauen“ (Chinesische Weisheit)*

Ein riesiges Dankeschön geht an meine betreuende Referentin Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrike Stadtmüller und die beiden Korreferenten Dipl.-Ing. (FH) Volker Kummer und Prof. Dr. Thomas Schmid, die mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Abschlussarbeit im *Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie* schreiben zu dürfen und mich dabei bestens unterstützt haben. Diese Abschlussarbeit vereint die für mich im Studium wichtigsten Kernpunkte „Nachhaltigkeit“ und „erneuerbare Energien“. Das Studium an der Hochschule RheinMain hat mich in meiner persönlichen Reifung maßgeblich beeinflusst. Auch bei meiner Familie und meiner Freundin möchte ich mich sehr für die konsequente Unterstützung und den liebevollen Rückhalt bedanken. Durch das Studium habe ich auch neue Freunde fürs Leben gefunden, für die ich sehr dankbar bin – es war eine tolle Zeit und ich möchte diese nicht missen.

Das Erstellen dieser Abschlussarbeit wäre ohne die Unterstützung von netten und kooperativen Menschen so nicht möglich gewesen. Deshalb auch hier ein riesiges Dankeschön an: Frau Pavelt und Frau Wolf aus dem *Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie*, Frau Seiler vom *Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Umwelt-Engineering Pfinztal bei Karlsruhe*, Herrn Dr. Seifert vom *Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)*, Herrn Hoch und Herrn Sebastiani von *juwi AG*, Herrn Rewald von *Enercon*, Herr Buschhaus und Herrn Bampilis von *Nordex*, Herrn Ufermann von *Vestas*, Herrn Noak und Herrn Gumior von *Siemens*, Herrn Niedan von *Senvion* sowie allen befragten WEA-Unternehmen.

Ich hoffe, dass sich im Bereich der erneuerbaren Energien und der damit verbundenen Verwertung von Materialien in Zukunft weitere Fortschritte ergeben und ich zudem mit der vorliegenden Arbeit einen kleinen Teil dazu beitragen kann.