

TEXTE

117/2019

Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen

Abschlussbericht

TEXTE 117/2019

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 31 330 0

FB000153

Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen

Abschlussbericht

von

Ferdinand Zotz, Ramboll

Maximilian Kling, Ramboll

Florian Langner, Ramboll

Dr. Philipp Hohrath, Ramboll

Dr. Hartmut Born, Ramboll

Dr.-Ing. Alexander Feil, RWTH Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Ramboll Environment & Health GmbH
Werinherstraße 79, Gebäude 32a
81541 München

Abschlussdatum:

Juli 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Produktverantwortung
Dr. Petra Weißhaupt

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen

Der Windenergieanlagenbestand von ca. 28.000 Anlagen im Jahr 2018 ist eine wichtige Säule der Energiewende. Im deutschlandweiten Durchschnitt gewährleistet die Windenergiebranche inzwischen rund 17 % der Stromversorgung, und der weitere Ausbau ist aus ökologischen und ökonomischen Gründen ein wichtiges strategisches Ziel. Die Branche ist nach wie vor innovativ und nach einem fast dreißigjährigen Technologiewandel stehen nun auch technische und organisatorische Herausforderungen des Rückbaus von Altanlagen bevor. Die Notwendigkeit des Rückbaus, Recyclings und Repowerings wird in den nächsten Jahren deutlich steigen. Vor diesem Hintergrund werden rechtliche Rahmenbedingungen für einen Rückbau erörtert, die vorhandenen Techniken sowie der Entwicklungsbedarf dargelegt und ein Konzept der Organisationsverantwortung entwickelt. Um dabei der Vielfalt der Anlagenmodelle und Standorte gerecht zu werden, ist die enge Kooperation mit Herstellern zweckmäßig. Die konzeptionelle Herausforderung besteht in einer großen technologischen Diversität, so dass nicht ein einziges Rückbaukonzept, welches schematisch in sämtlichen Fällen angewendet wird, entwickelt werden konnte. Vielmehr wurden Maßnahmen empfohlen, welche einerseits den hohen ökologischen Standard der Branche sichern und andererseits weitgehend technologieoffen Entwicklungsmöglichkeiten bieten. Diese Empfehlungen bestehen in der Entwicklung von zwischen Bund und Ländern abgestimmten Leitlinien, Anregungen für die Standardisierung und in der Prüfung von Elementen der Produktverantwortung für die Verwertung von ausgedienten Rotorblättern. Zudem verdeutlicht die Studie, dass die Rückstellungsleistungen, welche im Rahmen der Anlagengenehmigung für den Rückbau erbracht werden, voraussichtlich nicht die vollen Kosten des Rückbaus und Recyclings decken werden. Dieser Umstand ist für Betreiber von Bedeutung und könnte als Anlass für eine Prüfung und Überarbeitung der Berechnungsgrundlagen verstanden werden. Die Studie fasst somit Rahmenbedingungen zusammen und bietet Orientierung für die mit dem Rückbau und Recycling betrauten Betreiber, Unternehmen sowie die überwachenden Behörden.

Abstract: Title

The wind turbine inventory of approx. 28,000 turbines in 2018 is an important pillar of the German energy transition. On average, the German wind energy sector provides around 17 % of the electricity supply, and the further expansion is an important strategic goal for ecological and economic reasons. The industry continues to be innovative and, after almost thirty years of technological development, the technical and organizational challenges of dismantling old plants are now also on the agenda. The need for dismantling, recycling and repowering will increase significantly in the upcoming years. Against this background, legal framework conditions for deconstruction will be discussed, existing technologies and development requirements presented, and a concept of organizational responsibility developed. To address the diversity of the plant models and locations a close cooperation with manufacturers is advisable. The conceptual challenge arises from the large technological diversity. Thus, it was not possible to develop a single dismantling concept, which can be applied schematically in all cases. Moreover, measures were recommended which ensure the high ecological standard of the industry but also offer largely technologically open development opportunities. These recommendations consist of the development of guidelines agreed between the federal government and the regional states, suggestions for standardization and the examination of elements of product responsibility for the recycling of discarded rotor blades. In addition, the study emphasizes that the provision payments made in the context of the plant license for dismantling are unlikely to cover the full costs of dismantling and recycling. This circumstance is important for operators and could be considered as a reason for reviewing and revising the calculation bases. Therefore, this study summarizes the framework conditions and provides guidance for the operators, companies and supervisory authorities responsible for decommissioning and recycling.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Gesetzesverzeichnis.....	18
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	35
1 Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens	48
1.1 Hintergrund	48
1.2 Zielsetzung.....	49
2 Status quo des Rückbaus und der Entsorgung	51
2.1 Rechtliche Vorgaben für Rückbau und Entsorgung von WEA.....	51
2.1.1 Zwei anwendbare Genehmigungsrechtsregimes für WEA: Baurecht und Immissionschutzrecht.....	51
2.1.2 Relevante Umweltpflichten im Bereich Rückbau sowie deren behördliche Überwachung und Durchsetzung	52
2.1.3 Relevante Umweltpflichten im Bereich Entsorgung der entstehenden Abfälle und deren behördliche Überwachung.....	55
2.1.4 Fragen der Durchsetzung – insbesondere: „Flucht in die Insolvenz“	57
2.2 Technische Praxis von Rückbau und Entsorgung	61
2.2.1 Aktuelle Praxis des Rückbaus	61
2.2.2 Aktuelle Praxis der Entsorgung und resultierende Stoffströme	73
2.2.3 Aktuelle Praxis Rücklagen und Rückbaukosten.....	85
2.2.4 Aktuelle Praxis Ausweichreaktionen und unzulässige Praktiken.....	89
2.3 Umweltfachliche Bewertung der Praxis und Aufzeigen von Problemen	92
2.3.1 Wiederherstellung des ursprünglichen Flächenzustandes	93
2.3.2 Bestimmung der Emissionen.....	94
2.3.3 Bestimmung der Flurschäden und Bodenverdichtungen	94
2.3.4 Recycling von Anlagenbestandteilen und kritische Abfallströme.....	95
2.4 Zwischenfazit zum Status quo des Rückbaus und der Entsorgung von WEA.....	96
3 Abfall- und Kostenprognose für den Zeitraum bis 2040	99
3.1 Materialzusammensetzung der WEA und übliche Lebensdauern	99
3.1.1 Einteilung der in Deutschland errichteten WEA in Cluster	100
3.1.2 Lebensdauer / Betriebsphase einer Onshore-WEA	110
3.2 Marktentwicklung und -wachstum für WEA.....	112
3.2.1 Vorstellung der Szenarien der Marktentwicklung	112

3.2.2	Vorgehen Marktprognose.....	115
3.2.3	Top-down-Prognose.....	116
3.2.4	Bestimmung und Fortschreibung prognoserelevante WEA-Cluster.....	117
3.2.5	Bottom-up-Prognose.....	119
3.3	Abfallprognose auf Grundlage der Materialanalyse	123
3.3.1	Abfälle aus dem Rückbau von WEA am Ende des Lebenszyklus.....	124
3.3.2	Abfälle aus der Betriebsphase	136
3.4	Prognose über Erlöse und Kosten anknüpfend an Status quo und Abfallprognose	139
3.4.1	Abschätzung der gebildeten Sicherheitsleistungen (Rückstellungen) für den Rückbau.	139
3.4.2	Kosten und Rückstellungen je Anlage zum Prognosezeitpunkt.....	140
3.4.3	Kosten und Rückstellung im Zeitverlauf.....	148
4	Anforderungen an den Rückbau.....	152
4.1	Notwendigkeit von Standards für den Rückbauprozess	152
4.1.1	Aspekte zur Ausgestaltung eines Standards zum Rückbau.....	152
4.1.2	Empfehlungen zur Schaffung eines Standards zum Rückbau einer WEA	153
4.2	Stärkere Einbindung von Behörden	156
4.3	Weitere Ziele für den nachhaltigen Rückbau einer WEA.....	156
4.3.1	Nutzung von Synergien im Rahmen von Onshore-Maßnahmen	156
5	Anforderungen an die Entsorgung	158
5.1	Verwertungsanforderungen.....	158
5.1.1	Rahmen der Verwertungsanforderungen.....	158
5.1.2	Getrennthaltung.....	158
5.1.3	Verwertungsanforderungen an WEA-relevante Baugruppen (Zusammenfassung)	159
5.1.4	Einzelne Stoffströme	160
5.2	Technologischer Status	164
5.2.1	Einzelne Stoffströme	165
5.3	Suboptimale Entsorgungswege.....	171
5.3.1	Einführung.....	171
5.3.2	Ausgewählte Stoffströme.....	171
5.4	Potentialverbesserung	172
5.4.1	Altbeton	172
5.4.2	Verbundwerkstoff: CFK	173
5.4.3	SEE	173
5.5	Recycling.....	174
6	Kostenprognose für Anforderungen an Rückbau und Entsorgung	176

6.1	Rückbau.....	176
6.2	Entsorgung.....	178
6.3	Finanzierung Rückbau und Entsorgung.....	179
7	Diskussion möglicher Maßnahmen zur organisatorischen und finanziellen Umsetzung.....	181
7.1	Einführung und Hintergrund zu möglichen politischen Maßnahmen.....	181
7.1.1	Reichweite möglicher Maßnahmen.....	181
7.1.2	Überblick möglicher Instrumententypen und Maßnahmen.....	182
7.2	Regelungsbedarf bei Rückbau und Entsorgung von WEA.....	183
7.2.1	Regelungsbedarf für den Rückbau von WEA.....	183
7.2.2	Regelungsbedarf für die Entsorgung von WEA.....	184
7.3	Diskussion möglicher Maßnahmen für bestehende WEA.....	184
7.3.1	Rückbau.....	184
7.3.2	Entsorgung und Verwertung.....	190
7.4	Diskussion möglicher Maßnahmen für zukünftige WEA.....	191
7.4.1	Rückbau.....	191
7.4.2	Entsorgung und Verwertung.....	192
7.5	Sonstige Maßnahmen.....	197
8	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	198
8.1	Schaffung von Leitlinien für den Rückbau und die Verwertung von WEA.....	198
8.2	Schaffung technischer Standards für bestimmte Rückbau- und Entsorgungstätigkeiten ..	199
8.3	Prüfung der Einführung spezifischer Elemente einer Produktverantwortung für Rotorblätter 200	
8.4	Optimierungsbedarf bei der Bewirtschaftung spezifischer Abfallströme.....	201
8.5	Wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierungsbedarf.....	201
9	Anlagen.....	203
A	Gesprächsleitfaden für Telefoninterviews (Kapitel 2).....	204
B	Hintergrundinformation und Annahmen für die Darstellung der Rückbauprognose in Kapitel 2208	
B.1	Komponenten einer WEA sowie verwendete Materialien.....	208
B.1.1	Rotorblatt.....	209
B.1.2	Rotornabe.....	211
B.1.3	Gondel (Gehäuse).....	213
B.1.4	Gondel (Antriebsstrang).....	213
B.1.5	Turm.....	215
B.1.6	Fundament.....	217
B.1.7	Elektrogeräte, Elektronik, IT Ausstattung.....	218

B.1.8	Kranstellflächen	218
B.1.9	Sonstiges – SF ₆	218
B.1.10	Sonstiges – Schmier- & Kühlmittel.....	219
B.1.11	Sonstiges – Batterien & Akkus	219
B.1.12	Sonstiges – Lacke & Beschichtungen	220
B.2	Lebensdauer einer Windenergieanlage	220
C	Beschreibung der Datengrundlage für Kapitel 3	222
C.1	Die „WP-Deutschland“ Datenbank	222
C.2	Datenaufbereitung.....	224
C.3	Auswertungen zum bestehenden deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestand.....	225
D	Verteilung der Rotordurchmesser und der Nennleistung innerhalb der WEA-Cluster aus Kapitel 5.1	230
E	Verteilung der Nabelhöhen je Turm-Cluster aus Kapitel 5.1	234
F	Beschreibung der Rechenmodells zur Abschätzung der Rückbaukosten aus Kapitel 5.4	236
F.1	Vorbereitungsarbeiten.....	236
F.2	Demontage der WEA inkl. Turm.....	237
F.3	Demontage der Fundamente.....	238
F.4	Entsorgung der Materialien	239
G	Vereinfachtes Ablaufdiagramm zu den Verwertungswegen von Bauteilen einer WEA	241
H	Anforderungen an den Rückbau von Windenergieanlagen und Normen, welche gemäß Kapitel 7 angewendet oder auf Anpassung an den Rückbau geprüft werden sollten	243
10	Literaturverzeichnis	249

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der Windenergieanlagen inkl. Altersstruktur in Deutschland	48
Abbildung 2:	Darstellung eines Hauptkrans in Gelb und eines Hilfskrans in Rot.....	63
Abbildung 3:	Demontage des Rotorsterns am Boden	64
Abbildung 4:	Rückbau der Gondel	67
Abbildung 5:	Zerlegung einer Turmsektion	68
Abbildung 6:	Gegen Wegrollen gesicherte Turmsektion.....	69
Abbildung 7:	Fundamentrückbau mittels Bagger	73
Abbildung 8:	Grafische Veranschaulichung der genutzten Cluster-Methodik	101
Abbildung 9:	Anzahl der WEA je WEA-Cluster und Jahr der Inbetriebnahme	104
Abbildung 10:	Anzahl der WEA je Turm-Cluster und Jahr der Inbetriebnahme	105
Abbildung 11:	Entwicklung kumulierte Leistung in SZENARIO 1 und SZENARIO 2	112
Abbildung 12:	Jährliche Veränderung kumulierte Leistung in SZENARIO 1 und SZENARIO 2	114
Abbildung 13:	Entwicklung mittlere Leistung pro zugebauter Anlage	116
Abbildung 14:	Entwicklung WEA Bestand in SZENARIO 1 und SZENARIO 2	117
Abbildung 15:	Entwicklung WEA Bestand nach Clustern in SZENARIO 1.....	120
Abbildung 16:	Entwicklung WEA Bestand nach Clustern in SZENARIO 2.....	121
Abbildung 17:	Entwicklung kumulierte Leistung nach Clustern in SZENARIO 1	122
Abbildung 18:	Entwicklung kumulierte Leistung nach Clustern in SZENARIO 2	123
Abbildung 19:	Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus GFK (SZENARIO 1)	125
Abbildung 20:	Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus CFK/GFK (SZENARIO 1)	125
Abbildung 21:	Abfallprognose – Stahl (SZENARIO 1)	126
Abbildung 22:	Abfallprognose – Kupfer (SZENARIO 1)	126
Abbildung 23:	Abfallprognose – Aluminium (SZENARIO 1).....	127
Abbildung 24:	Abfallprognose – Beton (SZENARIO 1).....	127
Abbildung 25:	Abfallprognose – Elektroschrott (SZENARIO 1)	128
Abbildung 26:	Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus GFK (SZENARIO 2)	130
Abbildung 27:	Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus CFK/GFK (SZENARIO 2)	130
Abbildung 28:	Abfallprognose – Stahl (SZENARIO 2)	131
Abbildung 29:	Abfallprognose – Kupfer (SZENARIO 2)	131
Abbildung 30:	Abfallprognose – Aluminium (SZENARIO 2).....	132
Abbildung 31:	Abfallprognose – Beton (SZENARIO 2).....	132
Abbildung 32:	Abfallprognose – Elektroschrott (SZENARIO 2)	133
Abbildung 33:	Prozentualer Anteil des “DD-PMSG” Generatorkonzepts bezogen auf die neu in Betrieb genommenen Kapazitäten gemäß Fraunhofer IEE (eigene Prognose für 2018 bis 2020).....	134
Abbildung 34:	Prozentualer Anteil des “PMSG” Generatorkonzepts bezogen auf die neu in Betrieb genommenen Kapazitäten gemäß Fraunhofer IEE (eigene Prognose für 2018 bis 2020).....	135
Abbildung 35:	Abfallprognose für SEE-haltige Magnete - SZENARIO 1	136
Abbildung 36:	Abfallprognose für SEE-haltige Magnete - SZENARIO 2	136

Abbildung 37:	Vergleich von Rückbau- und Entsorgungskosten gegenüber Rückstellungen Stahl-Turm-Cluster	147
Abbildung 38:	Vergleich von Rückbau- und Entsorgungskosten gegenüber Rückstellungen Hybrid-Turm-Cluster	147
Abbildung 39:	Jährlicher Vergleich Rückbau- und Entsorgungskosten zu Rückstellungen (SZENARIO 1)	150
Abbildung 40:	Jährlicher Vergleich Rückbau- und Entsorgungskosten zu Rückstellungen (SZENARIO 2)	150
Abbildung 41:	Fließschema Aufbereitung Beton	166
Abbildung 42:	Prozesskette Stahlschrott-Recycling.....	167
Abbildung 43:	GFK Abfälle vor (l.) und nach (r.) der Aufbereitung.....	170
Abbildung 44:	Hierarchieebenen unterschiedlicher Regelungen	183
Abbildung 45:	Rotorblattgewichte als Funktion der Rotorblattlänge.....	211
Abbildung 46:	Nabengewichte als Funktion der Nennleistung.....	212
Abbildung 47:	Stahlrohrturmgewichte [t] als Funktion der Nabenhöhe [m].....	216
Abbildung 48:	Darstellung der zwischen 1986 und 2017 in Betrieb genommenen WEA	225
Abbildung 49:	Darstellung der zwischen 1986 und 2017 in Betrieb genommenen Gesamtnennleistung.....	226
Abbildung 50:	Darstellung der mittleren Nennleistung für die neu errichteten WEA	226
Abbildung 51:	Darstellung des mittleren Rotordurchmessers für die neu errichteten WEA	227
Abbildung 52:	Darstellung der mittleren Nabenhöhe für die neu errichteten WEA	227
Abbildung 53:	Anteile der Antriebskonzepte (bezogen auf die Nennleistung der Neuinstallationen) als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme.....	228
Abbildung 54:	Anteile der Turmvarianten (bezogen auf die Nennleistung der Neuinstallationen) als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme.....	228
Abbildung 55:	Verteilung der WEA-Errichtungen je Region und als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme.....	229
Abbildung 56:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „KWEA“	230
Abbildung 57:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_01“	230
Abbildung 58:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_02“	230
Abbildung 59:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_03“	231
Abbildung 60:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_04“	231
Abbildung 61:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_05“	231
Abbildung 62:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_06“	232

Abbildung 63:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_01“	232
Abbildung 64:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_02“	232
Abbildung 65:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_03“	233
Abbildung 66:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_04“	233
Abbildung 67:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_05“	233
Abbildung 68:	Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_06“	234
Abbildung 69:	Verteilung der Nabhöhhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_01“ und „Stahl_02“	234
Abbildung 70:	Verteilung der Nabhöhhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_03“ und „Stahl_04“	234
Abbildung 71:	Verteilung der Nabhöhhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_05“ und „Hybrid_01“	235
Abbildung 72:	Verteilung der Nabhöhhen innerhalb der Turm-Cluster „Hybrid_02“ und „Hybrid_03“	235
Abbildung 73:	Verteilung der Nabhöhhen innerhalb der Turm-Cluster „Gitter_01“ und „Gitter“	235

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Beton"	74
Tabelle 2:	Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Eisenmetall"	74
Tabelle 3:	Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Nicht-Eisenmetall"	75
Tabelle 4:	Möglichkeiten der Verwertung von GFK Abfällen	77
Tabelle 5:	Möglichkeiten der Verwertung von CFK Abfällen	79
Tabelle 6:	Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Schotter"	83
Tabelle 7:	Beschreibung der verwendeten WEA-Cluster	103
Tabelle 8:	Beschreibung der verwendeten Turm-Cluster	104
Tabelle 9:	Materialmengen der WEA-Cluster.....	107
Tabelle 10:	Materialmengen der Turm-Cluster.....	109
Tabelle 11:	Brutto Zubau Szenario 1	112
Tabelle 12:	Brutto Zubau Szenario 2	114
Tabelle 13:	WEA Cluster (inklusive Fortschreibung)	118
Tabelle 14:	Abfallprognose für das SZENARIO 1	124
Tabelle 15:	Abfallprognose für das SZENARIO 2	129
Tabelle 16:	Entsorgungskosten und -erlöse der WEA- und Turm-Cluster.....	140
Tabelle 17:	Kosten für die Vorbereitung des Rückbaus von WEA- und Turm-Cluster.....	141
Tabelle 18:	Rückbaukosten der WEA- und Turm-Cluster.....	142
Tabelle 19:	Rückbau- / Entsorgungskosten gegen Rückstellungen nach Modell Hessen und BVerwG (TURM Cluster Gitter und Hybrid)	145
Tabelle 20:	Rückbau- / Entsorgungskosten gegen Rückstellungen nach Modell Hessen und BVerwG (TURM Cluster Stahl)	146
Tabelle 21:	Anteil WEA-/ Turm-Cluster Kombinationen am Bestand (Ende 2017).....	148
Tabelle 22:	Jahresweise kumulierte Abfallmengen, Kosten und Rückstellungen aus Anlagenbestand Deutschland (SZENARIO 1).....	149
Tabelle 23:	Jahresweise kumulierte Abfallmengen, Kosten und Rückstellungen aus Anlagenbestand Deutschland (SZENARIO 2).....	149
Tabelle 24:	Anforderungen für die Entsorgung von Komponenten aus WEA.....	159
Tabelle 25:	Anteil verschiedener Rückbau- und Entsorgungsschritten an den Gesamtkosten (ohne Berücksichtigung möglicher Erlöse) für alle WEA- / TURM-Cluster im Bestand mit 10 oder mehr Installationen.....	176
Tabelle 26:	Überblick Hilfestellungen ausgewählter Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaften (LAGA o.J.) (LAI o.J.) (LABO o.J.)	185
Tabelle 27:	Entwurf einer technischen Leitlinie zu technischen Anforderungen an den Rückbau (und Entsorgung) von WEA.....	186
Tabelle 28:	Vor- und Nachteile einer Konkretisierung der Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Windenergieanlagen	192
Tabelle 29:	Vor- und Nachteile einer Konkretisierung der Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Komponenten einer Windenergieanlage.....	194
Tabelle 30:	Zusammenfassung möglicher Maßnahmen	198

Tabelle 31:	Stoffliche Zusammensetzung von Rotorblättern.....	209
Tabelle 32:	Rotorzusammensetzung einer Gamesa G90-2.0	210
Tabelle 33:	Stoffliche Zusammensetzung der Gondel einer Gamesa G90-2.0.....	213
Tabelle 34:	Vergleich der “WP-Deutschland” Datenbank mit der Veröffentlichung der Fa. Deutsche-WindGuard (DWG)	223
Tabelle 35:	Anforderungen an den Rückbau von Windenergieanlagen und Normen, welche gemäß Kapitel 7 angewendet oder auf Anpassung an den Rückbau geprüft werden sollten	243

Abkürzungsverzeichnis

4. BImSchV	Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
17. BImSchV	Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
AltfahrzeugV	Altfahrzeug-Verordnung
AltöIV	Altöl-Verordnung
ArbMedVV	Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge
BattG	Batteriegelgesetz
BauGB	Baugesetzbuch
BaustellV	Baustellenverordnung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
BVerwGE	Entscheidungssammlung Bundesverwaltungsgericht
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
ChemKlimSchutzV	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
DD	Direct Drive
DD-PPMSG	Eigenerregter Direct-Drive Synchrongenerator
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWG	DeutscheWindGuard
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
ExPROG	Oberer Prognosekorridor
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GFRP	Glas fiber reinforced polymer

GmbHG	Gesetz betreffend die Gesellschaften mit beschränkter Haftung
GH	Gesamthöhe
GWP	Global Warming Potential
HGB	Handelsgesetzbuch
InsO	Insolvenzordnung
ISET/IWES	Institut für Solare Energieversorgungstechnik
IWET	Ingenieurwerkstatt Energietechnik
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KWEA	Kleine Windenergieanlagen
LärmVibrationsArbSchV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen
LABO	Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAGA	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAI	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz
LCA	Life-cycle Assessment
L PROG	Unterer Prognosekorridor
LEXPLOG	Mittelwert Prognosekorridor
MVA	Müllverbrennungsanlage
NachweisV	Nachweisverordnung
NH	Nabenhöhe
NVwZ	Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht
NZI	Neue Zeitschrift für Insolvenz- und Sanierungsrecht
LBauO Bayern	Bayerische Bauordnung
P	Nennleistung
RC-Baustoffe	Recycling-Baustoffe
RD	Rotordurchmesser
RMC	Ramboll Management Consulting
SEE	Seltene Erdelemente
SF6	Schwefelhexafluorid
SprengG	Sprengstoffgesetz
TD PROG	Top-Down-Prognose
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
UP PROG	Bottom-Up-Prognose
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VerpackG	Verpackungsgesetz

VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
WEA	Windenergieanlagen
WM	Wertpapier-Mitteilungen (Zeitschrift)
WMEP	Bundesforschungsministerium für Bildung und Forschung
WT	Wind turbine
ZInsO	Zeitschrift für das gesamte Insolvenz- und Sanierungsrecht

Gesetzesverzeichnis

EU-Rechtsakte

Rechtsdokument	Stand
EU POP-Verordnung	Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (ABl. L 169 vom 25.6.2019, S. 45)
EU F-Gas-VO	Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (ABl. L 150 vom 20.5.2014, S. 195)
VO 333/2011	Verordnung (EU) Nr. 333/2011 des Rates vom 31. März 2011 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind (Abl. L 94 vom 8.4.2011, S. 2)

Bundesrechtliche Gesetze und Verordnungen

Rechtsdokument	Stand
4. BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440)
17. BImSchV	Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1044, 3754)
Altfahrzeuge Verordnung	Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 2. Dezember 2016 (BGBl. I S. 2770) geändert worden ist
Altöl Verordnung	Altölverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. April 2002 (BGBl. I S. 1368), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 14 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
Arbeitsschutzgesetz	Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
Baustellenverordnung	Baustellenverordnung vom 10. Juni 1998 (BGBl. I S. 1283), die zuletzt durch Artikel 27 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist
Baugesetzbuch	Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634)
Batteriegesetz	Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 6 Absatz 10 des Gesetzes vom 13. April 2017 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist
Bundes-Bodenschutzgesetz	Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
Bundes-Immissionsschutzgesetz	Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt

	durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist
Bürgerliches Gesetzbuch	Bürgerliches Gesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 31. Januar 2019 (BGBl. I S. 54) geändert worden ist
Chemikalien-Klimaschutzverordnung	Chemikalien-Klimaschutzverordnung vom 2. Juli 2008 (BGBl. I S. 1139), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. Februar 2017 (BGBl. I S. 148) geändert worden ist
Deponieverordnung	Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
Erneuerbare-Energien-Gesetz	Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2549) geändert worden ist
Elektro- und Elektronikgerätegesetz	Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist
Gefahrstoffverordnung	Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die zuletzt durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist
Gewerbeabfallverordnung	Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau und Abbruchabfällen vom 18. April 2017
GmbH-Gesetz	Gesetz betreffend die Gesellschaften mit beschränkter Haftung in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 4123-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2446) geändert worden ist
HGB	Handelsgesetzbuch in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 4100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 8 Absatz 4 des Gesetzes vom 8. Juli 2019 (BGBl. I S. 1002) geändert worden ist
InsO	Insolvenzordnung vom 5. Oktober 1994 (BGBl. I S. 2866), die zuletzt durch Artikel 24 Absatz 3 des Gesetzes vom 23. Juni 2017 (BGBl. I S. 1693) geändert worden ist
Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 5 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist
Kreislaufwirtschaftsgesetz	Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
Sprengstoffgesetz	Sprengstoffgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. September 2002 (BGBl. I S. 3518), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 11. Juni 2017 (BGBl. I S. 1586) geändert worden ist
Verordnung über arbeitsmedizinische Vorsorge	Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 1 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2549) geändert worden ist
Verpackungsgesetz	Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen vom 5. Juli 2018
Verwaltungsverfahrensgesetz	Verwaltungsverfahrensgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 2003 (BGBl. I S. 102), das zuletzt durch Artikel 5 Absatz 25 des Gesetzes vom 21. Juni 2019 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist

Landesrechtliche Vorschriften

Rechtsdokument	Stand
Landesbauordnung Bayern	Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588, BayRS 2132-1-B), die zuletzt durch § 1 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (GVBl. S. 523) geändert worden ist

Zusammenfassung

Hintergrund

Ende des Jahres 2016 standen deutschlandweit 27.270 Windenergieanlagen (WEA), die mit rund 40% den größten Beitrag zur Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland leisten. Da es sich hier um einen relativ jungen Industriezweig handelt (erste Inbetriebnahmen in den 90er Jahren) gibt es nur wenige Erfahrungen auf dem Gebiet des Anlagenrückbaus. Dieser wird etwa ab dem Jahr 2020 verstärkt einsetzen, unter anderem aus Gründen der Funktionstüchtigkeit, Standsicherheit und Wirtschaftlichkeit. Hinzu kommt die Substitution noch funktionstüchtiger Anlagen durch leistungsstärkere WEA, das sogenannte Repowering, welches zu weiteren Rückbauaktivitäten führen wird.

Der Rückbau von WEA unterliegt grundsätzlich baurechtlichen Regelungen und häufig auch Immissionschutzrecht. Unter anderem verpflichtet das Baugesetzbuch (BauGB) die Betreiber zur Bereitstellung von Sicherheitsleistungen, um den ursprünglichen Zustand der bebauten Fläche wiederherzustellen. Für den Rückbau fehlen bisher jedoch praktikable Vorgaben zur Vorgehensweise. Weiterhin fehlen abfallrechtliche Zielvorgaben und damit eine Definition klarer Entsorgungswege für die einzelnen Materialien. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die bisher erbrachten Sicherheitsleistungen die tatsächlichen Rückbaukosten voraussichtlich nicht vollständig abdecken werden.

Vor diesem Hintergrund wurde in dem vorliegenden Vorhaben ein erstes schlüssiges und vollständiges Rückbau- und Recyclingkonzept erarbeitet. Dies erfolgte unter den Maßgaben der gesetzlichen Grundlagen für den Bau und den Betrieb von WEA sowie der Abfallgesetzgebung, und beinhaltet konzeptionelle Vorschläge für ein hochwertiges und vollständiges Anlagenrecycling. Zudem erfolgte eine Zuweisung von Organisationspflichten an Hersteller, Betreiber und Besitzer im Kontext ökologischer und ökonomischer Auswirkungen. Dabei wurden die Empfehlungen eines Expertenbeirats berücksichtigt.

Rechtliche Vorgaben für Rückbau und Entsorgung von WEA

Windenergieanlagen sind bauliche Anlagen nach dem BauGB und den Bauordnungen der Bundesländer. Sie sind auch Anlagen im Sinne des BImSchG und ab einer Gesamthöhe von mehr als 50 m nach dem BImSchG genehmigungsbedürftig. Weil sich an das jeweilige Genehmigungsregime unterschiedliche Folgen sowohl im Bereich des Rückbaus als auch im Bereich der Entsorgung entstehender Bau- und Abbruchabfälle anschließen, wird im Folgenden bei der Ermittlung relevanter Pflichten und Fragen des Vollzugs zwischen jeweils diesen beiden Arten von WEA unterschieden.

Eine gesetzlich begründete generelle und grundsätzliche Pflicht zum Rückbau einer dauerhaft aufgegebenen *baurechtlich genehmigten Anlage* besteht weder nach allgemeinem Baurecht noch nach den Vorgaben des BImSchG für nicht-genehmigungsbedürftige Anlagen (§ 22–25 BImSchG). Nach der Konzeption der Bauordnungen der Bundesländer ist es vielmehr in das Ermessen der zuständigen Behörden gestellt, entsprechende bauaufsichtsrechtliche Anordnungen zu treffen; diese können nach von uns vertretener Ansicht inhaltlich den kompletten Rückbau einer WEA umfassen. Der Maßstab des Rückbaus richtet sich nach den Landesbauordnungen der Bundesländer. Soweit WEA im Außenbereich ohne Geltung eines qualifizierten Bebauungsplans errichtet wurden, sind entsprechend des 2004 eingeführten § 35 Abs. 5 BauGB bei nach 2004 errichteten WEA als Teil des Genehmigungsverfahrens Verpflichtungserklärungen zu Rückbau der Anlage und zur Beseitigung von

Bodenversiegelungen abzugeben und zur Sicherung des Rückbaus von der Behörde Sicherheitsleistungen einzufordern.

Der Rückbau *immissionsschutzrechtlich genehmigten WEA* unterliegt ebenfalls den Vorschriften des Baurechts zu beachten. Die Vorschrift § 35 Abs. 5 BauGB ist im Rahmen des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens zu beachten. Zusätzlich kennt das BImSchG spezielle Nachsorgepflichten für BImSchG-genehmigte Anlagen, die nach unserer Auffassung inhaltlich die Pflicht zum Rückbau der Anlage mitumfassen können. Zur Sicherung der Nachsorgepflichten kann die zuständige Behörde nachträgliche Anordnung erlassen. Ein Vorgehen entsprechend der Landesbauordnungen bleibt bei Vorliegen der jeweiligen Tatbestandsvoraussetzungen in jedem Fall möglich.

Für aufgegebenen WEA aus beiden Genehmigungsregimes richten sich die Pflichten für die Entsorgung nach Abfallrecht. Insofern gilt für die Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen zunächst maßgeblich die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV). Weitere relevante Pflichten für die beim Rückbau entstehenden einzelnen Fraktionen betreffen beispielsweise folgende Abfallarten und die entsprechenden rechtlichen Vorgaben:

- ▶ für Elektroaltgeräte, die in den Anwendungsbereich des ElektroG fallen, bestehen Getrennthaltungspflichten und Vorgaben zur Entsorgung;
- ▶ für Altbatterien bestehen Pflichten zur getrennten Erfassung und Zuführung zum geeigneten Entsorger;
- ▶ für Altholz, z. B. bei bestimmten Rotorblattkonstruktionen aus Holz, bestehen Anforderungen an die Behandlung;
- ▶ für Altöle bestehen Getrennthaltungspflichten und Vermischungsverbot;
- ▶ Bei Beseitigung von F-Gasen (wie SF₆) müssen die Vorgaben der EU-Verordnung 517/2014 sowie der bundesrechtlichen ChemKlimaSchutzV beachtet werden, insbesondere Rückgewinnung der Gase durch qualifiziertes Personal.

Aktuelle Praxis des Rückbaus und der Entsorgung von WEA

Der Rückbau von WEA erfolgt üblicherweise ähnlich dem Aufbau, jedoch zwangsläufig in umgekehrte Reihenfolge. In einem ersten Schritt wird die WEA zunächst vom Netz getrennt. Dies umfasst insbesondere die Trennung der Kabelverbindungen (Leistungskabel und Steuerkabel, sowie von Turmeinbauten z.B. Schienensysteme). Weiterhin erfolgt innerhalb der Vorbereitungsarbeiten eines Rückbaus die Trockenlegung, d. h. die Entnahme von Betriebsflüssigkeiten, wie Getriebeölen und Kühlgasen.

Nachfolgend kann mit der eigentlichen Demontage der WEA begonnen werden (Beispielhafte Bilder siehe folgende Abbildung). Als übergreifendes Problem bei der Demontage von WEA wurde von vielen Befragten ausgeführt, dass für den des Rückbaus einer WEA keine verbindlichen Standards gebe.

Bilder von ausgewählten Rückbau-Prozessen WEA



Quelle: (Ramboll)

Die Demontage erfolgt üblicherweise mittels eines Krans. Der Aufbau dieses Hauptkrans erfordert zumeist, dass ein zweiter, kleiner Hilfskran angefordert wird, welcher den Hauptkran montiert. Dieser Hilfskran wird zudem auch bei einer möglichen späteren Zerkleinerung, einzelnen Demontagevorgängen am Boden und dem Verladen einzelnen Komponenten, sowie ggf. bei der Ablage von größeren rückgebauten WEA-Komponenten (z. B. dem Rotorstern) benötigt. Bei der aktuellen Generation an rückzubauenden bzw. bisher zurückgebauten WEA kann der Rotorstern als Ganzes und in einem Vorgang abgesenkt werden. Bei neueren, größeren WEA ist zukünftig und in Abhängigkeit des eingesetzten Krans und dessen Spezifikationen, bspw. dessen zulässiges Gewicht in Hakenhöhe, eine Einzelblattdemontage notwendig. Das (flache) Ablegen des Rotorsterns am Boden erfolgt mittels Hilfskrans. In nachfolgenden Arbeitsschritten wird der Rotorstern am Boden in seine Einzelteile zerlegt.

Danach werden die einzelnen Komponenten entweder direkt auf ein geeignetes Transportfahrzeug gelegt (Weiternutzung) oder teilweise auch in transportfähige Stücke für die Entsorgung zerlegt. Dies betrifft vor allem auch die Rotorblätter und erfolgt zumeist durch Entsorgungsfachfirmen. Im Fall von Rotorblättern, welche bei aktuell rückzubauenden WEA überwiegend aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bestehen und in denen noch kein bzw. nur selten carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) vorhanden ist, erfolgt die Zerkleinerung mithilfe von Sägen. CFK-Anteile lassen sich grundsätzlich ebenfalls zersägen, hier muss jedoch aufgrund des härteren Materials von einer deutlich höheren Abnutzung des Werkzeugs sowie von längeren Bearbeitungszeiten ausgegangen werden. Verfahren der energetischen Zerkleinerung von Rotorblättern mittels Schneidladungen befinden sich zudem in der Entwicklung. Während des Sägeprozesses werden die Blätter eingehaust, sodass die entstehenden Stäube nicht unmittelbar in die Umgebung gelangen. Die entstehenden Stäube werden mittels Wasser gebunden, aufgefangen und in einem nachfolgenden Prozess aus dem Wasser gefiltert. Die Zerlegung eines Rotorblattes erfolgt zunächst quer zur Rotorblattachse und nachfolgend in einem

zweiten Schritt meist längs (bessere Transport-Geometrien), können CFK-freie Bereiche meist gut von CFK-haltigen Bereichen des Rotorblatts getrennt werden. Die Lokalisierung der CFK-freien Bereiche, ist jedoch meist nur per „trial and error“ möglich. So sind spezifische Informationen in der erforderlichen Detailtiefe häufig nicht verfügbar. Die Identifikation des CFK-freien Blattbereichs eines Rotorblatts erfolgt somit zumeist visuell an, höherem Materialwiderstand beim Sägen oder aufgrund von Erfahrung oder Herstellerwissen.

Nachdem der Demontage von Rotorblättern und die Naben erfolgt die Demontage der Gondel einschließlich des Antriebsstrangs. Je nach späterer Verwendung der WEA kann nachfolgend (analog zum Rotor) entweder ein direkter Abtransport der Gondel im Ganzen, eine temporäre Lagerung oder eine Zerkleinerung der Gondel vor Ort erfolgen. Die Zerlegung vor Ort dient zumeist der Zweitnutzung von Einzel- und Ersatzteilen. Bezüglich der Zerkleinerung vor Ort wurden von den befragten Akteuren verschiedene Aussagen getroffen; das Vorgehen ist offenbar nicht standardisiert.

Bei der Demontage des Turmes ist grundsätzlich zwischen Beton-, Stahlrohr-, Hybrid- (im unteren Bereich Betonturm und im oberen Bereich Stahlurm) oder Gittermasttürmen zu unterscheiden.

- Aufgrund der Seltenheit von Gittermasttürmen liegen zu ihnen nur wenige Erfahrungen vor. Die Verbindungselemente eines Gittermastturms lassen sich leicht lösen, sodass einzelne Sektionen (bestehend aus einer gewissen Anzahl an Gitterstäben) abgesenkt und am Boden demontiert werden können. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass dieses Turmkonzept auch zukünftig selten sein wird.
- Beim Rückbau eines Stahlrohrturms aus einzelnen übereinander angeordneten Stahlsektionen sowie beim Rückbau der Stahlsektionen eines Hybridturms werden die einzelnen Sektionen zunächst voneinander gelöst und nachfolgend einzeln mithilfe des Hauptkrans demontiert. Das Zerkleinern des Stahlrohrturms erfolgt hierbei etwa mithilfe von Schneidbrennern. Zudem können auch andere Verfahren wie z.B. ein Zerschneiden der Türme mithilfe eines Baggers eingesetzt werden. Der Rückbau von Turmabschnitten aus Beton ist dagegen irreversibel, sodass der Wiederaufbau eines rückgebauten Betonturms sowie des Betonturmabschnittes eines Hybridturms nicht möglich ist. Aufgrund des gegenwärtigen Fehlens von alternativen Rückbaumethoden werden Betontürme derzeit segmental abgetragen oder gezielt gesprengt. Neben Beton und Stahl (je nach Turmkonzept) fallen außerdem beim Rückbau eines Turms in der Regel auch NE-Metalle, wie bspw. Aluminium aus den Turmeinbauteilen, an.

Nach vollständigem Rückbau der WEA erfolgt die Demontage des Fundaments. Hierbei ist zwischen einem Standardflachfundament und einer Pfahlgründung zu unterscheiden. Bezüglich des Rückbauumfangs bestehen abweichende Auffassungen, ob das Fundament vollständig rückzubauen ist oder nur bis zu einer gewissen Tiefe unter der Geländeoberfläche. So finden sich in älteren Genehmigungen häufig Bestimmungen, welche den Abbau der Fundamente nur bis zu einer Tiefe 1,5 m unter der Geländeoberkante vorsehen. Hintergrund der Abweichungen ist die unterschiedliche Interpretation der Vorgabe „Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes“. Einige Stakeholder fordern, dass im Hinblick auf eine uneingeschränkte Nachnutzung der Fläche der ursprüngliche Zustand vollständig wiederherzustellen ist, während andere zu dem Schluss kommen, dass der Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes auch dann genüge geleistet ist, wenn eine landwirtschaftliche Nutzung und Bewirtschaftung der Flächen erfolgen kann. Der eigentliche Rückbau eines Flachfundaments kann mittels Sprengung oder mittels Bagger erfolgen. Im Fall einer Sprengung (auch als Lockersprengung bezeichnet) ist zunächst ähnlich der Sprengung eines Turms, gegenüber der zuständigen Behörde eine entsprechende Anzeige zu machen, aus der auch hervorgeht, dass es durch die Sprengung zu keiner Schädigung an benachbarten Anlagen, Gebäuden oder Auch

Versorgungsleitungen kommen kann. Grundsätzlich muss bei der Sprengung eines Fundaments jedoch von geringeren Erschütterungen ausgegangen werden als bei einer Turmsprengung. Für die eigentliche Sprengung sind zunächst Bohrungen am Fundament anzustellen, sodass die Sprengladungen im Inneren des Fundaments detonieren können. Vor einer Sprengung wird das Fundament zudem mit Matten abgesichert. Nach erfolgter Lockersprengung liegen Bewehrungsstahl und Stahlbeton überwiegend getrennt vor und können mithilfe von Baggern aus der Fundamentgrube entfernt werden. Verbleibende Fundamentbestandteile können zudem mittels Bagger ausgegraben werden. Neben dem Abbruch mittels Sprengung können Fundamente zudem auch mittels Bagger rückgebaut werden. Hierzu wird das Fundament mithilfe eines Meißels zunächst gebrochen und die freiliegenden Fragmente im Anschluss ausgegraben.

Der Rückbau der Kranstellflächen erfolgt gleichermaßen. Der Gesteinsschotter kann als Schotter (ggf. nach Siebung) in neuen Projekten beispielsweise für die Zuwegung zu Windenergieanlagen genutzt werden.

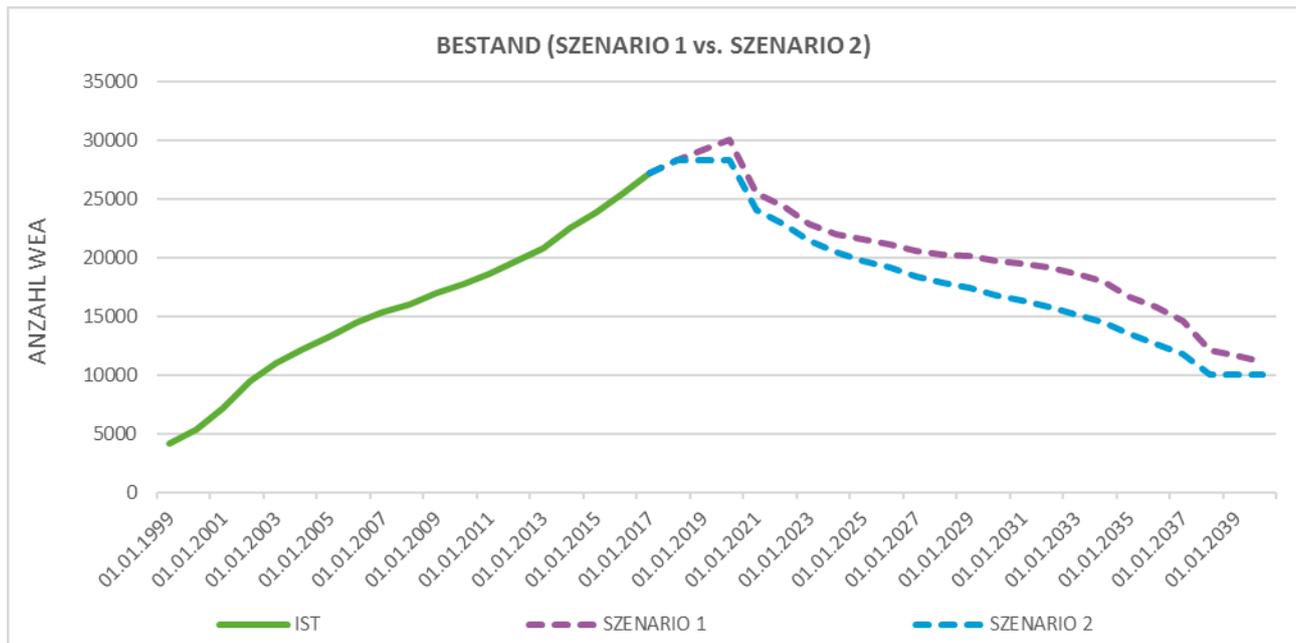
Prognose des Windenergieanlagenrückbaus

Auf der Grundlage einer Bestandserhebung und einer Entwurfslebensdauer von 20 Jahren erfolgte eine Rückbauprognose bis zum Jahr 2040. Dazu wurden die folgenden zwei Entwicklungsszenarien festgelegt (siehe folgende Abbildung):

- SZENARIO 1: Marktentwicklung bei vollständiger Erfüllung des EEG
- SZENARIO 2: Marktentwicklung bei Erhalt der Gesamtleistung des Bezugsjahres 2018

Da sich die grundsätzlichen Erkenntnisse beider Szenarien sehr ähnlich sind und Szenario 1 etwas realistischer ist, wird im Folgenden Szenario. Die unterschiedlichen Anlagenmodelle werden dabei geclustert, d.h. es wurden Gruppen ähnlicher WEA-Modelle gebildet (zum einen unterschieden nach WEA-Typ und zum anderen nach Turm-Typ). Unsicherheiten bestehen sowohl hinsichtlich des zu erwartenden Weiterbetriebs von Anlagen über die EEG-Förderung hinaus als auch bezüglich des vorzeitigen Rückbaus. In Ermangelung von Erfahrungswerten wird für die Prognosen angenommen, dass sich beide Effekte in etwa ausgleichen und eine 20-jährige Lebensdauer realistisch ist.

Entwicklung WEA Bestand in SZENARIO 1 und SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

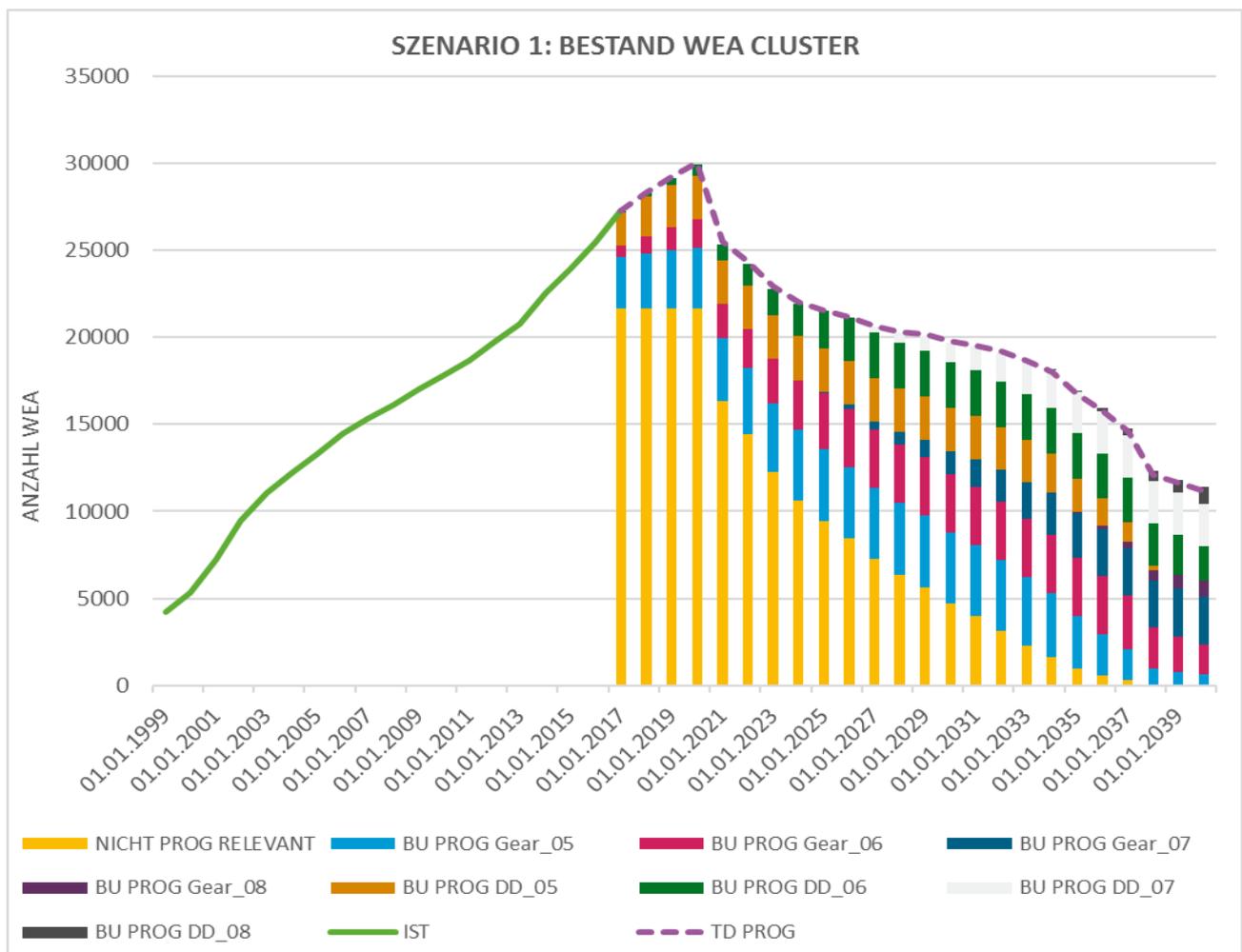
Der WEA-Bestand entwickelt sich in beiden Szenarien trotz zunächst steigender bzw. konstanter kumulierter Leistung nach einem absoluten Maximum 2020 rückläufig (vgl. Abbildung 14). In beiden Szenarien überkompensiert der technische Fortschritt, also das Ansteigen der mittleren Leistung des jährlichen Zubaus, den zugelassenen kumulierten brutto Zubau - SZENARIO 1 entsprechend EEG17, SZENARIO 2 entsprechend Rückbau. Es kann gefolgert werden, dass der absolute Flächenbedarf aufgrund der deutlichen Leistungssteigerung pro Anlage perspektivisch sinkt, was eine positive Entwicklung ist.

Ein verstärkter Rückbau ist erst mit dem Auslaufen der Förderung des ersten EGG ab 2021 zu erwarten.

Da 2021 sämtliche vor 2000 errichtete aber nachträglich ins EEG aufgenommene WEA rückgebaut werden, sinkt die Anlagenanzahl in diesem Jahr deutlich. Bei diesen Anlagen handelt es sich überwiegend um kleine WEA mit einer vergleichsweise geringen Leistung <450 kW, welche in dem Cluster KWEA zusammengefasst sind. Da im EEG17 Anlagen mit einer Leistung <750 kW nicht Bestandteil der Ausbaukorridore und damit vom Ausschreibungsmodell ausgenommen sind, wird ein eventuell zukünftig stattfindender Zubau dieser Anlagen in den Prognosen definitionsgemäß nicht mehr erfasst.

Ein Vergleich der Bestandsprognosen beider Szenarien zeigt im Zeitverlauf eine Verschiebung zwischen den betrachteten WEA-Clustern. Im SZENARIO 1 mit seinem durch das EEG17 definierten konstanten brutto Zubau durchlaufen die betrachteten Cluster einen typischen Lebenszyklus in ihrer Marktrelevanz. Der im Vergleich zu früheren Clustern abnehmende Bestand von WEA späterer Cluster ist mit der Marktdämpfung durch die definierten Ausbaukorridore in Kombination mit der steigenden Leistung der WEA innerhalb der Cluster zu erklären (vgl. folgende Abbildung). Beispielsweise stellt das Cluster „Gear_05“ WEA mit Getriebe, einer Nennleistung zwischen 2300-3600 kW und einem mittleren Rotordurchmesser zwischen 107-120 m dar.

Entwicklung WEA Bestand nach Clustern in SZENARIO 1



Quelle: (Ramboll)

Abfallprognose auf Grundlage der Marktentwicklung und Materialzusammensetzung

Auf der Grundlage der Clusterung des WEA-Bestandes onshore und der Art und Menge der eingesetzten Materialien je Cluster, der Zusammensetzung des Onshore-Windenergieanlagenbestandes erfolgte eine Rückbauprognose sowie eine Prognose der zu erwartenden Materialrückläufe.

Unter Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Eingangsgrößen sind für das SZENARIO 1 die in folgender Tabelle dargestellten, jährlich zu erwartenden Abfallmengen dargestellt.

Abfallprognose für das SZENARIO 1

Jahr	Verbundwerkstoffe (GFK)	Verbundwerkstoffe (GFK/CFK)	Stahl	Kupfer	Aluminium	Beton	Elektroschrott
	t	t	t	t	t	t	t
2020	0	0	0	0	0	0	0
2021	50.868	9	847.700	12.458	2.083	3.213.839	25.580
2022	29.816	9	421.403	6.806	906	1.694.005	12.685
2023	36.800	9	522.440	9.117	1.072	2.137.698	15.543
2024	29.802	18	407.432	7.462	838	1.750.188	12.341
2025	22.355	416	319.353	6.269	662	1.551.112	9.454
2026	20.310	469	295.495	5.589	604	1.454.516	8.597

2027	23.812	1.454	352.332	6.323	694	1.652.742	10.241
2028	17.445	1.206	258.577	5.561	540	1.285.948	7.867
2029	15.040	1.192	225.907	4.810	470	1.078.614	6.777
2030	18.720	1.022	280.550	7.076	629	1.607.386	8.708
2031	14.888	867	226.452	5.494	533	1.385.931	6.874
2032	19.246	1.514	288.547	6.872	714	1.855.381	8.609
2033	25.360	2.292	359.174	7.958	1.069	2.420.860	10.258
2034	33.953	3.581	440.832	8.326	1.631	2.981.945	11.653
2035	59.018	6.815	691.289	13.112	2.837	4.496.682	18.741
2036	52.144	6.954	601.338	10.203	2.605	4.044.531	15.702
2037	63.128	8.669	726.088	12.477	3.319	4.984.553	18.624
2038	73.584	10.611	836.216	14.161	3.745	5.527.403	22.015
2039	51.766	6.533	539.361	10.279	3.091	3.650.641	14.229
2040	41.990	5.709	439.549	8.253	2.438	2.891.676	11.740

Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend lässt sich für alle Bestandteile mit Ausnahme der Verbundwerkstoffe ein proportionaler und verhältnismäßiger Verlauf der zu erwartenden Abfallmengen feststellen. So kann für das Jahr 2021 ein erstes Maximum festgestellt werden, welches etwa bis 2030 stetig abnimmt. Nachfolgend steigen die zu erwartenden Abfallmengen bis 2037 deutlich an und fallen (aufgrund der Ansätze zu den Zubau-Raten und der Lebensdauer) in den beiden Nachfolgejahren erneut leicht ab.

Für Verbundwerkstoffe, welche neben GFK auch CFK enthalten, erwarten wir zunächst geringe Abfallmengen bis etwa 2024. Ab 2025 sind relevante Mengen an CFK-haltigen Abfällen zu erwarten, welche in den Folgejahren stetig ansteigen und im Jahr 2038 einen Maximalwert von 73.500 t erreichen. In den beiden Folgejahren sinken die zu erwartenden CFK-haltigen Abfälle dagegen wieder leicht ab, was auf die Ansätze zum zukünftigen Anlagenausbau zurückzuführen ist. Insbesondere aufgrund der beschriebenen Problemstellungen bei der Findung eines geeigneten Ansatzes für den Metarialeinsatz je WEA-Cluster für CFK-haltige Verbundwerkstoffe ist die Abfallprognose für diese Stoffgruppe mit erhöhten Unsicherheiten belegt.

Für Beton, Elektroschrott und Aluminium sowie abgeschwächt auch für CFK-haltige Verbundwerkstoffe lässt sich zudem feststellen, dass die maximalen Abfallmengen im Jahr 2038 deutlich ausgeprägter sind als die Mengen aus dem Jahr 2021. Dies kann als Indikator für einen überproportionalen Einsatz dieser Stoffe in neueren WEA-Generationen aufgefasst werden. Bezüglich der installierten Leistung sinkt der Materialaufwand jedoch erheblich, was ein ökologisch vorteilhaftes Ergebnis des technologischen Fortschritts ist. Bezüglich des Betons lässt sich dies zudem sehr gut an den deutlich steigenden Fundamentvolumen und den vermehrten Einsatz von Hybridtürmen festmachen.

In den vorstehenden Abfallprognosen wurden Seltene Erden, wie sie in permanentmagnetisch erregten Generatoren eingesetzt werden, nicht gesondert berücksichtigt. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass Seltene Erden gegenüber den anderen eingesetzten Materialien nur eine mengenmäßig stark untergeordnete Rolle einnehmen. Nichtsdestoweniger handelt es sich bei Seltenen Erden um aus recyclingtechnischer Sicht höchst interessante Materialien, da derzeit in Deutschland keine hochwertigen Recyclingverfahren zur Verfügung stehen. Unter Beachtung des jeweiligen Rückbauzeitpunktes bzw. der angenommenen Länge der Betriebsphase je WEA Typ die einen wesentlichen Anteil an SEE-Magneten enthält können die resultierenden Abfallströme für SEE-haltige Magnete abgeschätzt werden. Dabei belaufen sich die prognostizierten, anfallenden SEE-Abfallmengen auf ca. 100-200 t pro Jahr zwischen 2033 und 2040.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bezogen auf die reinen Abfallmassen Beton (ca. 83,4%) gefolgt von Stahl (ca. 14,7%) dominant sind. Die aus Sicht einer hochwertigen Verwertung als eher problematisch einzustufenden Verbundwerkstoffe machen dagegen nur rund 1,1% (nur GFK, kein CFK) zzgl. 0,1% (GFK und CFK) der gesamten Abfallmenge aus. Sonstige metallische Abfälle wie Kupfer, Aluminium und Elektroschrott liegen zusammen bei ca. 0,7% der gesamten Abfallmenge und stellen somit einen kleinen (aber vergleichsweise wertvollen) Massenanteil dar.

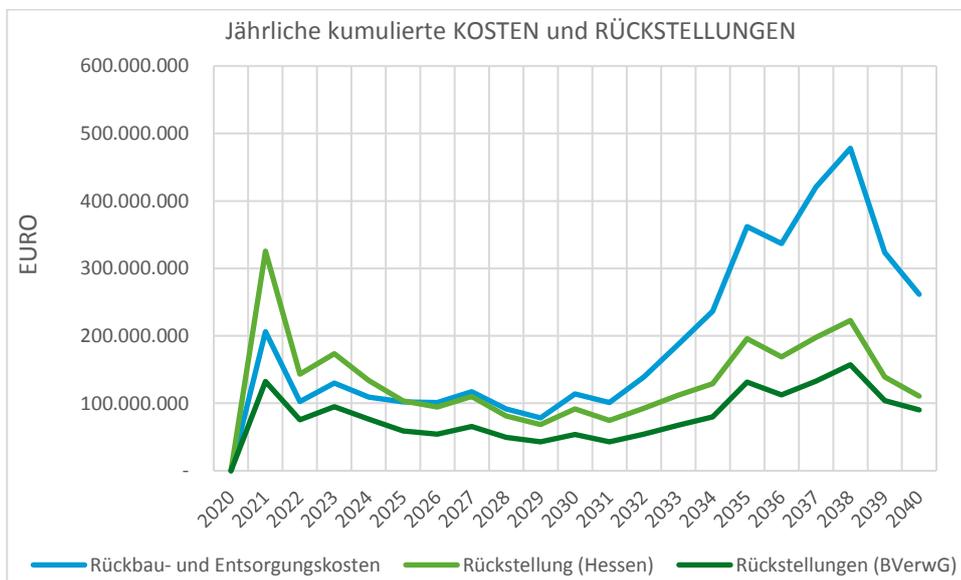
Prognose Rückbaukosten im Vergleich zu vorhandenen Sicherheitsleistungen

Weiter wurden auf Grundlage der zuvor erläuterten Rückbau- und Recyclingverfahren Rückbaukosten geschätzt. Dabei wurden zunächst die mittleren Rückbaukosten für die einzelnen WEA- und Turm-Cluster berechnet und die Rückbaukosten jeweils für beide Clusterkategorien bestimmt. Die Gesamtkosten für den Rückbau einer WEA aus dem Cluster X bei Berücksichtigung des Turm-Clusters Y erfolgte somit auf der Grundlage einer Matrix, die alle möglichen Kombinationen beinhaltet.

Da die tatsächlich verfügbaren Rücklagen für den Rückbau von WEA nicht vorlagen, wurde ersatzweise ein Vergleich der Rückbaukosten mit angewendeten Ansätzen zur Höhe der Rückbaubürgschaft verglichen¹.

Für Kosten bzw. Erlöse wurde eine Inflationsrate von 2% p.a. unterstellt, wobei 2018 das Basisjahr darstellt. Rückstellungen unterliegen in der Prognose keiner Inflation bzw. Verzinsung, da es sich bei diesen oftmals um nicht verzinste Bankbürgschaften handelt. Zur Identifikation möglicher Finanzierungslücken sind den jährlichen Kosten die erwarteten Summen der Rückstellungen nach den Modellen aus HESSEN bzw. vom BVerwG gegenübergestellt (siehe folgende Abbildung).

Jährlicher Vergleich Rückbau- und Entsorgungskosten zu Rückstellungen (SZENARIO 1)



Quelle: (Ramboll)

In 2021, dem ersten Jahr des erwarteten Rückbaus von EEG Anlagen, werden gemessen an ihrer Anzahl die meisten Anlagen im Prognosezeitraum zurückgebaut werden, da hier neben den in 2000 errichteten WEA, einmalig auch alle im Jahr 2000 rückwirkend ins EEG aufgenommenen Anlagen sowie viele WEA aus dem Cluster KWEA zum Rückbau anstehen. Dieser Einmaleffekt zeigt sich, im

¹ Hessen: Nabenhöhe der Windenergieanlage (m) x 1000 = Betrag der Sicherheitsleistung (€)

Bundesverwaltungsgericht: 30 000 € pro Megawatt installierte elektrische Leistung

Vergleich zu folgenden Jahren, an deutlich erhöhten kumulierten Rückbau- und Entsorgungskosten sowie an den ebenfalls erhöhten Rückstellungen nach dem Modell Hessen.

In den folgenden Jahren bis 2031 schwanken die erwarteten Rückbaukosten um einen Wert von ca. 100 Mio. Euro. Ab 2031 ist bis 2038 ein starker Anstieg der Rückbau- und Entsorgungskosten zu erwarten, der insbesondere durch die ab 2011 errichteten und ab 2031 zum Rückbau anstehenden höheren Türme der Turm-Cluster (Stahl_04, Stahl_05, Hybrid_02 und Hybrid_03) getrieben wird. In 2039 und 2040, den einzigen von den Szenarien der Marktprognose beeinflussten Jahren, fallen die Rückbau- und Entsorgungskosten in beiden Szenarien korrespondierend mit den in beiden Szenarien ab 2018 rückläufigen Zubau stark ab.

Insgesamt sind beim Vergleich der prognostizierten Rückbau- und Entsorgungskosten mit beiden Modellen zur Berechnung der Rückstellungen erhebliche Finanzierungslücken zu erwarten, wobei die Berechnung nach dem Modell HESSEN die optimistischere der beiden Abschätzungen darstellt. Der zeitliche Verlauf der Höhe dieser Finanzierungslücken lässt sich grob in drei Phasen einteilen:

- In der ersten Phase 2021 bis 2025 übersteigen die Rückstellungen nach dem Modell HESSEN die erwarteten Kosten, die Rückstellungen nach dem Modell des BVerwG liegen bereits unter den Kostenprognosen. Da tatsächlich nicht die gesamte Summe der Rückstellungen zur Verfügung steht und die Berechnungen nach dem Modell des BVerwG bereits Finanzierungslücken anzeigen, ist schon in diesem Zeitraum mit einer leichten Unterfinanzierung von Rückbau und Entsorgung zu rechnen.
- In der zweiten Phase von 2026 bis 2030 liegen die kumulierten Rückstellungen nach beiden Modellen unter dem jeweiligen Finanzierungsbedarf. Das Auftreten von Finanzierungslücken ist in diesem Zeitraum wahrscheinlich. Diese werden in ihrem Betrag über denen der ersten Phase liegen.
- In der dritten Phase ab 2031 steigen die erwarteten Rückbau- und Entsorgungskosten stark und im Vergleich zu den Rückstellungen nach beiden Modellen überproportional an. Daher ist in diesen Jahren (bei unveränderter Regulierungslage) mit erheblichen Finanzierungslücken zu rechnen. Die kritische Prüfung der Rückstellungsleistungen sowie der Berechnungsformeln wird daher empfohlen.

Zusammenfassender Regelungsbedarf für Rückbau und Entsorgung von WEA

Im Bereich des Rückbaus von WEA besteht nach den Erkenntnissen dieses Berichts Regelungsbedarf im Hinblick auf folgende Aspekte:

- Klarstellung des Umfangs bestehender genehmigungsrechtlicher Pflichten
 - Rückbauumfang, insbesondere bezüglich des Rückbaus von Fundamenten und der Nebeneinrichtungen, wie Kabelsysteme, Stellflächen oder Zuwegung;
 - Angewandte Rückbaumethoden (bevorzugt mittels Krans, Bedingungen für Sprengungen, Umziehen nur im Ausnahmefall) für die jeweiligen Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, der Vermeidung von Flurschäden, sicherheitstechnischer Überlegungen, Lärmschutz und einem angemessenen Kosten-/Nutzen-Verhältnis;
- Anforderungen bezüglich Sicherheits- und Arbeitssicherheits-Aspekte (insbesondere, aber nicht ausschließlich auf Seiten der Rückbaufirmen) unter anderem vorzuweisende Ausbildungs-/Fortbildungsnachweise (z.B. Höhenttraining, Schaltberechtigung) oder

Prüfplaketten (z.B. für Arbeitsmittel); Grundsätzlich sollten die gleichen Standards für Auf- und Rückbau gelten und in der Praxis angewendet werden;

- Archivierung/Dokumentation bestimmter Informationen (Mengen, Massen, Zeichnungen etc.), die für den Rückbauprozess benötigt werden, durch den Betreiber eines Windparks. Hierzu wären ggf. entsprechende Daten vom Hersteller bei dem Anlagenverkauf verbindlich zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich zu diesen technischen Aspekten des Rückbaus ergibt sich ein weiterer möglicher Regelungsbedarf für den Rückbau von WEA (und auch für die im nächsten Abschnitt diskutierte Entsorgung) aufgrund der möglichen, mittelfristig auftretenden Finanzierungslücke zwischen gebildeten Sicherheitsleistungen der Windparkbetreiber und den zukünftig zu erwarteten Rückbaukosten. Der Betreiber, welcher die Rückbauverpflichtung trägt, muss den Rückbau finanzieren, auch wenn dieser die Rückstellungsleistung deutlich übersteigt.

Im Bereich Entsorgung der beim Rückbau entstehenden Abfälle bestehen nach aktueller Rechtslage bereits umfangreiche abfallrechtliche Pflichtenstellungen. Regelungsbedarf sehen wir im Bereich der Entsorgung im Hinblick auf folgende Stoffströme:

- Umsetzung bestehender Pflichten zur Entsorgung in die Praxis, z.B. Getrennthaltung von bestimmten Stoffströmen (GewAbfV).;
- Derzeit Defizite mit Blick auf hochwertige Verwertung von
 - Altbeton-Ströme aus WEA (Turm und Fundamente), z.B. durch fehlenden Einsatz und Akzeptanz von Recyclingbaustoffen;
 - SEE-Magneten aus WEA (Synchrongeneratoren), z.B. aufgrund fehlender Mengen für eine wirtschaftliche Verwertung;
 - GFK- und CFK-haltigen Abfälle aus WEA (Rotorblätter), z.B. aufgrund fehlender Vorgaben zur fachgerechten Verarbeitung/Zerlegung von Rotorblättern vor Ort.

Maßnahmen und Empfehlungen für einen ressourcensichernden Rückbau und eine hochwertige Verwertung von WEA

Um den Rückbau und die Verwertung von WEA insgesamt zu steuern sowie eine umweltgerechte und ressourcenschonende Verwertung der entstehenden Stoffströme sicherzustellen, sind umwelt- und ressourcensichernde Lenkungsmaßnahmen zweckmäßig. Entsprechend wurden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Schaffung von Leitlinien für den Rückbau und das Recycling von WEA

Es wird empfohlen, einen Bund-Länder-Arbeitskreis, z. B. innerhalb der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) oder Abfall (LAGA) einzurichten, in welchem unter Berücksichtigung der Erfahrungen der Genehmigungsbehörden Leitlinien für den Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen erarbeitet werden. Die Diversität des Anlagenbestandes, die abweichenden geologischen Gegebenheiten und die starke Position der Bundesländer sprechen für bundesweit abgestimmte jedoch flexible Empfehlungen und Vollzugshilfen. Die zu erarbeitende Leitlinie soll Behörden und Anlagenbetreibern im Fall des Rückbaus Hilfe bieten und eine gute und umweltverträgliche Rückbaupraxis unterstützen. Die Leitlinien könnten sich an den Empfehlungen in Kapitel 7.3.1.1 orientieren.

Technische Leitlinien wären ein flexibles Instrument und könnte unverbindliche aber wirksame Vorgaben für die beteiligten Akteure machen und Verweise auf bestehende Gesetze und Normen, z.B. zum Arbeitsschutz beim Rückbau, beinhalten.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Schaffung von Leitlinien für den Rückbau inklusive Hinweise für Behörden zum genehmigungsrechtlichen Spielraum aus Sicht der Autoren dieser Studie vorerst zielführender erscheint als die Schaffung eigener und neuer Gesetze und Verordnungen. Dennoch wäre auch die Option der Gestaltung solcher Leitlinien als Verwaltungsvorschrift denkbar und eine Maßnahme, falls sich herausstellen sollte, dass einfache Leitlinien die gute Rückbaupraxis nicht sichern. Die Umsetzung solcher Leitlinien in die Praxis sowie ein stärkerer Vollzug der bestehenden rechtlichen Vorgaben sollte jedoch zunächst Priorität haben. Schaffung technischer Standards für bestimmte Rückbau- und Entsorgungstätigkeiten

Bestimmte technische Details des Rückbaus und Recyclings von WEA sind noch nicht standardisiert und könnten von Standardisierungsgremien erarbeitet werden. Leitlinien der Behörden könnte auf vorhandene Standards verweisen und weiteren Normungsbedarf aufdecken (z.B. bei Sägen/Zerkleinerung von Rotorblätter, Recyclinggerechte Konstruktion von Rotorblättern, Materialanforderungen für entstehende Stoffströme, Vorgaben zur Zwischenlagerung, etc.). Die vorliegenden Forschungsergebnisse verdeutlichen jedoch, dass für viele Arbeitsschritte bereits Normen und Standards vorhanden sind, welche beachtet oder ggf. angepasst werden müssten. Hier besteht weiterer Prüfungsbedarf, der im Zuge der Entwicklungen der erwähnten Leitlinien erfolgen könnte.

- Prüfung der Einführung spezifischer Elemente einer Produktverantwortung für Rotorblätter

Rotorblattabfälle sind aufgrund der Faserverbundwerkstoffe außerordentlich schwer zu verwertende Anlagenteile und bedürfen einer besonderen Aufbereitung. Eine Regelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung könnte für diesen vergleichsweise homogenen und ähnlich zu behandelnden Abfallstrom zu einer verursachergerechten Zuweisung der Entsorgungskosten beitragen und langfristig eine branchen- und produktspezifische sowie umweltschonende und hochwertige Abfallbehandlung sicherstellen. Daher sollte die Einführung der im Folgenden genannten, spezifischen Elemente einer Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Rotorblätter geprüft werden:

- Informations- und Kennzeichnungspflichten zur Materialzusammensetzung der Rotorblätter;
- Produkt- und branchenspezifischer technischer und organisatorischer Ansatz (Branchenlösung);
- Separate Aufbereitung mit dem Ziel der Qualitätssicherung von Rezyklaten und Ersatzbrennstoffen;
- Verpflichtung zur hochwertigen Verwertung bzw. Gewährleistung der Entsorgungssicherheit;
- Einbeziehen des Herstellerwissens sowie dem produktseitigen Technologiewandel angepasste Aufbereitungstechnologien;
- Verursachergerechte Zuordnung der Entsorgungskosten und Organisationspflichten während der Entsorgung

Den Vorteilen einer Produktverantwortung für Rotorblätter stehen einige Herausforderungen gegenüber:

- Trotz der grundsätzlichen Möglichkeit und sich bietenden Vorteilen von länderspezifischen Vorgaben sollte beachtet werden, dass viele WEA-Hersteller europaweit agieren. Eine isolierte Regelung in Deutschland ist dabei möglich, steht jedoch in latenter Spannung mit der grundsätzlichen Idee eines EU-Binnenmarktes;
- Format und Speicherort (Hersteller, Betreiber, Behörde) sowie Frage der Wettbewerbsrelevanz der zu erhebenden Daten;
- Lange Lebensdauern von Rotorblättern stehen der individuellen Produktverantwortung entgegen
- Die Diskussion zu Entsorgungsmöglichkeiten von Verbandmaterialien (GFK/CFK) erstreckt sich auch auf andere Produkte aus solchen Materialien und müsste ggfs. eher stoffstromspezifisch statt produktspezifisch adressiert werden.

Insgesamt besteht ein signifikanter Bedarf an hohem zeitlichem Vorlauf für Umsetzung solcher Maßnahmen. Ein Erfolgsfaktor ist die Ausgestaltung einer Produktverantwortung bzw. die Einführung von nur Teilelementen selbiger in Abstimmung mit den Herstellern der Branche.

- Optimierungsbedarf bei der Bewirtschaftung spezifischer Abfallströme

Etwaige Probleme in der Entsorgung von Stoffströme aus WEA, die nach Aufbereitung gleichwertig zu Stoffströmen anderen Ursprungs sind, sollten in etwaigen Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben nicht behandelt werden. Dies ist insbesondere hervorzuheben, da ein Teil des Regelungsbedarfs Stoffströme betrifft, deren Entsorgung aktuell insgesamt problematisch ist.

Darunter fällt z.B. der Forschungsbedarf zur Bündelung dezentral in unterschiedlichen Branchen anfallender Abfälle mit ähnlicher Zusammensetzung an wirtschaftsstrategischen und umweltrelevanten Metallen, z.B. SEE-haltige Materialien wie Getriebe von WEA, sowie der Entwicklung geeigneter Konzepte zum Recycling von Neodym oder anderen SEE.

- Wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierungsbedarf

Aufgrund der mittelfristig drohenden Finanzierungslücke zwischen tatsächlichen Kosten und gebildeten Sicherheitsleistungen könnte die Methode zur Berechnung der Sicherheitsleistung überarbeitet und in einem Rückbau-Leitlinien/einer Verordnung/etc. konkretisiert und vereinheitlicht werden. Insbesondere die Grundlage der Berechnungskosten muss dabei erörtert werden. Neben den bestehenden Berechnungsgrundlagen (Nabenhöhe der WEA, Installierte Leistung, etc.) könnte eine Orientierung an der Investitionssumme für den WEA-Aufbau erfolgen. Allerdings besteht die Gefahr, dass über vereinfachte Formeln zu der Sicherheitsleistung ein komplexes Konstrukt pauschal vereinfacht wird (Bei gleichartigen WEA ist der erzielte Investitionspreis unabhängig von Rückbaukosten). Zielführender erscheint eine regelmäßige Überprüfung der Sicherheitsleistung durch einen unabhängigen Sachverständigen (z.B. im Intervall von zehn, 15, 18, 19 Jahren, nachfolgend jährlich). Zudem sollten einige Kernaspekte wie die im Vorhaben vorgeschlagenen Anforderungen an den Rückbau fest definiert sein (vollständiger Rückbau der Fundamente, etc.). Weiterhin sollten Erlöse aus dem Verkauf von Komponenten oder der Verwertung von Sekundärrohstoffen mit positiven Marktwert nach dem Rückbau der WEA nicht heute schon Einfluss auf die Sicherheitsleistung nehmen können, da die zukünftigen Marktwerte nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

Schließlich müssen die Anforderungen an den Rückbau so umgesetzt werden, dass die gebildeten und zukünftig zu bildenden Rückstellungen den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen entsprechen. Sollten die Anforderungen so ambitioniert gewählt und umgesetzt werden, dass hohe Rückstellungen gebildet werden müssten, kann dies im Fall der Unverhältnismäßigkeit von Gerichten korrigiert

werden bzw. zu Ausweichverhalten der beteiligten Akteure führen, welche nur begrenzt durch verstärkte Kontrollen abgefangen werden können.

Summary

At the end of 2016, 27,270 wind turbines in Germany provided the largest contribution to domestic electricity production from renewable energies with around 40%. As wind energy is a relatively young branch of industry (first commissioning in the 1990s), there is little experience in the field of dismantling of installations. This will become increasingly relevant from around 2020, among other things due to functional efficiency, stability and the economic environment. In addition, there will be the substitution of functional plants by more powerful wind turbines, the so-called repowering, which will lead to further dismantling activities.

The dismantling of wind turbines in Germany is subject to construction law regime and, to a large extent, to immission control law. Among other things, the Federal German Construction Code obliges the operators to provide financial securities in order to restore the original condition of the built-up area. However, no general guidelines do exist so far regarding the dismantling process. Furthermore, no specific targets under waste law for the waste generated during the dismantling of wind turbines or disposal routes for the individual materials have been defined.

Against this background, a conclusive and complete deconstruction and recycling concept was developed in this project. This was done in accordance with the legal requirements for the construction and operation of wind turbines and waste legislation. The concept includes a proposal for high-quality and complete recycling of installations. In addition, organizational obligations were allocated to manufacturers, operators and owners in the context of ecological and economic impacts. During elaboration the recommendations of an expert advisory board were taken into account.

Legal requirements for dismantling and disposal of wind turbines under German law

The construction of buildings in Germany is subject to construction law and - unless exempted - permitting in accordance with the building regulations of the federal states. The establishment and operation of industrial installations is subject to a permit according to German Federal Immission Control Act (implementing EU IE Directive) when having a total height of more than 50 m according to the relevant description threshold.

Since the appropriate licensing regime has direct consequences both in the field of dismantling and the disposal of the generated waste, a distinction is made below between these two types of wind turbines in the determination of relevant obligations and enforcement issues.

In terms of installations approved under construction law, a general and direct obligation to dismantle the installation when permanently abandoned does not exist. Rather, in line with the approach of the building regulations of the German states, it is left to the discretion of the competent authorities to take the appropriate decisions which may, according to our opinion, include the command to complete dismantle an installation. The benchmark of how the dismantling is to be done depends on the respective regulations of the state. Insofar as wind turbines have been established in an outskirt area without a qualified urban development plan under German construction law existing, permitting authorities have to ask for a financial security covering costs for dismantling the installation and to remove soil seals before issuing the permit (section 5 para 5 of Federal Construction Law).

The dismantling of wind turbines which have been approved under *Federal Immission Control Law* is also subject to the regulations of construction law. The provision of section 5 para 5 must be considered in the process of approval according to Immission Control Act. Under the Immission Control Act, the competent authority has certain specific competences regarding after-care obligations after ceasing of operation of the installation which in our opinion, may include the obligation to entirely dismantle the installation. Actions in accordance with construction regulations remain possible in each case if the respective conditions are met.

For abandoned wind turbines from both approval regimes, the obligations for treatment of the construction/demolition waste are based on waste legislation. In this respect, the Federal Commercial Waste Disposal Ordinance applies to producers and owners of construction and demolition waste and sets out obligations for separate collection of different fractions. Further relevant obligations for the individual fractions arising during the dismantling concern, for example, the following types of waste and the corresponding legal requirements:

- ▶ for waste electrical equipment falling under the scope of the Federal Electronic Waste Act, there is an obligation for separate collection and requirements for treatment;
- ▶ for used batteries, there are obligations for separate collection and handover to appropriate disposal institutions;
- ▶ for waste (e.g. if used in certain rotor blade structures made of wood), Federal Waste Wood Ordinance applies setting out specific treatment requirements
- ▶ For waste oils, the owners are subject to differentiated separation duties and ban on mixing according to Federal Waste Oil Ordinance; When eliminating F-gases (such as SF₆), the requirements of EU Regulation 517/2014 and additional national law must be observed, such as the recovery of gases by qualified personnel.

Current practice in the dismantling and disposal of Wind turbines

The dismantling of wind turbines usually follows the approach during construction yet inevitably in reverse order. In a first step, the WT is first disconnected from the grid. This includes notably the separation of the cable connections (power cables and control cables, as well as tower installations, e.g. rail systems). Furthermore, during the preparatory work for dismantling, the operating fluids, such as gear oils and cooling gases, are drained.

In the following, the actual dismantling of the wind turbine can be started (exemplary pictures, see following illustration). As a general problem during the dismantling of wind turbines, many respondents stated that for the dismantling of a wind turbine no practical standard is available.

Pictures of selected dismantling processes of wind turbines



Source: (Ramboll)

Disassembly is usually carried out by crane. The construction of the main crane usually requires a second, small wrecking crane to be ordered to assemble the main crane. This wrecking crane is also required for a possible later shredding, individual dismantling operations on the ground and loading of individual components, as well as for the storage of larger dismantled wind turbine components (e.g. the rotor. With the current (or the previous) generation of wind turbines to be dismantled, the rotor star can be lowered in one piece and in one operation. In the case of more recent, larger wind turbines, individual blade disassembly will be necessary in the future depending on the used crane and its specifications, e.g. its permissible weight at hook height. The (flat) placement of the rotor star on the ground is carried out with support of the wrecking crane. In subsequent work steps, the rotor star is disassembled into its individual parts on the ground.

Subsequently, the individual components are either placed directly on a suitable transport vehicle (further use) or in some cases dismantled into transportable pieces for disposal. This applies above all to the rotor blades and is usually done by specialist disposal companies. In the case of rotor blades, which currently consist of glass fiber reinforced plastic (GRP), and in which carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are rarely present, the shredding is carried out with the help of saws.

CFRP parts can also be cut, but due to the harder material, a significantly higher wear of the tool and longer machining times must be assumed. Processes for the energetic comminution of rotor blades by means of cutting charges are also under development. During the sawing process, the blades are enclosed so that the resulting dust does not immediately enter the environment. The resulting dusts are captured by water and filtered out of the water in a subsequent process. A rotor blade is first dismantled transversely to the rotor blade axis and then, in a second step, mostly longitudinally (better transport geometries), CFRP-free areas can usually be separated well from those areas of the rotor blade that also contain CFRP. The localization of CFRP-free areas, however, is usually only possible by trial and error. Thus, specific information is often not available in the required depth of detail. The identification of the CFRP-free blade area of a rotor blade is therefore usually done visually, by higher material resistance during sawing or on the basis of experience or manufacturer knowledge.

After the disassembly of the rotor blades and the hubs, the nacelle including the drivetrain is disassembled. Depending on the later use of the wind turbine, either a direct transport of the nacelle as a whole, a temporary storage or a crushing of the nacelle on site can take place afterwards (analogous to the rotor). On-site disassembly is usually used for the secondary use of individual and spare parts. With regard to the on-site comminution, different statements were made by the actors. The procedure is apparently not standardized.

When dismantling the tower, a basic distinction must be made between concrete, steel tube, hybrid (concrete tower in the lower area and steel tower in the upper area) or lattice mast towers. Due to the rarity of lattice towers, only little experience is available. Basically, it can be assumed that this tower concept will also be rare in the future. The connecting elements of a lattice tower can easily be loosened so that individual sections (consisting of a certain number of lattice bars) can be lowered and dismantled on the ground. For the dismantling of a tubular steel tower made of individual steel sections arranged one above the other as well as for the dismantling of the steel sections of a hybrid tower, the individual sections are first separated from each other and then dismantled individually using the main crane. The steel tube tower is crushed, for example, with the aid of cutting torches. Other methods can also be used, such as cutting up the towers using an excavator. The demolition of concrete tower sections, on the other hand, is irreversible, so it is not possible to reconstruct a demolished concrete tower or the concrete tower section of a hybrid tower. Due to the current lack of alternative demolition methods, concrete towers are currently being demolished or blown up segmentally. In addition to concrete and steel (depending on the tower concept), non-ferrous metals such as aluminum from the tower internals are usually also generated when a tower is dismantled.

After the complete dismantling of the wind turbine, the foundation is dismantled. A distinction must be made between a standard flat foundation and a pile foundation. Regarding the scope of deconstruction, there are differing opinions as to whether the foundation should be deconstructed completely or only to a certain depth below the ground surface. In older permits, for example, there are often provisions which provide for the foundations to be dismantled only to a depth of 1.5 m below the surface. The background to the deviations is the different interpretation of the passage "Restoration of the original condition". Some stakeholders believe that this is to be understood as the original condition being completely restored with a view to unrestricted subsequent use of the land, while others conclude that the restoration of the original condition is sufficient if only agricultural use and management of the land can take place. The actual dismantling of a flat foundation can be carried out by means of blasting or an excavator. In the case of blasting, similar to the blasting of a tower, first of all a corresponding report must be made to the competent authority, which states that the blasting cannot cause any damage to neighboring installations, buildings or supply lines. For the blasting of a foundation lower vibrations can be assumed than for a tower blasting. For the actual blasting, holes must first be drilled in the foundation so that the explosive charges can detonate inside the foundation. The foundation is also secured with mats before blasting. After loose blasting, reinforcement steel and reinforced concrete are mostly separated and can be removed from the foundation pit using excavators. Remaining foundation components can also be collected using excavators. In addition to demolition by blasting, foundations can also be demolished using excavators. To do this, the foundation is first broken using a chisel hammer and the exposed fragments are then excavated.

The crane stand areas are dismantled in the same way. The rock ballast can be used as gravel (possibly after screening) in new projects, for example for access to wind turbines.

Forecast of wind turbine deconstruction

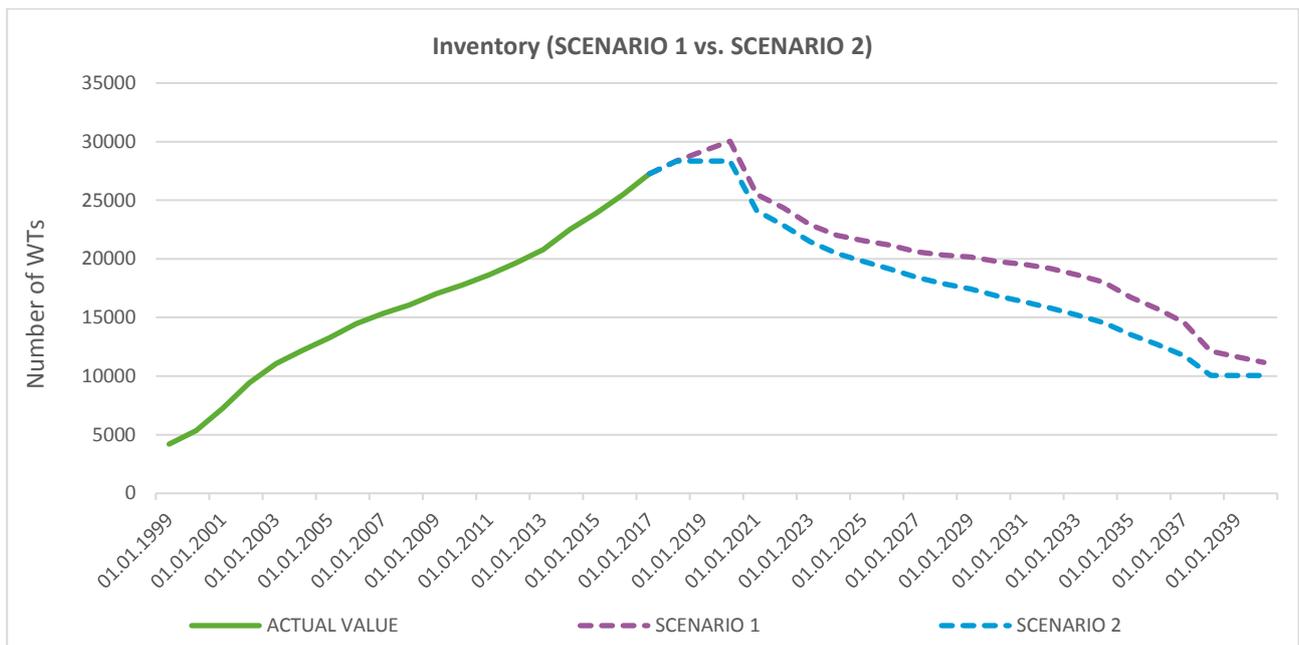
On the basis of an inventory survey and a design lifespan of 20 years, a deconstruction forecast was made up to 2040. The following two scenarios were defined for this purpose (see following figure):

- SCENARIO 1: Market development with full compliance with the German Federal Renewable Energy Law (EEG)

- SCENARIO 2: Market development while maintaining the overall performance of the reference year 2018

Since the basic findings of both scenarios are very similar and SCENARIO 1 seems more realistic, only SCENARIO 1 will be considered in the following. The different turbine models are clustered, i.e. groups of similar wind turbine models were formed (on the one hand differentiated by wind turbine type and on the other hand by tower type). Uncertainties exist with regard to the expected continued operation of installations beyond EEG funding and to premature dismantling. In the absence of empirical values, it is assumed for the forecasts that both effects will approximately balance each other out and that a 20-year service life is realistic.

Development of the wind turbines inventory in Scenario 1 and Scenario 2



Source: (Ramboll)

In both scenarios, the number of wind turbines is declining after an absolute maximum in 2020 despite initially rising or constant cumulative output. In both scenarios, the technical progress, i.e. the increase in the average output of the annual additional capacity, compensates for the permitted cumulative gross additional capacity - SCENARIO 1 according to EEG17, SCENARIO 2 according to deconstruction. It can be concluded that the absolute space requirement will decrease in perspective due to the significant increase in output per plant, which is a positive development.

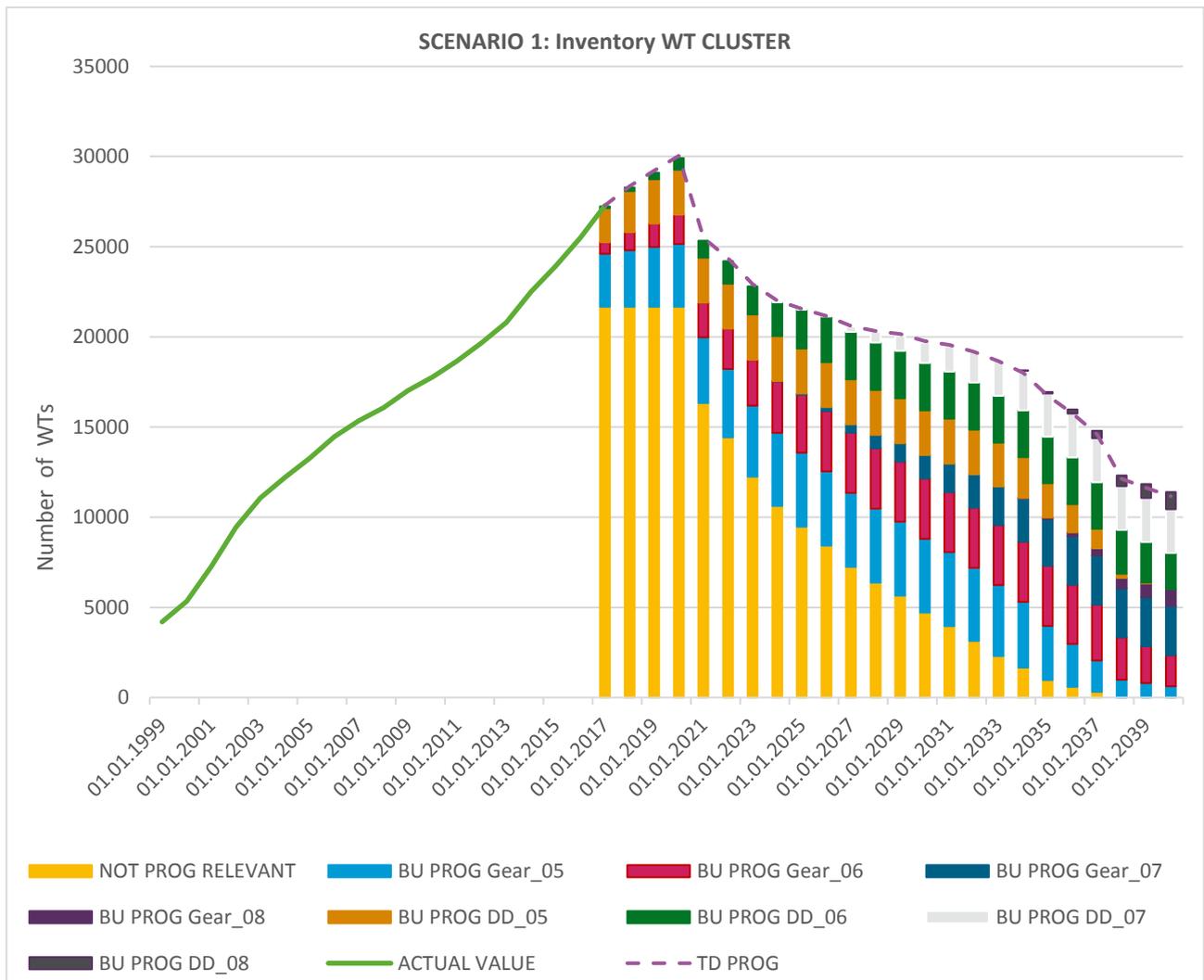
An intensified dismantling is only to be expected with the expiry of the first EEG from 2021.

Since all wind turbines installed before 2000 but subsequently included in the EEG will be dismantled in 2021, the number of turbines will fall significantly this year. These plants are predominantly small wind turbines with a comparatively low output of <450 kW, which are grouped together in the SWT cluster (small wind energy plants). As plants with an output of <750 kW are not part of the expansion corridors in the EEG17 and are therefore excluded from the tender model, any future expansion of these plants is by definition no longer included in the forecasts.

A comparison of the inventory forecasts of both scenarios shows a shift between the observed wind turbine clusters over time. In SCENARIO 1 with its constant gross addition defined by the EEG17, the clusters under consideration undergo a typical life cycle in their market relevance. The decreasing number of wind turbines in later clusters compared to earlier clusters can be explained by the market dampening caused by the defined expansion corridors in combination with the increasing

performance of wind turbines within the clusters (cf. following figure). . The cluster "Gear_05", for instance, represents WTs with gears, a rated power between 2300-3600 kW and an average rotor diameter between 107-120 m.

Development WT inventory by cluster in SCENARIO 1



Source: (Ramboll)

Waste forecasting based on market trends and material composition

On the basis of the clustering of the onshore WT inventory and the type and quantity of materials used per cluster, the composition of the onshore wind turbine inventory, a dismantling forecast and a forecast of the material returns to be expected were made.

Taking into account the input variables explained above, the expected annual waste quantities shown in the following table follow for SCENARIO 1.

Waste forecast for SCENARIO 1

Year	composite material (GFRP)	composite material (GFRP/CFRP)	Steel	Copper	Aluminium	Concrete	Electronic waste
	t	t	t	t	t	t	t
2020	0	0	0	0	0	0	0
2021	50,868	9	847,700	12,458	2,083	3,213,839	25,580
2022	29,816	9	421,403	6,806	906	1,694,005	12,685
2023	36,800	9	522,440	9,117	1,072	2,137,698	15,543
2024	29,802	18	407,432	7,462	838	1,750,188	12,341
2025	22,355	416	319,353	6,269	662	1,551,112	9,454
2026	20,310	469	295,495	5,589	604	1,454,516	8,597
2027	23,812	1,454	352,332	6,323	694	1,652,742	10,241
2028	17,445	1,206	258,577	5,561	540	1,285,948	7,867
2029	15,040	1,192	225,907	4,810	470	1,078,614	6,777
2030	18,720	1,022	280,550	7,076	629	1,607,386	8,708
2031	14,888	867	226,452	5,494	533	1,385,931	6,874
2032	19,246	1,514	288,547	6,872	714	1,855,381	8,609
2033	25,360	2,292	359,174	7,958	1,069	2,420,860	10,258
2034	33,953	3,581	440,832	8,326	1,631	2,981,945	11,653
2035	59,018	6,815	691,289	13,112	2,837	4,496,682	18,741
2036	52,144	6,954	601,338	10,203	2,605	4,044,531	15,702
2037	63,128	8,669	726,088	12,477	3,319	4,984,553	18,624
2038	73,584	10,611	836,216	14,161	3,745	5,527,403	22,015
2039	51,766	6,533	539,361	10,279	3,091	3,650,641	14,229
2040	41,990	5,709	439,549	8,253	2,438	2,891,676	11,740

Source: (Ramboll)

In summary, a proportional development of the expected waste quantities can be determined for all components with the exception of composite materials.

Thus, for the year 2021, a first maximum can be determined, which will steadily decrease until about 2030. Subsequently, the expected quantities of waste will rise significantly by 2037 and (due to the estimates for the extension rates and the service lifespan) fall slightly again in the two subsequent years.

For composite materials, which also contain CFRP in addition to GFRP, small quantities of waste are initially expected by around 2024. From 2025 onwards, relevant quantities of waste containing CFRP are expected to rise steadily in subsequent years and reach a maximum value of 73,500 tonnes in 2038. In the two following years the waste containing CFRP is expected to decline slightly again, which is attributable to the approaches for future plant expansion. Especially due to the described problems in finding a suitable approach for the material use per wind turbine cluster for composite materials containing CFRP, the waste forecast for this material group is subject to increased uncertainties.

For concrete, electrical waste and aluminum as well as, to a lower extent, for composite materials containing CFRP, it can also be stated that the maximum waste quantities in 2038 are higher than the quantities from 2021. This can be seen as an indicator of a disproportionate use of these substances in newer wind turbine generations. In terms of installed capacity, the material costs are reduced considerably, which is an ecologically advantageous result of technological progress. In terms of

concrete, this is also very well reflected in the significantly increasing foundation volume and the increased use of hybrid towers.

The described waste forecast did not contain information on rare earths (used in selected transmissions of wind turbines) in waste streams, as their amount is rather small. However, the recycling potential of rare earths is very interesting, as in Germany currently no feasible recycling methodology is available. Considering dismantling time and usage time of wind turbines containing a high share of rare earths, we forecasted approximately 100 to 200 tons of SEE-containing wastes per year from 2033 to 2040.

Finally, it can be stated that concrete (approx. 83.4%) followed by steel (approx. 14.7%) is dominant in relation to the pure waste masses. The composite materials which can be classified as rather problematic from the point of view of high-quality recycling, account for only about 1.1% (GRP only, no CFRP) plus 0.1% (GRP and CFRP) of the total amount of waste. Other metallic wastes such as copper, aluminum and electrical scrap together account for approx. 0.7% of the total amount of waste and thus represent a small but comparatively valuable mass fraction.

Forecast of dismantling costs in comparison to existing security payments

Within this chapter, dismantling costs are estimated on the basis of the good dismantling and recycling methods described above. For this purpose, a calculation tool was created, which is explained in Annex 11.6 with regard to the functions and approaches (consideration of preparatory work, dismantling of the WTG incl. tower, dismantling of the foundations, disposal of the materials). In the following, the average dismantling costs for the individual wind turbine and tower clusters are calculated. The dismantling costs were determined for both cluster categories, so that the total costs for the dismantling of a wind turbine from cluster X with consideration of tower cluster Y are calculated on the basis of a matrix containing all possible combinations.

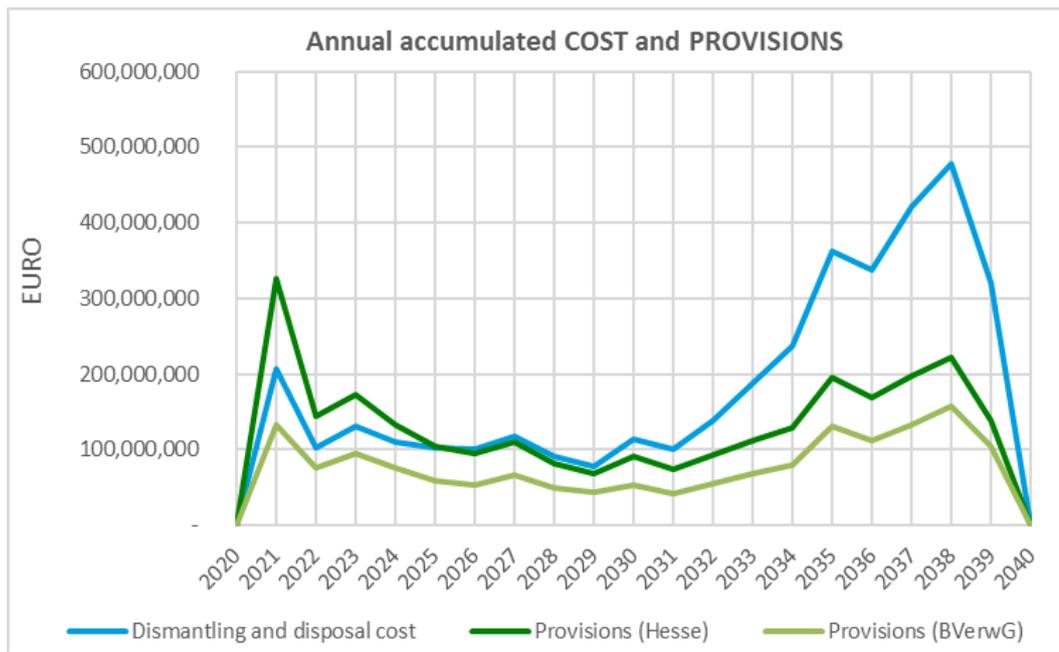
Since the actually available financial securities for the dismantling of wind turbines could not be researched, a comparison as made of the dismantling costs with accepted approaches on calculation methods for the amount of the securities². However, it is quite possible that not for all wind turbines a security was provided.

An inflation rate of 2% p.a. has been assumed for costs and revenues, with 2018 being the base year. In the forecast, provisions are not subject to inflation or interest, as these are often bank guarantees that do not bear interest. To identify possible financing gaps, the annual costs are compared with the expected sums of the provisions according to the HESSE and BVerwG models (see figure below).

² Hesse: hub height of the wind turbine (m) x 1000 = amount of security deposit (€)

Federal Administrative Court: € 30,000 per megawatt of installed electrical capacity

Annual comparison of dismantling and disposal costs with provisions payments (SCENARIO 1)



In 2021, the first year of the expected deconstruction of EEG plants, most plants will be dismantled in the forecast period in terms of their number, as in addition to the wind turbines established in 2000, all plants retroactively included in the EEG in 2000 and many wind turbines from the SWTs cluster are due for deconstruction. Compared with subsequent years, this one-off effect is reflected in significantly higher cumulative dismantling and disposal costs as well as in higher provisions under the Hesse model.

In the following years up to 2031, the expected dismantling costs will fluctuate by a value of around 100 million euros. From 2031 to 2038, a sharp increase in dismantling and disposal costs is to be expected, driven in particular by the higher towers of the tower clusters (Stahl_04, Stahl_05, Hybrid_02 and Hybrid_03) installed from 2011 and due for dismantling from 2031. In 2039 and 2040, the only years influenced by the scenarios of the market forecast, the dismantling and disposal costs in both scenarios will fall sharply in line with the declining additions in both scenarios from 2018 onwards.

Overall, when comparing the forecast dismantling and disposal costs with both models for calculating provisions, considerable financing gaps are to be expected. Whereby the HESSEN model is the more optimistic of the two estimates. The temporal course of the extent of these financing gaps can be roughly divided into three phases.

In the first phase 2021 to 2025, the provisions under the HESSEN model exceed the expected costs; the provisions under the BVerwG model are already below the cost forecasts. Since not all of the provision payments are available and the calculations according to the BVerwG model already indicate financing gaps, a slight underfinancing of deconstruction and waste disposal can be expected already in this period.

- In the first phase 2021 to 2025, the provisions under the HESSE model exceed the expected costs; the provisions under the BVerwG model are already below the cost forecasts. Since not all of the provision payments are available and the calculations according to the BVerwG model already indicate financing gaps, a slight underfinancing of deconstruction and waste disposal can be expected already in this period.

- In the second phase from 2026 to 2030, the cumulative provisions under both models are below the respective financing requirements. Financing gaps are likely to occur in this period. Their amount will be higher than that of the first phase.
- In the third phase from 2031 onwards, the expected dismantling and disposal costs will rise sharply and disproportionately compared with the provisions under both models. Therefore, considerable financing gaps are to be expected in these years and under current regulation. It is therefore recommended to critically review the provisions and the calculation formulae.

Summary of regulatory requirements for dismantling and disposal of wind turbines

In the context of the dismantling of wind turbines, there is in our opinion a need for regulation with regard to the following aspects:

- Clarification of the scope of existing licensing obligations
 - Scope of deconstruction, in particular with regard to the deconstruction of foundations and ancillary facilities, such as cable systems, storage areas or access roads;
 - Applied dismantling methods (preferably by crane, conditions for blasting, removal only in exceptional cases) for the respective plant concepts, considering environmental compatibility, avoidance of damage to land, safety considerations, noise protection and an appropriate cost/benefit ratio;
- Requirements regarding safety and occupational safety aspects (in particular, but not exclusively, on the part of the dismantling companies), including, evidence of training certifications (e.g. height training, switching authorization) or test badges (e.g. for work equipment); the same standards should apply for construction and dismantling and be applied in practice;
- Data (quantities, masses, drawings, etc.) provided by the operator of a wind farm - or the corresponding data to be made available by the manufacturer at the sale of the wind farm - which are required for the dismantling process.

In addition to these technical aspects of dismantling, there is a possible need for further regulations for the dismantling of wind turbines (and also for the disposal discussed in the next section) due to the possible medium-term financing gap between the financial securities provided by the wind farm operators and the expected dismantling costs in the future. The operator bearing the deconstruction obligation must finance the deconstruction, even if it significantly exceeds the provision payments.

In the area of waste disposal, the current legal situation already provides for comprehensive obligations under waste management law. As described in detail in Chapter 7, there is a need for regulation in the field of waste management with regard to the following material flows:

- Implementation of existing disposal obligations in practice, e.g. separation of certain material flows;
- Present deficits with regard to high-quality recycling (see Chapter 7) of
 - Concrete flows from wind turbine (tower and foundations), e.g. due to lack of use and acceptance of recycled building materials;
 - SEE magnets from wind turbines (synchronous generators), e.g. due to lack of quantities for economic recycling;

- Waste containing GFRP and CFRP from wind turbines (rotor blades), e.g. due to lack of specifications for professional processing/decomposition of rotor blades on site.

Measures and recommendations for a resource-saving dismantling and a high-quality utilization of wind turbines

In order to control the dismantling and recycling of wind turbines in general and to ensure environmentally compatible and resource-conserving recycling of the resulting material flows, it is advisable to take measures to safeguard the environment and resources. The following recommendations were derived accordingly.

- Creation of guidelines for the dismantling and recycling of wind turbines

It is recommended to set up a federal working group (so-called Bund-Länder-Arbeitskreis), e.g. within the Federal/states committees on Immission control (LAI) or waste (LAGA) respectively, in which guidelines for the dismantling and recycling of wind turbines are drawn up considering the experience of the licensing authorities. The diversity of the existing installations, the deviating geological conditions and the strong position of the federal states indicate that nationally coordinated but flexible recommendations and enforcement guidelines are needed. The guideline to be drawn up is intended to provide assistance to authorities and plant operators in the event of dismantling and to support good and environmentally compatible dismantling practice.

Technical guidelines would be a flexible instrument and could provide non-binding but effective instructions for the actors involved and contain references to existing laws and standards, e.g. on occupational health and safety during decommissioning.

In summary, it should be noted that the authors of this study believe that the establishment of guidelines for decommissioning, including information for authorities on the scope for licensing would for the time being appear to be more useful than the creation of new laws and regulations. Nonetheless, the option of designing such guidelines as an administrative provision would also be conceivable and a measure if it turns out that simple guidelines do not ensure good decommissioning practice. The implementation of such guidelines in practice as well as a stronger enforcement of the existing legal requirements should, however, have priority. Requirements for dismantling must also be implemented a way that the provisions created and to be created in the future correspond to the economic framework conditions.

- Creation of technical standards for certain dismantling and disposal activities

Certain technical details of decommissioning and recycling of wind turbines are not yet standardized and could be developed by standardization bodies. Guidelines of the authorities could refer to existing standards and uncover further standardization requirements (e.g. for sawing/shredding rotor blades, design of rotor blades suitable for recycling, material requirements for resulting material flows, specifications for interim storage, etc.). The available research results make it clear, however, that standards already exist for many work steps, which must be observed or, if necessary, adapted. There is a need for further examination here, which could take place in the course of the development of the guidelines mentioned above.

- Examination of the introduction of specific elements of product responsibility for rotor blades

Rotor blade waste is extremely difficult to recycle due to the fiber composites and requires special treatment. A regulation of product responsibility under waste law could contribute to a fair allocation of disposal costs for this comparatively homogeneous waste stream, which must be treated in a similar way, and in the long term ensure an industry and product-specific as well as environmentally friendly

and high-quality waste treatment. Therefore, the introduction of the following specific elements of product responsibility for rotor blades should be examined:

- Information and labelling obligations regarding the material composition of the rotor blades;
- Product and industry-specific technical and organizational approach (industry solution);
- Separate processing with the aim of quality assurance of recycled materials and refuse-derived fuels;
- Commitment to high-quality recycling and ensuring safe disposal;
- Inclusion of the manufacturer's knowledge and processing technologies adapted to the technological change on the product side;
- Allocation of disposal costs and organizational obligations during disposal in line with the polluter-pays principle

The advantages of product responsibility for rotor blades face several challenges:

- despite the basic possibility and the advantages of country-specific requirements, it should be noted that many wind turbine manufacturers are active throughout Europe. An isolated regulation in Germany is possible, but is in latent tension with the fundamental idea of an EU internal market;
- Format and storage location (manufacturer, operator, authority) as well as the competition relevance of the data to be collected;
- Long service lives of rotor blades are an obstacle to individual product responsibility
- The discussion on disposal options for dressing materials (GFRP/CFRP) also extends to other products made of such materials and may have to be addressed more specifically for material flows than for products.

Overall, there is a significant need for a long lead time for the implementation of such measures. One success factor is the design of a product responsibility respectively the introduction of only partial elements of it in coordination with the manufacturers of the industry.

- Need for optimization in the management of specific waste streams

Possible problems in the disposal of material flows from wind turbines, which after processing are equivalent to material flows of other origin, should not be covered in any guidelines/legal requirements. This should be emphasized, as part of the regulatory requirement concerns material flows whose disposal is currently problematic overall.

This includes, for example, the need for research into the bundling of waste with a similar composition of economically strategic and environmentally relevant metals, e.g. SEE-containing materials such as wind turbine gearboxes, and the development of suitable concepts for the recycling of neodymium or other SEE, which is generated decentralized in different sectors.

- Economic and organizational optimization needs

In view of the medium-term threat of a financing gap between actual costs and security deposits formed, the method for calculating the security deposit could be revised and specified and

standardized in a deconstruction guideline / regulation / etc. The basis of the calculation costs must be discussed. In addition to the existing calculation bases (hub height of the wind turbine, installed capacity, etc.), the investment sum for the wind turbine construction could be used as an orientation. However, there is the danger that a complex construct could be generalized by simplified formulas for the safety deposit (in the case of similar wind turbines, the investment price achieved is independent of dismantling costs). A regular review of the safety performance by an independent expert (e.g. at intervals of 10, 15, 18, 19 years, subsequently annually) appears more appropriate. In addition, some core aspects such as the deconstruction requirements proposed in the project should be firmly defined (complete deconstruction of the foundations, etc.). Furthermore, proceeds from the sale of components or the recycling of secondary raw materials with a positive market value after the dismantling of the wind turbines should not be able to influence the security deposit today, as the future market values cannot be reliably estimated.

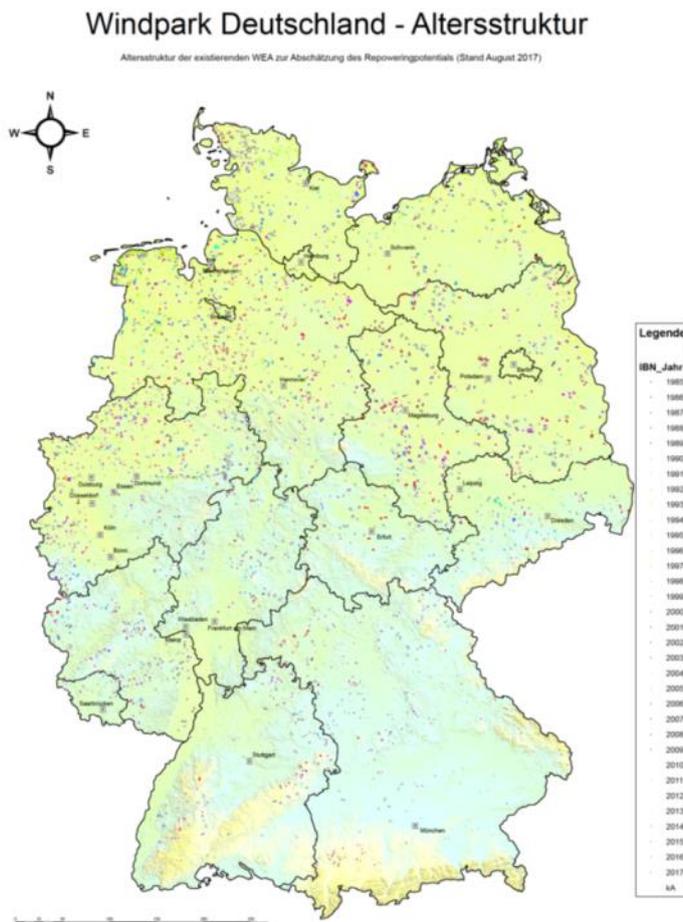
Also, the dismantling requirements must be implemented in such a way that the provisions formed and to be formed in the future correspond to the general economic conditions. If the requirements are chosen and implemented so ambitiously that high reserves would have to be formed, this can be corrected in the case of disproportionality by the courts or lead to evasive behavior on the part of the actors involved, which can only be counteracted to a limited extent by increased controls.

1 Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

1.1 Hintergrund

Ende des Jahres 2016 standen deutschlandweit 27.270 Windenergieanlagen, die mit rund 40% den größten Beitrag zur Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland leisten. Es konnte ein deutlicher Anstieg des Nettozubaues an Windenergieleistung (plus 4.140 MW gegenüber 2015) verzeichnet werden, auch wenn die Windturbinen an Land mit 65,0 TWh im Jahr 2016 etwa 8,3 Prozent weniger Windstrom lieferten als noch im Jahr 2015 (70,9 TWh).

Abbildung 1: Verteilung der Windenergieanlagen inkl. Altersstruktur in Deutschland



Quelle: (Ramboll)

Da es sich hier um einen relativ jungen Industriezweig handelt (erste Inbetriebnahmen in den 90er Jahren) gibt es noch wenig Erfahrungen auf dem Gebiet des Anlagenrückbaus, welcher ab etwa 2020 verstärkt einsetzen wird, unter anderem aus Gründen der Funktionstüchtigkeit, Standsicherheit und Wirtschaftlichkeit. Hinzu kommt die Substitution noch funktionstüchtiger Anlagen durch leistungsstärkere-, das sogenannte Repowering, das zu weiteren Rückbauaktivitäten führen wird, wobei in diesem Fall Teile der WEA an anderer Stelle, beispielsweise im Ausland, wiederverwendet werden können. Neben dem Rückbau an Land wird auch die Außerbetriebnahme von Offshore-Windenergieanlagen in etwa 15 Jahren an Bedeutung gewinnen.

Der Rückbau von WEA unterfällt grundsätzlich Baurecht und ggfs. Immissionsschutzrecht. Unter anderem verpflichtet das BauGB die Betreiber zur Bereitstellung von Sicherheitsleistungen, um den ursprünglichen Zustand der bebauten Fläche wiederherzustellen. Allerdings wurden für den Rückbau

bisher keinerlei abfallrechtliche Zielvorgaben und damit auch keine klaren Entsorgungswege für die einzelnen Materialien definiert. Durch ein differenziertes Recycling können Metalle wie Stahl, Kupfer oder Aluminium metallurgisch verwendet werden. Glas- und kohlenstoffverstärkte Kunststoffe der Rotorblätter und der Gondel hingegen sind nur teilweise stofflich rezyklierbar und werden daher häufig auch energetisch verwertet). Beton aus dem Turm und den Fundamenten werden zumeist als Sekundärrohstoffe im Straßen- und teilweise auch im Hochbau genutzt.

Hinsichtlich der hochwertigen Verwertung ist mit folgenden Herausforderungen zu rechnen:

a) Verbundwerkstoffe aus Rotorblättern und Gondeln:

Faserverbundstoffe wie glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) sowie teilweise auch carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) haben mit einem Anteil von bis zu 70% in Rotorblättern einen signifikant hohen Massenanteil. Die stoffliche Verwertung der GFK, die vor allem in Anlagen aus den 1990er Jahren eingesetzt wurden, ist jedoch unwirtschaftlich, da rezyklierte Glasfasern und duroplastische Kunststoffe eine vergleichsweise schlechte Qualität aufweisen und die Recyclingkosten im Vergleich zum Rohmaterialpreis hoch sind. Bislang hat sich somit die stofflich/energetische Verwertung in Zementwerken etabliert. Das Recycling von Carbonfasern wird bereits in wenigen Anlagen in Europa durchgeführt, wenngleich zu geschlossenen Materialkreisläufen für rezyklierte Fasern noch Forschungsarbeit erforderlich ist. Ein Problem ist der Transport ganzer Rotorblätter bzw. die Zerkleinerung sowie das Abtrennen der wertvollen Fasern aus alten Flügeln vor Ort. Seitdem faserverstärkte Kunststoffe als hochkalorische Abfälle nicht mehr auf Deponien beseitigt werden dürfen, hat die Verwertung von glasfaserverstärkten Kunststoffen in Zementwerken an Bedeutung gewonnen. Carbonfaserverstärkte Materialien können nach derzeitigem Stand der Technik nicht energetisch verwertet werden.

b) Gondel:

Die Gondel ist jener Teil der Anlage, der die Hauptsysteme (Rotor, Generator und je nach Anlagenmodell auch Getriebe) und die Subsysteme (Steuerung, Hydraulik, Kühlung) umfasst. Sie besteht zumeist aus einem Gehäuse aus GFK und Aluminium. Die genannten Haupt- und Subsysteme enthalten zahlreiche wertvolle Ressourcen wie Gusseisen, Stahl, Chromstahl, Kupfer, Aluminium, Elastomere usw. Zudem sind in WEA ohne Getriebe aufgrund der teilweise benötigten Permanentmagnete (Anm.: Getriebelose WEA können entweder magnetisch oder elektrisch erregt werden), für die es derzeit flächendeckend an einem Recyclingverfahren fehlt, hohe Anteile an Seltenen Erden zu finden. Diese enthalten zum Beispiel Neodym, Dysprosium, Terbium oder auch Praseodym. In der Schaltanlage, welche die elektrische Energie verteilt bzw. umspannt, ist meist das klimaschädliche SF₆ (Schwefelhexafluorid) als Isoliergas enthalten., Dieses hat laut F-Gas Verordnung mit einem Treibhauspotential von 22.800 CO₂ Äquivalenten das stärkste bekannte Treibhausgas darstellen.

c) Materialvielfalt:

Die Vielzahl an unterschiedlichen Bauweisen sowie die Verwendung verschiedener Materialien sind kennzeichnend für WEA. So werden zum Beispiel auch Werkstoffe auf Basis von Polyvinylchlorid, Balsaholz, Aluminium und Coatingmaterialien verwendet. Außerdem ist der Einsatz von Kohlenstoffnanofasern (CNF) unter anderem in Elektroden und Kohlenstoffnanoröhren (CNT), die beispielsweise bei der Vereisung der Rotorblätter Abhilfe schaffen sollen, geläufig.

1.2 Zielsetzung

Das gegenständliche Projekt verfolgt im Lichte des europäischen 7. Umweltaktionsprogramms („Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten“)³ und des deutschen

³ <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/7eap/de.pdf>

Ressourceneffizienzprogramms II („*Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*“)⁴ die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Produkt- bzw. Betreiberverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten für Windenergieanlagen (WEA) und deren Bauteile. Die Ziele des 7. Umweltaktionsprogramms sind dabei:

- Schutz, Erhaltung und Verbesserung des Naturkapitals der EU;
- Übergang zu einem ressourceneffizienten, umweltschonenden und wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaftssystem;
- Schutz der europäischen Bürger vor umweltbedingten Belastungen,
- Gesundheitsrisiken und Beeinträchtigungen ihrer Lebensqualität;
- Maximierung der Vorteile aus dem Umweltrecht der EU;
- Verbesserung der Faktengrundlage für die Umweltpolitik;
- Sicherung von Investitionen für Umwelt- und Klimapolitik und angemessene Preisgestaltung;
- Verbesserung der Einbeziehung von Umweltbelangen und der Politikkohärenz;
- Förderung der Nachhaltigkeit der Städte in der EU;
- Verbesserung der Fähigkeit der EU, wirksam auf regionale und globale Umwelt- und Klimaprobleme einzugehen.

Hinsichtlich dieser Ziele sollen mögliche Maßnahmen und Anreize zur Förderung eines hochwertigen Recyclings von Wertstoffen geprüft werden. Dazu sollen folgende Aspekte dargestellt werden:

1. Status quo des Rückbaus und der Entsorgung von WEA
2. Abfall- und Kostenprognose für den Rückbau von WEA im Zeitraum bis 2040
3. Entwicklung von technischen Anforderungen an einen umweltverträglichen Rückbau und eine hochwertige Verwertung der WEA und deren Bauteile
4. Empfehlungen für die organisatorische und finanzielle Umsetzung eines ressourcensichernden Rückbaukonzepts

Für die in WEA enthaltenen Sekundärrohstoffe, die nach Außerbetriebnahme derzeit noch nicht bestmöglich verwertet werden, gilt es den Stand der Technik bezüglich einer möglichen Kreislaufwirtschaft zu ermitteln, die Anwendbarkeit der Betreiberverantwortung mit Blick auf die Akteure und Abfallfraktionen zu analysieren Empfehlungen für eine nachhaltige Verwertung sämtlicher Bestandteile zu formulieren.

Vor diesem Hintergrund sollen im Zuge des Forschungsprojektes unter Berücksichtigung der gesetzlichen Grundlagen für den Bau und den Betrieb von WEA sowie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, **konzeptionelle Vorschläge für ein hochwertiges und vollständiges Anlagenrecycling**, welches ökologisch sinnvoll und ökonomisch tragfähig ist, entwickelt werden. Zudem soll eine klare Zuweisung von Organisationspflichten von Anlagenherstellern, Betreibern und Besitzern **im Kontext ökologischer und ökonomischer Auswirkungen**, unter Einbindung eines fachlichen Beirates, diskutiert werden.

⁴ http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf

2 Status quo des Rückbaus und der Entsorgung

2.1 Rechtliche Vorgaben für Rückbau und Entsorgung von WEA

Dieses Kapitel ist wie folgt gegliedert:

- Zunächst werden die beiden anwendbaren Genehmigungsregimes vorgestellt;
- Dann werden die relevanten Umweltpflichten für den Bereich Rückbau und den Bereich Entsorgung der entstehenden Abfälle diskutiert;
- Schließlich erfolgen Ausführungen zur Durchsetzung der Pflichten; hierbei ist zu beachten, dass der Vollzug der bau- und immissionsschutzrechtlichen Regelungen durch die Bundesländer generell unterschiedlich erfolgt (einzelne Beispiele zur Handhabung des behördlichen Vollzugs werden in Kapitel 4.2.4.1 dargestellt).

2.1.1 Zwei anwendbare Genehmigungsrechtsregimes für WEA: Baurecht und Immissionsschutzrecht

Die Errichtung baulicher Anlagen unterliegt dem Baurecht und – vorbehaltlich geregelter Ausnahmen – einer Genehmigung nach den Landesbauordnungen der Bundesländer. Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 Nr. 1 BImSchG unterfallen dem Immissionsschutzrecht; bei Erfüllen der Anlagenbeschreibung (§ 4 Abs. 1 BImSchG; 4. BImSchV) bedarf es einer Genehmigung nach dem BImSchG.

Windenergieanlagen sind sowohl bauliche Anlagen als auch Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 BImSchG und entsprechend Anhang 1, Nr. 1.6 der 4. BImSchV **ab einer Gesamthöhe von mehr als 50 m** nach dem BImSchG genehmigungsbedürftig.

Die grundsätzliche **Doppelregelung** sowohl nach Baurecht wie nach Immissionsschutzrecht ist

- im Falle des Erfüllens der Anlagenbeschreibung der 4. BImSchV gesetzlich derart gelöst, dass bei Genehmigungsbedürftigkeit nach BImSchG eine Baugenehmigung aufgrund der **immissionsschutzrechtlichen Konzentrationswirkung** aus § 13 BImSchG miteingeschlossen wird:

Die Genehmigung schließt andere die Anlage betreffende behördliche Entscheidungen ein, insbesondere öffentlich-rechtliche Genehmigungen, Zulassungen, Verleihungen, Erlaubnisse und Bewilligungen (...).

Dies bedeutet, dass inhaltlich baurechtliche Vorgaben im Genehmigungsverfahren zu berücksichtigen sind;

- im Falle fehlender Genehmigungsbedürftigkeit nach BImSchG dadurch gelöst, dass zusätzlich zu baurechtlichen Anforderungen inhaltlich die Regelungen der §§ 22-25 BImSchG zu **nicht-genehmigungsbedürftigen Anlagen** heranzuziehen sind, die zusätzlich zum Baurecht inhaltlich eigenständige Pflichten begründen (allerdings deutlich weniger weit gehen als die Vorgaben der §§ 4-12 BImSchG zu genehmigungsbedürftigen Anlagen). § 22 Abs. 2 und § 23 BImSchG enthalten dabei Ermächtigungen zum Erlass von Rechtsverordnungen; hierzu ist im Bereich von WEA bislang kein Gebrauch gemacht worden.

Zusammenfassend bedürfen WEA

- einer Baugenehmigung, wenn sie eine Gesamthöhe von bis zu 50 m haben⁵,
- einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, die inhaltlich die baurechtliche Zulässigkeit mit umfasst, inklusive einer Baugenehmigung, wenn sie eine Gesamthöhe von mehr als 50 m haben.

Zu beachten ist die Übergangsvorschrift des § 67 Abs. 9 BImSchG, wonach unter anderem Baugenehmigungen für WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 Metern, die bis zum 1. Juli 2005 erteilt worden sind, als Genehmigungen nach dem BImSchG gelten.

Weil sich an das jeweilige Genehmigungsregime verschiedene Folgen sowohl im Bereich des Rückbaus als auch im Bereich der Entsorgung entstehender Bau- und Abbruchabfälle anschließen, werden im Folgenden bei der Ermittlung relevanter Umweltpflichten und Fragen des Vollzugs zwischen jeweils diesen beiden Typen von Genehmigungsregimes unterschieden.

2.1.2 Relevante Umweltpflichten im Bereich Rückbau sowie deren behördliche Überwachung und Durchsetzung

Die übliche Betriebsdauer einer WEA beträgt 20 (bei neueren Anlagen bis zu 25) Jahre (siehe Anlage B.2). Nach dem Ende dieses Lebenszyklus können die Anlagen in der Regel nicht mehr genutzt werden (es sei denn, ein neues Gutachten zur Standsicherheit erlaubt eine Genehmigung des Weiterbetriebs – es ist davon auszugehen, dass bundesweit etwa 200 Anlagen im Bestand existieren, die älter sind als 25 Jahre). Im Fall der Nutzungsaufgabe müssen WEA entweder komplett zurückgebaut werden oder es kommt zum Ersatz einer alten WEA durch eine neue (sog. Repowering), wobei auch im letzteren Fall üblicherweise die bisher genutzte Anlage weitestgehend oder vollständig zurückgebaut wird.

2.1.2.1 Pflicht zum Rückbau einer baurechtlich genehmigten aufgegebenen WEA

Eine gesetzlich begründete generelle, grundsätzliche Pflicht zum Rückbau einer dauerhaft aufgegebenen baulichen Anlage besteht weder nach allgemeinem Baurecht noch nach den Vorgaben des BImSchG für nicht-genehmigungsbedürftige Anlagen (§ 22-25 BImSchG).

Verpflichtungserklärungen zum Rückbau im Geltungsbereich von § 35 BauGB

Soweit die WEA im Außenbereich ohne Geltung eines qualifizierten Bebauungsplans errichtet wurden, sind entsprechend des 2004 eingeführten § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB bei nach 2004 errichteten WEA **Verpflichtungserklärungen** zu Rückbau der Anlage und zur Beseitigung von Bodenversiegelungen abzugeben und nach Satz 3 derselben Vorschrift zur Sicherung des Rückbaus sind von der Behörde Sicherheitsleistungen einzufordern.

Als Möglichkeiten zur Sicherstellung kommen neben der Baulast insbesondere Grundpfandrechte (Grundschild, Hypothek) und andere Sicherheitsleistungen im engeren Sinne wie beispielsweise Bankbürgschaften, Hinterlegung oder Verpfändung in Betracht. Es steht im Ermessen der Genehmigungsbehörde, welches der Sicherungsmittel das geeignete ist. Die Höhe der Sicherheitsleistung orientiert sich an den voraussichtlichen Kosten, die für den Rückbau der Anlage und die Beseitigung der Bodenversiegelung aufzuwenden sind (siehe auch 2.2.3).

Ziel von § 35 Abs. 5 BauGB ist es, die Beeinträchtigung der Landschaft durch aufgegebenen Anlagen mit einer zeitlich begrenzten Nutzungsdauer entgegenzuwirken. Nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts führt die Rückbauverpflichtungserklärung nicht zu einer eigenständig

⁵ In den Bauordnungen der meisten Bundesländern gibt es Regelungen, wonach Klein-Windenergieanlagen, üblicherweise bis zu einer Höhe von 10-15 m, von der Genehmigung – nicht aber von den inhaltlichen baurechtlichen Vorgaben! - freigestellt sind; über den in Deutschland vorhandenen Bestand und auch die Materialzusammensetzung solcher Kleinanlagen gibt es nur wenige Informationen. Derartige Klein-Windenergieanlagen bleiben bei der folgenden Untersuchung außer Betracht.

vollstreckbaren Pflicht mit dinglicher Wirkung, andererseits besteht aber keine Möglichkeit des Erklärenden, sich einer Rückbauaufforderung zu widersetzen (BVerwGE 144, 341, Rdnr. 11, kritisch hierzu (Seibert 2019, S. 150 ff.)).

Verpflichtungserklärungen zum Rückbau außerhalb des Geltungsbereichs von § 35 BauGB

Für ältere Anlagen gelten die Vorschriften des § 35 Abs. 5 Sätze 2 und 3 nicht. Auf Anlagen außerhalb des Geltungsbereichs des § 35 BauGB (also solche, die entweder im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans oder im unbeplanten Innenbereich liegen) können sie nicht analog angewendet werden (Seibert 2019, S. 217)⁶. Inwieweit die Verpflichtung zur Abgabe entsprechender Erklärungen zum Gegenstand einer Nebenbestimmung zur Baugenehmigung gemacht werden kann, ist streitig (verneinend unter Verweis auf § 36 VwVfG (Gaßner/Viezens 2018, dort mit Nachweisen zur Gegenposition); siehe aber zur Praxis auch Kapitel 2.2.3). Wohl aber können auf der Basis von § 9 Abs. 2 BauGB planungsrechtlich Bedingungen – einschließlich Festlegungen zu Rückbauverpflichtungen bei zu erteilenden Genehmigungen vergleichbar § 35 Abs. 5 BauGB – gesetzt werden (Seibert 2019, S. 224ff.). Ebenfalls möglich ist eine Festsetzung in Bebauungsplänen, wonach die Errichtung neuer WEA nur zulässig ist, wenn andere Anlagen innerhalb einer angemessenen Frist zurückgebaut werden (§ 249 Abs. 2 BauGB), womit der Rückbau alter Anlagen Aufgabe neuer Investoren würde (Gaßner/Viezens 2018).

Möglichkeit der bauaufsichtsrechtlichen Anordnung?

Wie beschrieben, besteht eine gesetzlich begründete generelle, grundsätzliche Pflicht zum Rückbau einer dauerhaft aufgegebenen baulichen Anlage nach allgemeinem Baurecht nicht. Stattdessen entspricht es der Konzeption der Bauordnungen der Bundesländer, dass es in das Ermessen der zuständigen Behörden gestellt ist, diesbezüglich bauaufsichtsrechtliche Anordnungen zu treffen. Inwieweit derartige Anordnungen inhaltlich auf den kompletten Rückbau einer WEA gerichtet sein könnten, wird nicht einheitlich beurteilt: Während (Gaßner/Viezens 2018) davon ausgehen, dass die Voraussetzungen für entsprechender Anordnungen nach den Bauordnungen der meisten Bundesländer (mit Ausnahme Baden-Württembergs) regelmäßig nicht vorlägen und lediglich bei einem äußerlichem Verfall eine Beseitigung der Anlage angeordnet werden könnte, geht etwa (Seibert 2019) bei endgültig aufgegebenen Anlagen überzeugend von formeller und materieller Baurechtswidrigkeit aus und hält die Voraussetzungen für behördliche Rückbauanordnungen damit für gegeben.

Inwieweit ein Vorgehen aufgrund des BBodSchG (namentlich Anordnungen auf der Basis von § 10) möglich ist, ist bislang nicht geklärt. Fraglich wäre insbesondere, inwieweit durch eine dauerhaft aufgegebenen WEA „schädliche Bodenveränderungen“ verursacht werden, also gemäß § 2 Abs. 3 BBodSchG „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen.“

Zeitpunkt der Aufgabe

Der Zeitpunkt der dauerhaften Aufgabe der Nutzung ist nach dem Willen des Betreibers und der Verkehrsanschauung zu beurteilen. Soweit sich der Betreiber ausdrücklich äußert oder eine Verpflichtungserklärung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB ggf. in Zusammenschau mit der Genehmigung eine zeitliche Dimension enthält, dürften diese Erklärungen maßgeblich sein. Soweit diese fehlen sollte, sind der Wille des Betreibers und die Verkehrsanschauung zu ermitteln. Hier dürfte nach

⁶ Eine Besonderheit besteht im Land Sachsen-Anhalt, wo § 71 Abs. 3 Satz 2 der LBauO bestimmt: „Die Bauaufsichtsbehörde hat bei Anlagen, (...) die ausschließlich einem Zweck dienen und bei denen üblicherweise anzunehmen ist, dass wirtschaftliche Interessen an einer Folgenutzung der zu genehmigenden Anlage nicht bestehen, wie (...) Windkraftanlagen (...) die Erteilung der Baugenehmigung von der Leistung eines geeigneten Sicherungsmittels abhängig zu machen, durch das die Finanzierung der Kosten des Rückbaus der Anlagen bei dauerhafter Aufgabe der Nutzung gesichert wird. Diese bauordnungsrechtlich motivierte Regelung ist zumindest nach ihrem Wortlaut nicht auf den unbeplanten Außenbereich beschränkt.“

unserer Auffassung die Besonderheiten von WEA es rechtfertigen, vom eingeführten „Zeitmodell“ des BVerwG abzuweichen, wonach u.a. innerhalb eines Jahres nach Nutzungsaufgabe eine den Bestandsschutz aufrechterhaltende Vermutung der Wiederaufnahme besteht und erst nach Ablauf von zwei Jahren nach Aufgabe der Nutzung eine Regelvermutung für die Dauerhaftigkeit der Aufgabe spricht (siehe ausführlich (Seibert 2019, S. 36 ff. mit Nachweisen aus der Rechtsprechung)).

Ausgestaltung/Maßstab der Rückbaupflicht

Aus dem BImSchG ergeben sich für nicht-genehmigungsbedürftige Anlagen (§ 22-25 BImSchG) keine Pflichten zur Gestaltung der Stilllegungs-/Rückbauphase. Es verbleibt daher für die Ausgestaltung der Pflichten

- bei der allgemeinen Regel, dass bei Änderung, Nutzungsänderung oder Beseitigung von Anlagen Bauherr (sowie im Rahmen ihres Wirkungskreises die anderen am Bau Beteiligten) dafür verantwortlich sind, dass die öffentlich-rechtlichen Vorschriften eingehalten werden, sowie
- beim allgemeinen Maßstab der Landesbauordnungen für die Durchführung – beispielhaft Artikel 3 Abs. 1 und 3 der Bayrischen LBauO:

Anlagen sind unter Berücksichtigung der Belange der Baukultur, insbesondere der anerkannten Regeln der Baukunst, so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben und Gesundheit, und die natürlichen Lebensgrundlagen nicht gefährdet werden (...) [Dies gilt für] die Beseitigung von Anlagen [und] für die Änderung ihrer Nutzung entsprechend.

Der Rückbau einer baurechtlich genehmigten WEA bedarf einer Genehmigung nach der jeweiligen Landesbauordnung, die mit Nebenbestimmungen zur Sicherstellung der gesetzlichen Voraussetzungen versehen werden kann. In manchen Bundesländern ist beim reinen Rückbau eine Abbruchanzeige ausreichend.

2.1.2.2 Pflicht zum Rückbau einer immissionsschutzrechtlich genehmigten aufgegebenen WEA

Verpflichtungserklärungen zum Rückbau innerhalb und außerhalb des Geltungsbereichs von § 35 BauGB

Durch die immissionsschutzrechtliche Konzentrationswirkung (§ 13 BImSchG) sind bei Genehmigung einer WEA Vorschriften des Baurechts zu beachten. Insofern gelten die o.g. Ausführungen zu baurechtlich genehmigten Anlagen entsprechend.

Möglichkeit einer immissionsschutzrechtlichen Nachsorgeanordnung?

Das BImSchG kennt spezielle Nachsorgepflichten für BImSchG-genehmigte Anlagen in § 5 Abs. 3 Nr. 3:

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung (...)

3. die Wiederherstellung eines ordnungsgemäßen Zustandes des Anlagengrundstücks gewährleistet ist.

Unserer Auffassung nach umfasst § 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG inhaltlich die Pflicht zum Rückbau der Anlage mit (ähnlich (Seibert 2019, S. 142: nach Prüfung der Umstände des Einzelfalls, soweit von Zwecken des Immissionsschutzes gerechtfertigt); a.A. (Gaßner/Viezens 2018)). Zur Sicherung der Nachsorgepflichten kann die zuständige Behörde nachträgliche Anordnung erlassen (sog. Nachsorgeanordnung, § 17 Abs. 1 i.V.m. Abs. 4a Satz 2 BImSchG).

Die Voraussetzungen des § 20 Abs. 2 BImSchG, unter denen die Beseitigung einer Anlage angeordnet werden, dürften beim Fall der Nutzungsaufgabe einer WEA nicht vorliegen, da die Nutzungsaufgabe

keine der drei geforderten Handlungen (Errichtung, Betrieb, oder wesentliche Änderung) der Vorschrift darstellt (Seibert 2019, S. 145).

Ein Vorgehen entsprechend der Landesbauordnungen bleibt bei Vorliegen der jeweiligen Tatbestandsvoraussetzungen in jedem Fall möglich.

Zeitpunkt der Aufgabe

Auch hier gilt im Ausgangspunkt das oben zu baurechtlich genehmigten Anlagen Gesagte entsprechend; mit der Ergänzung, dass sie Einstellung des Betriebs einer immissionsschutzrechtlich genehmigten WEA der Behörde anzuzeigen ist (§ 15 Abs. 3 BImSchG). Nach Einstellung des gesamten Betriebs besteht gemäß § 17 Abs. 4a Satz 2 BImSchG eine einjährige Frist zum Erlass nachträglicher Anordnungen zur Sicherung der Nachsorgepflichten. Diese einjährige Frist endet vor dem zeitlichen Erlöschen der Genehmigung, das erst nach Ablauf von drei Jahren eintritt (siehe § 18 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG). Ob sich aus der Frist des § 18 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG ein Bestandsschutz der Anlage während dieser Frist trotz endgültiger Aufgabe des Betriebs ableiten lässt, ist nicht abschließend geklärt.

Ausgestaltung/Maßstab der Rückbaupflicht

Aktivitäten im Rahmen der Erfüllung immissionsschutzrechtlicher Nachsorgepflichten im Rahmen der Stilllegungs-/Rückbauphase richten sich nach § 5 Abs. 3 Nr 1 und 3 BImSchG; soweit die Behörde sich auf eine bauordnungsrechtliche Ermächtigungsgrundlage stützt, ist der oben im Bereich baurechtlich genehmigter Anlagen dargestellte Maßstab anzuwenden.

2.1.3 Relevante Umweltpflichten im Bereich Entsorgung der entstehenden Abfälle und deren behördliche Überwachung

Die Pflicht zur Entsorgung der beim Rückbau entstehenden Abfälle trifft in erster Linie den Erzeuger/Besitzer der entsprechenden Abfälle, wobei die Pflichten in einer Reihe verschiedener abfallrechtlicher Vorschriften zu finden sind. Einige der Vorgaben beabsichtigen, dass im Rahmen der Rückbautätigkeit entstehende Abfälle ordnungsgemäß und schadlos erfasst und soweit möglich getrennt entsorgt werden.

Zum häufig verwendeten Begriffspaar **Erzeuger und Besitzer** ist zu bemerken, dass der Erzeuger der Abfälle in der Regel auch der erste Besitzer ist. Erzeuger Besitzer können auch juristische Personen sein, wie § 3 Abs. 9 KrWG für den Fall des Besitzes ausdrücklich klarstellt:

Besitzer von Abfällen im Sinne dieses Gesetzes ist jede natürliche oder juristische Person, die die tatsächliche Sachherrschaft über Abfälle hat.

Der Bezug auf „die tatsächliche Sachherrschaft“ wird so verstanden, dass es auf eine tatsächliche **Verfügungsgewalt** ankommt; diese kann auch vorliegen, wo kein unmittelbarer Besitz besteht. Im Baubereich wird insofern nach Auffassung des BMU in Auftragsverhältnissen in der Regel der Auftragnehmer der Abfallerzeuger; d.h. der Bauunternehmer ist regelmäßig der Abfallerzeuger. Gegebenenfalls treten hierzu abfallrechtliche Pflichten des Bauherrn / Grundstückseigentümers zusätzlich hinzu. Keine Abfallbesitzer sind die konkret mit Tätigkeiten betrauten weisungsgebundenen Mitarbeiter eines Abrissunternehmens (siehe zum Ganzen (Kropp 2010)).

2.1.3.1 Baurechtlich genehmigte WEA

In Ermangelung spezieller integrierter Vorgaben wie im Bereich immissionsschutzrechtlich genehmigter Anlagen (siehe insoweit gleich unten) richten sich die Pflichten für die Entsorgung nach Abfallrecht. Insofern gilt für die Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen zunächst maßgeblich die GewAbfV, wonach bei Bau- und Abbruchabfällen (definiert als „bei Bau- und Abbrucharbeiten anfallende mineralische und weitere nicht mineralische Abfälle, die in Kapitel 17 der

Anlage der [AVV] aufgeführt sind, mit Ausnahme von [Böden und Steinen]“) folgende Pflichten bestehen:

- Pflichten des Erzeugers/Besitzers zur Getrennterfassung von u.a. Glas, Kunststoffen, Metallen, Holz sowie für Beton (§ 8 Abs. 1 Nrn. 1-4 und 8 GewAbfV; Ausnahmen von der Getrennterfassung bestehen, soweit die getrennte Sammlung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist, § 8 Abs. 2 GewAbfV), und
- Pflichten zur Behandlung dieser Fraktionen in Einklang mit der Abfallhierarchie der §§ 6 - 8 KrWG (vorrangig Vorbereitung zur Wiederverwendung sowie Recycling, erst dann sonstige Verwertung wie Verfüllung; Beseitigung wie Deponierung ist erst die letzte Option).

Weitere relevante Pflichten für die beim Rückbau entstehenden einzelnen Fraktionen betreffen folgende Abfallarten und die entsprechenden rechtlichen Vorgaben:

- für Elektroaltgeräte, die in den Anwendungsbereich des ElektroG fallen, bestehen für deren Besitzer eine Getrennthaltungspflicht (§ 10 ElektroG) und Vorgaben zur Entsorgung (§ 20 ElektroG);
- für Altbatterien bestehen für Besitzer Pflichten zur getrennten Erfassung und Zuführung zum geeigneten Entsorger (§ 11 BattG);
- für Altholz (z. B. bei bestimmten Rotorblattkonstruktionen aus Holz) bestehen Anforderungen an die Behandlung (§ 3 AltholzV);
- für Altöle bestehen für die Besitzer differenzierende Getrennthaltungspflichten und Vermischungsverbot (§ 4 AltöIV);
- Bei Beseitigung von F-Gasen (wie SF6) müssen die Vorgaben der EU-Verordnung 517/2014 sowie der bundesrechtlichen ChemKlimaSchutzV beachtet werden, insbesondere Rückgewinnung der Gase durch qualifiziertes Personal.

Diese Pflichten können mit den Mitteln des Abfallrechts, also etwa der abfallrechtlichen Anordnung (§ 62 KrWG) durchgesetzt werden.

2.1.3.2 Immissionsschutzrechtlich genehmigte WEA

Im Bereich immissionsschutzrechtlich genehmigter Anlagen gilt für die Stilllegungsphase insbesondere die Betreiberpflicht aus § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG:

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung (...)

2. vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden und

Mit dieser Voraussetzung des „Wohls der Allgemeinheit“ wird insofern inhaltlich auf die einschlägigen Vorgaben des Abfallrechts verwiesen (Jarass 2015)); d.h. soweit beim Rückbau einer immissionsschutzrechtlich genehmigten Anlage wie einer WEA verschiedene Fraktionen anfallen, für deren Erzeuger/Besitzer jeweils gesonderte Pflichten bestehen, sind diese Pflichten zu erfüllen.

Die Pflicht nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG unterliegt der Überwachung durch Immissionsschutzbehörden und etwaigen Nachsorgeanordnungen (siehe oben).

2.1.4 Fragen der Durchsetzung – insbesondere: „Flucht in die Insolvenz“

Problemaufriss

In den letzten Jahren ist verschiedentlich die Befürchtung geäußert worden, dass es im Zusammenhang mit der – namentlich durch Wegfall von EEG-Förderung motivierten – endgültigen Betriebseinstellung von WEA verstärkt dazu kommen könnte, dass die öffentliche Hand die beim Abbruch entstehenden Kosten würde tragen müssen, weil sich Geschäftsinhaber und Geschäftsführer der Verantwortung durch Insolvenz der Betreibergesellschaft entziehen könnten. Ob die Insolvenz von Betreibergesellschaften tatsächlich ein Massenphänomen darstellen kann, ist angesichts der öffentlich verfügbaren Informationen nicht leicht zu beurteilen.⁷

Im Folgenden sollen einige der relevanten Rahmenbedingungen skizziert werden; hierbei werden Mechanismen der für WEA typischen Kapitalgesellschaft (GmbH) und der für WEA typischen Personengesellschaft (GmbH & Co KG) zugrunde gelegt. Hierbei ist jedoch zu betonen, dass es in jedem Fall auf die Umstände des Einzelfalls ankommt. Elemente wie

- die Rechtsform der Betreibergesellschaft,
- abgeschlossene Verträge,
- Genehmigungsregime,
- eingetretene Betreiberwechsel,
- Vorhandensein von Rückbausicherheiten (in welcher Form?),
- Rechtsgrundlage einer behördlichen Verfügung,
- Optionen für ein Repowering, oder auch
- der Zeitpunkt eines Insolvenzantrags

können jeweils entscheidende Weichenstellungen für die Beurteilung des Einzelfalls sein und führen zu einer unübersehbaren Vielzahl möglicher Konstellationen. Insofern bleibt die Darstellung im Folgenden notwendigerweise stark verallgemeinernd.

Grundlagen (1): Umweltpflichten, Adressaten und Verwaltungsvollstreckung

Die Pflichten im Bereich des Rückbaus von WEA (und im Bereich der Entsorgung dabei entstehender Abfallfraktionen) sind öffentlich-rechtliche Pflichten, deren Einhaltung von Bauaufsichtsbehörden, Immissionsschutzbehörden und Abfallbehörden überwacht und im Wege von Verwaltungsakten (wie Beseitigungsverfügungen) durchgesetzt wird.

Wer als Adressat einer Verfügung in Frage kommt, bestimmt sich nach der jeweiligen Ermächtigungsgrundlage zum Handeln der Behörde. Klassischerweise wird im Polizei- und Ordnungsrecht zwischen Handlungsstörern und Zustandsstörern unterschieden:

- Handlungsstörer ist, wer die Einwirkung auf eine fremde Sache durch seine Handlung oder durch pflichtwidriges Unterlassen adäquat verursacht;

⁷ In der Antwort der Regierung des Landes Brandenburg auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Steeven Bretz vom 20.11.2014 (LT-Ds. 6/149) wird zur Frage „4. Welche Erfahrungen hat die Landesregierung mit dem Rückbau von Windkraftanlagen bisher gemacht?“ festgehalten: „Die bisherigen Standorte wurden durch die Betreiber zurückgebaut.“

- Zustandsstörer ist der Eigentümer, Besitzer oder Verfügungsbefugte einer Sache, von der eine Beeinträchtigung ausgeht.

Kommen nach den Voraussetzungen der einschlägigen Ermächtigungsgrundlage mehrere Verantwortliche in Betracht, liegt die Auswahl des Adressaten im Ermessen der Behörde. Zu beachten ist, dass immissionsschutzrechtliche Anordnungen regelmäßig an den Betreiber als Handlungsstörer gerichtet werden; baurechtliche Beseitigungsanordnungen können sowohl an den Betreiber einer baulichen Anlage als auch, soweit personenverschieden, an den Grundstückseigentümer (etwa einen Verpächter) gerichtet sein. Richtschnur für die fehlerfreie Ausübung des Auswahlermessens der Behörde sind die Umstände des Einzelfalls, der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit und auch das Gebot der schnellen und effektiven Gefahrenbeseitigung. Angesichts des Grundsatzes der Effektivität des Handelns und unter Berücksichtigung des Umstandes, dass der Handlungsstörer durch seine Tätigkeit in der Regel mehr zu zur Störung der Rechtsordnung beigetragen hat als etwa der Grundstückseigentümer als Zustandsstörer, wird es dabei regelmäßig sachgerecht sein, den Handlungsstörer vor dem Zustandsstörer in Anspruch zu nehmen (BayVGH NVwZ 1987, 912; VGH BW NVwZ 1995, 397).

Zu beachten ist, dass soweit juristischer Personen oder Personengesellschaften als „Betreiber“ oder „Störer“ in Frage kommen, hierbei grundsätzlich immer die Gesellschaft Adressat einer Beseitigungsverfügung wäre (also die GmbH oder GmbH & Co KG), nicht die hinter der Gesellschaft stehenden natürlichen Personen. Diese kommen als materiell Pflichtige und auch als Adressaten einer Ordnungsverfügung nur dann in Betracht, wenn das entsprechende Fachrecht dies ausdrücklich zulässt (siehe etwa § 10 i.V.m. § 4 Abs. 3 Satz 4 BBodSchG).

Eine andere Dimension betrifft die der Kosten der Durchsetzung der Pflicht: Soweit der Adressat einer Beseitigungsverfügung das entsprechende Gebot nicht befolgt⁸, können diese behördlich im Weg des gestuften Verwaltungsvollstreckungsverfahrens durchgesetzt werden; dieses umfasst Androhung, Festsetzung und anschließend Anwendung von Zwangsmitteln, wobei bei Beseitigungsverfügungen üblicherweise die Ersatzvornahme angewendet werden wird, d.h. die Ausführung einer Verfügung auf Kosten des Verantwortlichen. Der Ablauf der Verwaltungsvollstreckung stellt sich in diesem Fall wie folgt dar:

1. Erlass eines Grund-Verwaltungsakts (=Beseitigungsverfügung) mit dem Gebot zum Abbruch; dieser hat eine dem zivilprozessualen Vollstreckungstitel vergleichbare Funktion
2. Androhung von Zwangsmitteln und Festsetzung
3. Durchführung der Ersatzvornahme, d.h. die Behörde beauftragt einen Dritten mit dem Abbruch der Anlage
4. Festsetzung der Ersatzvornahme Kosten und ihre Beitreibung im Verwaltungszwangsverfahrens.

Die Beitreibung der Kosten geschieht dann nach den Bestimmungen über die Vollstreckung von Geldforderungen in den Verwaltungsvollstreckungsgesetzen der Länder. Auch insofern ist Kostenschuldner die Gesellschaft und nicht die dahinter stehenden natürlichen Personen. Inwieweit diese gesellschaftsrechtlich für Geldschulden einer Gesellschaft einzustehen haben, wird sogleich unten dargestellt.

Grundlagen (2): Insolvenzgründe

Bei GmbH und bei GmbH & Co. KG⁹ (siehe § 19 Abs. 3 Satz 1 InsO) existieren drei Insolvenzgründe:

⁸ Nochmals (siehe bereits oben 4.1.2) der Hinweis darauf, dass nach der Rechtsprechung des BVerwG die Verpflichtungserklärung gemäß § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB bewirkt, dass sich der Pflichtige, wenn er der Pflicht zum Rückbau nicht nachkommt, nach Treu und Glauben (Verbot des widersprüchlichen Verhaltens) nicht mit Erfolg gegen eine Beseitigungsverfügung wenden können soll.

⁹ Zu beachten ist, dass bei der GmbH & Co KG zu unterscheiden ist zwischen der Insolvenz der GmbH und Co. KG und der Insolvenz der Komplementär-GmbH.

- Zahlungsunfähigkeit (§ 17 InsO),
- drohende Zahlungsunfähigkeit (§ 18 InsO) sowie
- Überschuldung (§ 19 Abs. 2 InsO); letztere liegt vor, wenn das Vermögen des Schuldners die bestehenden Verbindlichkeiten nicht mehr deckt, es sei denn, die Fortführung des Unternehmens ist nach den Umständen überwiegend wahrscheinlich.

Grundlagen (3): Mechanismen der Finanzierungsverantwortung

GmbH und GmbH & Co KG müssen nach deutschem Recht weder mit einem für das Unternehmen ausreichenden Eigenkapital ausgestattet werden noch gibt es eine allgemeine Durchgriffshaftung im Fall der Unterkapitalisierung oder eine allgemeine Nachschusspflicht in der Gesellschafter in der Krise (K. Schmidt 2016). Allerdings bedeutet dies nicht, dass Gesellschafter und Geschäftsführer bei erkennbar Unterkapitalisierung keine Verantwortung tragen.

Adressat dieser Verantwortung ist zunächst der Geschäftsführer von GmbH (bzw. GmbH & Co KG), den nach § 43 GmbHG die Pflicht trifft, mit der Sorgfalt eines ordentlichen Kaufmanns den Geschäftsbetrieb zu überwachen und in angemessenem Rahmen Solvenzprüfungen vorzunehmen. Konkret auf den Betrieb einer WEA bezogen: Soweit absehbar ist, dass die das Geschäftsmodell tragende EEG-Förderung wegfällt, ist von der Geschäftsführung sorgfältig zu prüfen, inwieweit die anzunehmenden von der Gesellschaft zu tragenden Kosten für Rückbau – hier unabhängig, ob sie öffentlich-rechtlich oder durch Vertrag gegenüber einem Verpächter begründet sind – und die Kosten der Entsorgung der dabei entstehenden Abfälle zu einer Überschuldung der Gesellschaft im Sinne des § 19 InsO führen und die Pflicht zur unverzüglichen Stellung eines Insolvenzantrags (§ 15 InsO) auslösen. Nichtbeachtung dieser Pflicht ist strafbewehrt (§ 15a Abs. 4 InsO) und löst die scharfe Ersatzpflicht für Geschäftsführer gegenüber der Gesellschaft aus § 64 GmbHG aus. Diese gesellschaftsrechtlichen Pflichten stellen Anreize zur soweit wie möglich geordneten Liquidation eines Unternehmens dar.

Namentlich gehört es zu den Pflichten des Geschäftsführers, im Rahmen des Jahresabschlusses zu prüfen, inwieweit von der Fortführung der Unternehmenstätigkeit ausgegangen werden kann (siehe § 252 Nr. 2 HGB). Insofern trifft auch den mit der Erstellung eines Jahresabschlusses für eine GmbH beauftragte Steuerberater die Pflicht zur Prüfung, ob sich auf der Grundlage der ihm zur Verfügung stehenden Unterlagen und der ihm sonst bekannten Umstände tatsächliche oder rechtliche Gegebenheiten ergeben, die einer Fortführung der Unternehmenstätigkeit entgegenstehen können (BGH WM 2017, 383).

Im Vergleich zur Haftung für Geschäftsführer ist das Haftungsrisiko von Gesellschaftern begrenzt. Zu denken ist hier etwa an schuldhaft existenzgefährdende Maßnahmen im Rahmen einer vorsätzlichen sittenwidrigen Schädigung (§ 826 BGB), oder Ausschüttungen an die Gesellschafter, die im Rahmen des Insolvenzverfahrens angefochten werden und zur Insolvenzmasse zurückgewährt werden müssen (§ 143 InsO).

Verwaltungsrechtliche Folgen von Betriebseinstellung und Insolvenzantrag

Eine schlichte Betriebseinstellung ändert weder etwas an der Betreiberverantwortlichkeit (und an der Möglichkeit, Adressat einer Anordnung nach § 17 BImSchG zu bleiben) noch an der Handlungsverantwortlichkeit, die als Inanspruchnahme als Handlungsstörer bei einer baurechtlichen Ordnungsverfügung führt. Ebenso wenig modifiziert ein Insolvenzantrag den Inhalt ordnungsrechtlicher Pflichten.

Masselosigkeit und Freigabe

Im Rahmen der Insolvenzantragsprüfung wird neben dem Vorliegen eines Insolvenzgrundes auch geprüft, inwieweit eine die Kosten des Verfahrens deckende Insolvenzmasse vorliegt (§ 26 InsO). In diesem Rahmen werden regelmäßig auch mögliche Haftungsansprüche oder Rückforderungen gegen Geschäftsführer und Gesellschafter einbezogen. Soweit eine die Kosten des Verfahrens deckende Masse nicht vorhanden ist, wird die Eröffnung des Verfahrens abgelehnt und eine Vollstreckung in das Vermögen der Gesellschaft ist wieder möglich. Zu einer Trennung von der Masse führt auch eine Freigabe von Gegenständen (etwa eines Grundstücks) durch den Insolvenzverwalter.

Insolvenzantrag und Beseitigungsverfügung

Hat eine Behörde gegenüber einer Person – dem späteren Insolvenzschuldner – eine Beseitigungsverfügung erlassen, danach das Verwaltungsvollstreckungsverfahren durchgeführt und dieses vor Einleitung eines Insolvenzverfahrens mit der Festsetzung der Kosten der Ersatzvornahme (ggf. abzüglich einer in Anspruch genommenen Sicherheit) durch Verwaltungsakt abgeschlossen, so können diese Kosten im eröffneten Verfahren als Insolvenzforderung zur Tabelle (§ 38 InsO) angemeldet werden. Beim Erlass einer Verfügung nach Insolvenz kann demgegenüber nach der Rechtsprechung des BVerwG eine Masseverbindlichkeit (§ 55 InsO) vorliegen, wenn der Insolvenzverwalter im Sinne des entsprechenden Ordnungsrechts verantwortlich ist (BVerwG NZI 2005, 51). Hierfür kann etwa bei einer bauordnungsrechtlichen Beseitigungsverfügung Inbesitznahme ausreichen, die zur Zustandsverantwortlichkeit führt; bei einer auf die Betreibereigenschaft im BImSchG gestützten Verfügung muss ein (Weiter-) Betrieb der Anlage durch den Insolvenzverwalter vorgelegen haben (BVerwG ZInsO 2006, 595) – letzteres dürfte bei aufgegebenen WEA eher nicht der Regelfall sein.

Schlussfolgerungen

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, muss angesichts der Vielzahl möglicher, jeweils entscheidender Parameter jede Darstellung notwendig oberflächlich bleiben. Zudem sei betont, dass wichtige rechtliche Fragen speziell im Bereich des Rückbaus von WEA nicht abschließend geklärt sind. Gleichwohl sollen an dieser Stelle ein paar Zwischenbemerkungen für die weitere Untersuchung festgehalten werden:

- Angesichts der dargelegten Haftungs- und strafrechtlichen Risiken namentlich für Geschäftsführer ist fraglich, inwieweit eine geplante „Flucht in die Insolvenz“ als Strategie ein Massenphänomen werden kann.
- Ebensowenig ist eindeutig, dass die Allgemeinheit routinemäßig mit den Rückbaukosten von aufgegebenen WEA belastet wird. Soweit der Standort für Repowering genutzt wird, scheint eine Überwälzung von Abrisskosten auf den neuen Investor denkbar. Soweit eine Betreibergesellschaft insolvent ist, kann aus Sicht einer Vollzugsbehörde geprüft werden, inwieweit die Voraussetzungen für eine Inanspruchnahme von Grundstückseigentümern als Zustandsstörern vorliegen. Da Effektivität der Gefahrenabwehr eine der anerkannten ermessensleitenden Elemente bei der Störerauswahl ist, stehen dem jedenfalls keine grundsätzlichen Einwände gegenüber
- Insgesamt: ist festzuhalten, dass es große tatsächliche Unsicherheiten gibt, was das Bestehen Rückbausicherheiten und Rückstellungen für WEA angeht, die vor Inkrafttreten von § 35 Abs. 5 BauGB 2004 errichtet wurden; andererseits ist aber wiederum nur in jedem einzelnen Fall möglich, zu prognostizieren, wieweit sich die oben geschilderten Umstände auswirken und inwieweit die öffentliche Hand sich durch Abwälzen der Kosten auf Neuinvestoren oder Grundstückseigentümer auch im Fall des Ausfalls des Betreibers konkret entlasten könnte.

2.2 Technische Praxis von Rückbau und Entsorgung

Im folgenden Kapitel wird die aktuelle Praxis des Rückbaus (siehe Kapitel 2.2.1), die Praxis der Entsorgung und die resultierenden Stoffströme (siehe Kapitel 2.2.2), sowie die aktuelle Praxis der Rückbaurücklagen und der Rückbaukosten (siehe Kapitel 2.2.3) dargestellt. Abschließend werden mögliche Ausweichreaktionen und unvorteilhafte Praktiken (siehe Kapitel 2.2.4), soweit solche identifiziert werden konnten, beschrieben.

Der nachfolgend beschriebene Status quo des Rückbaus basiert auf der bisherigen Erfahrung der Autoren, einer Literaturrecherche, sowie einer Befragung verschiedener Akteure aus dem Bereich des Rückbaus von WEA. Mit Bezug auf die Befragung wurden folgende Rücklaufquoten erzielt:

➤ Fachfirmen/Abbruchfirmen	6 Anfragen	3 Rückmeldunge(n)
➤ Windpark Betreiber	5 Anfragen	2 Rückmeldunge(n)
➤ Banken	5 Anfragen	3 Rückmeldunge(n)
➤ WEA-Hersteller	6 Anfragen	2 Rückmeldunge(n)
➤ Verbände	6 Anfragen	3 Rückmeldunge(n)
➤ Entsorgungsfachfirmen	8 Anfragen	5 Rückmeldunge(n)
➤ Zweitmark-Portale	5 Anfragen	1 Rückmeldunge(n)
➤ Verpächter	6 Anfragen	3 Rückmeldunge(n)
➤ Behörden	5 Anfragen	3 Rückmeldunge(n)

Da den befragten Akteuren zudem eine anonyme Veröffentlichung der gemachten Aussagen zugesichert wurde, werden die teilgenommenen Firmen und Verbände nicht im Detail benannt. Der für die telefonischen Interviews genutzt Gesprächsleitaden befindet sich in Anlage A.

In Anlage B befinden sich die nötigen Hintergrundinformationen und getroffenen Annahmen für die weitere Darstellung des Status quo bestehend aus

- Informationen zu Komponenten einer WEA und deren stofflicher Zusammensetzung,
- Überlegungen zur Lebensdauer von WEA sowie
- Angaben zur Vorgehensweise zur Darstellung der Rückbaupraxis.

2.2.1 Aktuelle Praxis des Rückbaus

Der Rückbau einer WEA erfolgt üblicherweise ähnlich dem Aufbau, jedoch zwangsläufig in umgekehrte Reihenfolge. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die WEA nach erfolgtem Rückbau als Ganzes weiter genutzt werden soll, z.B. in einem Zweitmarkt, oder ob eine Entsorgung ggf. in Kombination mit einer Zweitnutzung einzelner Komponenten (wie Rotorblatt, Getriebe oder Generator) erfolgen soll. Zudem zeigen die Erfahrungen der befragten Akteure, dass die Verkaufschancen für länger zwischengelagerte WEA drastisch sinken können. So sollte ein möglicher Käufer für eine vollständige WEA bzw. teilweise auch für einzelne WEA-Komponenten bereits vor Beginn der Rückbauarbeiten vertraglich bindend feststehen. Da zudem auch Diebstahl an Baustellen ein großes Problem darstellt, empfiehlt sich zudem eine unmittelbare Verladung der rückgebauten WEA auf geeignete Fahrzeuge inkl. der notwendigen Transportgestelle, da so die Kosten für einen Wachdienst eingespart werden können.

2.2.1.1 Vorbereitungsarbeiten

In einem ersten Schritt wird die WEA zunächst vom Netz getrennt.

Soll eine Weiternutzung der kompletten WEA erfolgen, so sind die Rückbau-Vorbereitungsarbeiten mit größter Sorgfalt durchzuführen. Dies umfasst insbesondere die Trennung der Kabelverbindungen (Leistungskabel und Steuerkabel, sowie von Turmeinbauten z.B. Schienensysteme), welche bei einer vollständigen Zweitnutzung ohne Probleme wieder zusammengesetzt werden müssen. Hier sind zudem auch herstellerspezifische bzw. anlagenspezifische Besonderheiten zu beachten. So kann je nach WEA-Hersteller bspw. das Turmkabel entweder in einem Stück durch den Turm verlaufen, was das relativ zeitaufwändige „Hochziehen“ des kompletten Kabels in die Gondel nach sich ziehen kann (falls dies gewichtsbedingt überhaupt möglich ist), oder das Turmkabel kann in verschiedene und mit Muffen verbundenen Abschnitte unterteilt sein, was die Auftrennung des Kabels und das spätere Neuverkabeln (am Zweitstandort) entsprechend vereinfacht. Sollte eine spätere vollständige Weiternutzung der WEA erfolgen, werden gelöste Verbindungen zudem detailliert beschriftet, sodass beim späteren Zusammensetzen der WEA an dem Zweitstandort möglichst keine fehlerhafte Montage erfolgt.

Weiterhin werden innerhalb der Vorbereitungsarbeiten eines Rückbaus die Betriebsflüssigkeiten d.h. die wassergefährdenden Stoffe abgelassen. Dies ergibt sich primär aus der Notwendigkeit Verunreinigungen der Böden, auch bei unvorhersehbaren Ereignissen während des Rückbaus, möglichst zu vermeiden bzw. zu minimieren. Hierbei ist es zwar grundsätzlich nicht möglich alle Betriebsmittel rückstandslos zu entfernen, sodass meist einzelne kleine Mengen an Flüssigkeiten in der Anlage verbleibenden, das resultierende Risiko einer Bodenverunreinigung wird jedoch deutlich minimiert. Als zusätzliche Reaktion auf dieses Restrisiko enthalten Abbruchgenehmigungen von WEA teilweise auch Nebenbestimmungen, die das Vorhalten von Bindemitteln während des Rückbaus vorsehen, um einen Eintrag von wassergefährdenden Stoffen in den Boden und damit ggf. auch ins Grundwasser zu vermeiden. Für den Fall, dass das Getriebe der WEA einer Zweitnutzung zugeführt werden soll, wurde zudem von einer erfahrenen Rückbaufirma bestätigt, dass ein kurzzeitiges Trockenfallen des Getriebes, d.h. die vollständige Entfernung des Getriebeöls, keine späteren technischen Probleme mit sich bringt.

Innerhalb der Vorbereitungsphase hat es sich zudem als sinnvoll erwiesen, die Verbindungselemente der WEA mit Drehmomentschlüsseln zunächst einzeln zu lösen und nachfolgend nicht ganz so stark wieder anzuziehen. Hierdurch lassen sich mögliche Wartezeiten während der nachfolgend durchzuführenden Rückbauphase und damit Standzeiten für den vergleichsweise teuren Kran minimieren.

Insgesamt können für die vorbereitende Phase des Rückbaus und für die aktuell rückzubauende Anlagengeneration ca. zwei Tage, an denen etwa 3-4 Personen parallel arbeiten, eingeplant werden.

Nachfolgend kann mit der eigentlichen Demontage der WEA begonnen werden. Hierbei ist es üblich zunächst einen geeigneten Kran aufzubauen. Der Aufbau dieses Hauptkrans macht es in der Regel notwendig, dass ein zweiter, kleiner Hilfskran angefordert wird, der den Hauptkran entsprechend montiert. Dieser Hilfskran wird zudem auch bei einer möglichen späteren Zerkleinerung, einzelnen Demontagevorgängen am Boden und dem Verladen einzelnen Komponenten, sowie ggf. bei der Ablage von größeren rückgebauten WEA-Komponenten (z. B. dem Rotorstern) benötigt.

Abbildung 2: Darstellung eines Hauptkrans in Gelb und eines Hilfskrans in Rot



Quelle: (Ramboll)

Als weiteres generelles Kriterium zum Aufbau eines Krans sind zudem gewisse bodenmechanische Eigenschaften erforderlich, da andernfalls ein sicheres Arbeiten mit dem Kran nicht möglich ist. Grundsätzlich sollten die Kranstellflächen von WEA diesen Anforderungen jederzeit genügen, da bspw. auch während der Betriebsphase größere Instandsetzungen notwendig werden können, die ebenfalls den Einsatz eines Krans erfordern. Tatsächlich kann es jedoch standortspezifisch auch vorkommen, dass vor dem Aufbau eines Krans an den Kranstellflächen der WEA noch zusätzliche Vorbereitungsarbeiten durchzuführen sind.

Weiterhin sind für einen sicheren Einsatz eines Krans auch die zulässigen Wetterbedingungen relevant. So können insbesondere starke Winde zu längeren Wartezeiten und Verzögerungen führen.

Nach erfolgtem Aufbau des Krans auf einer geeigneten Stellfläche, kann mit der eigentlichen Demontage der WEA, beginnend mit dem Rotor, begonnen werden. Neben dem Kran und dem Kranführer werden hierzu etwa acht weitere Personen vor Ort benötigt. Hiervon befinden sich etwa drei Personen in der Gondel, um die Anschlagpunkte des Krans mit dem Rotor zu verbinden und die Rotorbolzen zu entfernen. Die verbleibenden fünf Personen befinden sich am Boden und unterstützen das sichere Absenken der einzelnen Komponenten mithilfe von Führungsseilen.

Bei der aktuellen Generation an abzubauenen bzw. bisher abgebauten WEA kann der Rotorstern (d.h. die Rotorblätter und die Nabe) als Ganzes und in einem Vorgang abgesenkt werden. Bei neueren, größeren WEA ist zukünftig und in Abhängigkeit des eingesetzten Krans und dessen Spezifikationen, bspw. dessen zulässiges Gewicht in Hakenhöhe, eine Einzelblatt-Demontage wahrscheinlich. Zudem sind auch die aktuell vorherrschenden Winde relevant, welche in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht

und der Angriffsfläche der abzusenkenden Komponenten eine unterschiedlich starke Beeinflussung des Absenkvorgangs hervorrufen.

Die Wahl der geeignetsten Variante (Sterndemontage vs. Einzelblattdemontage) hängt hierbei neben einer Abwägung der Krankkosten, zudem auch von den Ablagemöglichkeiten am Boden ab. Beide Varianten sind bereits heute (eingeschränkt) auch bei der Errichtung von neuen WEA möglich. So erfolgt bspw. gegenwärtig die Errichtung von neuen WEA, insbesondere zur Minimierung von Rodungsflächen bei Waldstandorten, häufig mittels Einzelblattmontage. Kostenseitig ist eine solche Einzelblattmontage (je nach Hersteller) meist mit zusätzlichen Kosten verbunden. Übertragen auf den Rückbau ist hier analog zu erwarten, dass die resultierenden Kosten bei einer Einzelblattdemontage des Rotors ebenfalls steigen, wobei einzelne Interviewpartner auch angegeben haben, dass der Einsatz eines insgesamt günstigeren Krans (insbesondere bzgl. der Anfahrtspauschale) auch die höhere Anzahl an Absenkvorgängen (und damit die längere Arbeitszeit) auch vollständig egalisieren kann.

Abbildung 3: Demontage des Rotorsterns am Boden



Quelle: (Ramboll)

Das (flache) Ablegen des Rotorsterns am Boden erfolgt unter Zuhilfenahme des Hilfskrans. In nachfolgenden Arbeitsschritten wird der Rotorstern am Boden in seine Einzelteile (d.h. die Blätter und die Nabe) zerlegt.

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten entweder direkt auf ein geeignetes Transportfahrzeug gelegt oder kurzzeitig seitlich gelagert und anschließend in transportfähige Stücke für die Entsorgung zerlegt. Hierbei sind, aufgrund der besonderen Geometrie eines Rotorblatts, bei der Ablage auf ein Transportfahrzeug, sowie bei einer Lagerung vor Ort, geeignete Gestelle zu nutzen. Im

Fall einer Entsorgung der Rotorblätter ist es zudem günstiger, die Rotorblätter direkt vor Ort in transportfähige Stücke zu zerlegen und mit Standardfahrzeugen zum Entsorgungsbetrieb zu bringen.

Hierbei erfolgt die Zerlegung der Rotorblätter häufig durch die Entsorgungsfachfirmen, die oft direkt zur Baustelle kommen und zudem auch die nachfolgende Logistik durchführen. Im Fall von Rotorblättern, die bei aktuell rückzubauenden WEA überwiegend aus GFK bestehen und in denen noch kein bzw. nur selten CFK vorhanden ist, erfolgt das Kürzen der Blätter meist mithilfe von geeigneten Sägen. CFK-haltige Blätter lassen sich grundsätzlich ebenfalls zersägen, hier muss jedoch aufgrund des härteren Materials eine deutlich höhere Abnutzung des Werkzeugs, sowie von längeren Bearbeitungszeiten ausgegangen werden. Neben dem Zersägen können Rotorblätter zudem auch mithilfe eines Baggers „zerknuspert“ werden. Hierbei werden die Rotorblätter durch einen mit einem Greifarm ausgerüsteten Bagger gebrochen und somit mechanisch zerkleinert. Aufgrund der Absplitterung und der Stäube wird dieses Verfahren jedoch nicht als optimale Vorgehensweise wahrgenommen. Verfahren zur energetischen Zerlegung von Rotorblättern mittels Schneidladungen befinden sich zudem in der Entwicklung (Forecycle 2016).

Während des Sägeprozesses werden die Blätter teilweise eingehaust, sodass die entstehenden Stäube nicht unmittelbar in die Umgebung gelangen können. Vereinzelt werden auch Verfahren eingesetzt, bei denen die entstehenden Stäube mittels Wasser gebunden und in einem nachfolgenden Prozess aus dem Wasser gefiltert werden. Ein einheitliches Vorgehen hat sich diesbezüglich jedoch noch nicht etabliert. Von Seiten der Behörde werden hierzu zum Teil Vorgaben gemacht, teilweise kommt es jedoch auch zu einem Zersägen der Blätter ohne gesonderte Schutzmaßnahmen, sodass die freiwerdenden Stäube in die Umgebung gelangen können.

Ein mögliches Konzept wie das Zerkleinern der Rotorblätter, auch ohne Eintrag der Stäube in die Umgebung erfolgen kann, wurde von der Firma Veolia Umweltservice GmbH entwickelt (Veolia 2017). Bei dem Verfahren wird das Rotorblatt innerhalb eines vollständig eingehausten Bereichs zerkleinert. Dies geschieht in insgesamt zwei Stufen, sodass das Blatt zunächst radial und in einem nachfolgenden Bearbeitungsschritt zusätzlich axial zersägt wird. Neben dem Schutz der Umgebung durch die Einhausung, werden die freiwerdenden Stäube zudem über eine Berieselung mit Wasser gebunden, welches über gesonderte Filter gereinigt wird.

Eine weitere Alternative stellt das Verfahren von WP Systems dar, in dem direkt am hängenden Blatt mittels einer unbemannten Sägezelle die Rotorblätter zerkleinert werden (WP Systems 2019).

Nach der Zerkleinerung der Rotorblätter in transportfähige Stücke (die Entsorger haben spezielle Anforderungen bzgl. der maximalen Größe an annehmbaren Teilen) erfolgt der Transport zum Entsorgungsbetrieb. Hier werden die Rotorblathteile vollständig verwertet, eine weitere Separierung an der Baustelle ist entsprechend nicht notwendig und wird nur in sehr geringem Umfang bspw., wenn einzelne metallische Kleinteile (z.B. Kabelstränge) händisch ohne großen Aufwand separiert werden können, vorgenommen.

Bezüglich der Verwendung von CFK innerhalb von Rotorblättern bestehen im Vergleich zu Rotorblättern ohne CFK-Anteil bisher deutlich weniger Erfahrungen, obgleich einzelne Akteure auch bereits WEA mit Rotorblättern die CFK enthalten, zurückgebaut haben. Tendenziell ist der Einsatz von CFK eher bei neueren WEA üblich. Hintergrund hierzu sind hauptsächlich die verbesserten mechanischen Eigenschaften von CFK gegenüber GFK, die es bei modernen sehr langen Blättern ermöglichen die mechanisch notwendigen Kennwerte, bei moderaten Eigengewichten der Blätter zu erreichen. Aufgrund des gegenüber GFK deutlich höheren Beschaffungswertes von CFK, ist es zudem kaum verwunderlich, dass das Material in älteren WEA eher selten zu finden ist, da hier schlichtweg die mechanische Notwendigkeit noch nicht bestand.

Grundsätzlich wird CFK sehr spezifisch an hochbelasteten Bereichen des Rotorblatts eingesetzt. So finden sich (lokal) reine CFK Bereiche je nach Hersteller bspw. häufig an den Gurten von

Rotorblättern. Zudem werden teilweise auch hybride Fasermaterialien genutzt, bei denen Glasfasern und Kohlefasern meist als Triax-Gelege kombiniert werden.

Die Zerlegung eines Rotorblattes erfolgt zunächst quer zur Rotorblattachse und nachfolgend in einem zweiten Schritt meist längs (bessere Transport-Geometrien), können CFK-freie Bereiche meist gut von solchen Bereichen des Rotorblatts getrennt werden, die auch CFK enthalten. In den verbleibenden Rotorblattbereichen liegt CFK meist in Kombination mit GFK, entweder als hybride Faser oder in den Übergangsbereichen in reiner Form, vor. Eine Trennung der Bereiche, in denen kein CFK eingesetzt wurde, und der Bereiche in denen auch CFK eingesetzt wird, ist somit grundsätzlich möglich, was insbesondere für die Verwertungswege von großer Relevanz ist. Die Lokalisierung der CFK-freien Bereiche, ist jedoch meist nur per „trial and error“ möglich. So sind spezifische Informationen in der erforderlichen Detailtiefe häufig nicht verfügbar. Die Identifikation des CFK-freien Blattbereichs eines Rotorblatts erfolgt somit meist anhand der Farbe des entstehen Sägestaubs, der bei CFK deutlich dunkler als bei GFK ist. Zudem lässt sich CFK auch anhand von längeren Sägezeiten und teilweise auch visuell identifizieren.

In diesem Zusammenhang ebenfalls relevant ist, dass einzelne WEA-Komponenten für spezifischen WEA-Modelle häufig von verschiedenen Zulieferfirmen hergestellt werden und in ihren Spezifikationen deutlich abweichen können. Folglich können einzig aufgrund der Nennung der WEA-Modelle häufig noch keine fundierten Aussagen zu dem jeweiligen Rotorblatt und dessen Aufbau gemacht werden. Zudem sind zum Teil deutliche Abweichungen von den technischen Spezifikationen für einzelne Rotorblätter möglich. So wurde bspw. von einem befragten Akteur angegeben, dass es in einem Einzelfall bereits vorgekommen sei, dass ein Rotorblatt um 15% von dem Gewicht gemäß der technischen Spezifikation abwich.

Nachdem die Rotorblätter und die Nabe demontiert worden sind, wird mithilfe des Hauptkrans die Gondel einschließlich des Triebstrangs der WEA entfernt. Hierbei werden derzeit meist einer, teilweise auch zwei Absenkvorgänge benötigt, wobei grundsätzlich immer die Nabenhöhe in Verbindung mit dem eingesetzten Kran und dem zu hebenden Gesamtgewicht zu berücksichtigen ist.

Je nach späterer Verwendung der WEA kann nachfolgend (analog zum Rotor) entweder ein direkter Abtransport der Gondel im Ganzen, eine temporäre Lagerung bei späterem Abtransport der Gondel im Ganzen oder eine Zerlegung der Gondel erfolgen. Häufig erfolgt die Zerlegung der Gondel zudem in Teilen, sodass einige Komponenten einer Zweitnutzung zugeführt werden (bspw. als Ersatzteil für Anlagen gleichen Modells) und andere Bereiche der Gondel für die Entsorgung grob zerlegt und transportfähig gemacht werden. Bezüglich der Zerlegung der einzelnen Komponenten wurden von den verschiedenen Akteuren sehr unterschiedliche Aussagen gemacht. So gaben einige befragte Akteure an, dass die einzelnen Komponenten vor Ort stofflich separiert werden, wohingegen Andere angaben, dass die zu entsorgenden Komponenten vor Ort primär in transportfähige Größen zerlegt werden und nachfolgend direkt beim Entsorgungsbetrieb stofflich separiert werden.

Stofflich können in der Gondel (typenspezifisch) erneut auch GFK-Abfälle anfallen, die dem Maschinenhaus als Einhausung dienen, wobei je nach Hersteller auch Gondelverkleidungen aus Blechen (meist Aluminium) gefertigt sind. Der Triebstrang innerhalb der Gondel beinhaltet überwiegend metallische Stoffe, sowie elektrotechnische Komponenten.

Abbildung 4: Rückbau der Gondel



Quelle: (Ramboll)

Dem Rückbauprozess einer WEA folgend, ist nach der Gondel der Turm zu demontieren. Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob es sich um einen Betonturm, einen Stahlrohrturm, einen Hybriddturm (im unteren Bereich Betonturm und im oberen Bereich Stahlturm) oder um einen Gittermastturm handelt.

Aufgrund des geringen Vorkommens von Gittermasttürmen für WEA, liegen uns hierzu nur geringe Erfahrungen vor. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass das Turmkonzept des Gittermastturms auch in den nächsten Jahren nur eine sehr untergeordnete Rolle einnehmen wird. Die Verbindungselemente eines Gittermastturms lassen sich zudem lösen, sodass einzelne Sektionen (bestehend aus einer gewissen Anzahl an Gitterstäben) abgesenkt und am Boden einzeln demontiert werden können. Die Gewichtsbelastung ist hierbei entgegen den alternativen Turmkonzepten als deutlich geringer einzustufen. Insgesamt kann der Rückbau eines Gittermastturms somit als technisch gut durchführbar bezeichnet werden. Aufgrund der vielen Verbindungselemente der einzelnen Stahlträger ist hierbei insbesondere der personelle Aufwand bei der Zerlegung zu berücksichtigen.

Abbildung 5: Zerlegung einer Turmsektion



Quelle: (Ramboll)

Beim Rückbau eines Stahlrohrturms, dieser besteht aus einzelnen übereinander angeordneten Stahlsektionen, sowie beim Rückbau der Stahlsektionen eines Hybridturms, können die einzelnen Sektionen zunächst voneinander gelöst und nachfolgend einzeln mithilfe des Hauptkrans abgebaut werden. Je nach weiterer Verwendung können die einzelnen Sektionen nachfolgend erneut direkt abtransportiert, seitlich gelagert oder direkt zerkleinert werden. Das Zerkleinern des Stahlrohrturms und somit die Bearbeitung des Turms mit dem Ziel transportfähige Größen zu erhalten, erfolgt hierbei bspw. mithilfe von Schneidbrennern. Zudem können auch andere Verfahren wie bspw. ein Zerschneiden der Türme mithilfe eines Baggers eingesetzt werden.

Aufgrund der runden Struktur eines Stahlrohrsegmentes, sowie der hohen Gewichte ist hier zudem insbesondere auf einen ausreichenden Schutz gegen ein mögliches Wegrollen zu achten.

Abbildung 6: Gegen Wegrollen gesicherte Turmsection



Quelle: (Ramboll)

Der Rückbau von Turmabschnitten aus Beton, ist dagegen irreversibel, sodass der Wiederaufbau eines rückgebauten Betonturms, sowie des Betonturmabschnittes eines Hybridturms, nicht praktiziert wird.

Beim Rückbau nicht allzu großer Stahlbetontürme kann ebenfalls der Hauptkran zum Einsatz kommen. Dieser ist in seiner Einsatzfähigkeit jedoch durch die hohen Massen eines Betonturms stark eingeschränkt. Bisherige Erfahrungen der befragten Fachfirmen zeigen zudem, dass die einzelnen Segmente eines Betonturms nach der Betriebsphase häufig nicht voneinander getrennt werden können bspw. da die einzelnen Segmente zusätzlich vermörtelt worden sind. Ein Rückbau analog zum Aufbau d. h. einzeln je Betonturmsegment ist somit meist nicht möglich. Das segmentielle (nachträgliche) Schneiden eines Betonturms von außen bspw. mithilfe einer Kletterbühne führt zudem meist zu dem Problem, dass der Turm konisch verläuft, sodass Arbeiter auf einer Kletterbühne nicht nah genug an dem Turm herankommen, um sicher arbeiten zu können. Von einzelnen Befragten wurde ergänzend berichtet, dass sich für große Betontürme derzeit Roboter in der Entwicklung befänden, die in der Lage sein sollen, an Betontürmen entlang zu fahren und den Stahlbeton zu zerschneiden. Solche geschnittenen Segmente können dann mit einem Kran nacheinander demontiert werden.

Derzeit fördert die Deutsche Bundestiftung Umwelt die Entwicklung einer Maschine zum umweltschonenden Rückbau von Spannbetontürmen von WEA (DBU 2019).

Aufgrund des gegenwärtigen Fehlens von alternativen Rückbaumethoden werden Betontürme derzeit sehr rabiät demontiert. So können sehr kleine Betontürme mithilfe von geeigneten Fahrzeugen umgelegt werden. Zudem wäre auch der Einsatz von Abrissbirnen denkbar, die ein segmentielles

Abtragen des Turms ermöglichen, wobei hierbei besondere Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind. In der Regel werden Betontürme derzeit gezielt gesprengt, was entgegen der alternativen Rückbaukonzepte zudem den Vorteil hat, dass die resultierenden Kosten fast vollständig unabhängig von der Höhe des abzubauenen Turms sind.

Die Sprengung eines Betonturms wird von speziellen Fachfirmen durchgeführt. Vor einer möglichen Sprengung ist der zuständigen Fachbehörde das geplante Vorgehen anzuzeigen. Zudem sind gesonderte Berechnungen durchzuführen, die belegen, dass es durch die Sprengung und die resultierenden Erschütterungen zu keinen negativen Auswirkungen auf benachbarte Anlagen, Gebäude oder bspw. Versorgungsleitungen kommen kann. Je nach den spezifischen Bodenverhältnissen sind zur Minderung der Erschütterung zudem Fallbette vorzusehen, die üblicherweise als einfache Erdhügel ausgeführt sind und die, die in den Boden eingebrachte Energie beim Aufprall des Turms deutlich minimieren können. Bei der Planung einer Betonturmsprengung muss zudem sichergestellt sein, dass der Turm vor der Sprengung sicher steht und nach der Sprengung sicher und kontrolliert einstürzt. Die den Fachbehörden vorgelegten Dokumente werden auf Plausibilität geprüft, zudem können die Behörden weitere Bestimmungen zum konkreten Ablauf machen.

Bei den Vorbereitungen einer Sprengung eines Betonturms wird im unteren Bereich des Turms Material keilförmig entfernt, um die Fallrichtung des Turms kontrollieren zu können. Hierbei wird jedoch ein schmaler Bereich des Turms nicht entfernt. Über eine gezielte Sprengung dieser Sprengstütze wird der kontrollierte Einsturz in die gewünschte Richtung initialisiert. Zur Minderung der Erschütterung wird zudem ein Fallbett aus Erdhügeln aufgebaut, welches die ins Erdreich eingebrachte potentielle Energie des zusammenfallenden Turms mindert.

Grundsätzlich lassen sich auf diese Weise auch Stahlrohtürme demontieren. Zudem kann eine Sprengung auch erfolgen, bevor die Gondel und der Rotor demontiert wurden, wobei dies bei einem Einsturz der WEA zu einem Zersplittern der GFK-Komponenten führen kann. Um solche Absplitterungen möglichst zu vermeiden, erfolgt in der Regel zunächst die Demontage des Rotors und der Gondel mit einem Kran. Da bei es bei Anwesenheit eines Krans sinnvoll ist diesen auch für den Rückbau des Turms einzusetzen, erfolgt ein Rückbau von Stahlrohtürmen durch Sprengung eher selten.

Neben der vorstehenden Sprengmethode existiert zudem auch die sogenannte Faltsprengung. Hierbei werden Sprengkörper auf verschiedenen Ebenen des Turms angebracht und nacheinander so gezündet, dass der Turm ähnlich einer Ziehharmonika in sich zusammenbricht. Der Vorteil dieser Methode ist hierbei insbesondere, dass die beanspruchte Fläche deutlich reduziert wird und bspw. Flurschäden vermieden werden. Aufgrund einer höheren Komplexität ist diese Methode jedoch insgesamt teurer und wird seltener angewandt.

Der demontierte Betonturm kann in einem nachfolgenden Prozess in seine Bestandteile aufgetrennt und recycelt werden. Hierzu werden meist Bagger eingesetzt, die den Betonturm zerkleinern, sodass der Bewehrungsstahl vom Stahlbeton getrennt wird.

Neben Beton und Stahl (je nach Turmkonzept) fallen außerdem beim Rückbau eines Turms in der Regel auch nicht FE-Metalle wie bspw. Aluminium aus den Turmeinbauteilen an.

Bezüglich des Rückbaus von WEA-Türmen ist weiterhin anzumerken, dass die Türme im Außenbereich typischerweise Beschichtungen aufweisen, die vor Witterungseinflüssen schützen sollen. Die genauen Bestandteile dieser Beschichtungen/Lacke sind in aller Regel nicht genau bekannt.

2.2.1.2 Demontage des Fundaments

Nach vollständigem Rückbau der WEA erfolgt die Demontage des Fundaments. Hierbei ist zwischen einem Standardflachfundament und einer Pfahlgründung zu unterscheiden. Innerhalb der

Standardflachfundamente gibt es zudem die Unterscheidung zwischen Fundamenten mit und ohne Auftriebssicherung. Eine Auftriebssicherung ist hierbei insbesondere dann notwendig, wenn der Grundwasserstand standortspezifisch sehr hoch ist und somit auf das Fundament eine Auftriebskraft ausübt bzw. ausüben kann. Solche Fundamente sind typischerweise größer als Fundamente ohne Auftriebssicherung, da der zusätzliche Auftrieb durch zusätzliches Gewicht kompensiert werden muss. Bei Pfahlgründungen handelt es sich um Fundamente, die ähnlich aufgebaut sind wie Standardflachfundamente, allerdings stehen Pfahlgründungen nicht direkt auf dem Boden, sondern werden auf zuvor in den Boden eingebrachten Pfählen errichtet. Somit können die resultierenden Betriebslasten der WEA in sehr viel tiefere Erdschichten abgeleitet werden. Pfahlfundamente werden entsprechend für Standorte mit sehr komplexen Gründungsverhältnissen eingesetzt und sind gegenüber Standardflachfundamenten in Deutschland eher selten, wobei stets die lokalen Eigenschaften des Bodens zu berücksichtigen sind. So werden Pfahlfundamente in ehemaligen Moor- oder Sumpflandschaften, sowie in Regionen mit Lössböden durchaus relevant. Aufgrund der hohen Einbautiefen der Pfähle wird nicht davon ausgegangen, dass diese beim Rückbau aus dem Erdreich entfernt werden.

Bezüglich der generellen Rückbaupflicht der Fundamente gibt es ferner die Unterscheidung, ob das Fundament vollständig rückzubauen ist oder nur bis zu einer gewissen Tiefe unter der Geländeoberfläche. So finden sich insbesondere in älteren Genehmigungen häufig Bestimmungen, die den Abbau der Fundamente nur bis zu einer Tiefe von bspw. 1,5 m unter der Geländeoberkante vorsehen und somit keine vollständige Entfernung vorschreiben. Hintergrund ist, dass die vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen somit auch bei einem nur teilweisen Rückbau der Fundamente wieder vollständig landwirtschaftlich nutzbar werden. Teilweise finden sich darüber hinaus in den Nutzungsverträgen Regelungen zwischen Grundstückseigentümer und Windpark-Betreiber bzgl. der Rückbautiefe der Fundamente. Basierend auf unserer Marktkenntnis scheint es obendrein, insbesondere bei neuen Genehmigungen und Nutzungsverträgen, einen klaren Trend hin zum vollständigen Rückbau der Fundamente zu geben. Ein Rückbau von bspw. nur 1,50 m Tiefe ist weiterhin auch vor dem Hintergrund der generellen, spezifischen Einbautiefe des jeweiligen Fundaments zu sehen. Falls ein Fundament für eine ältere WEA mit einer Einbautiefe von insgesamt 1,80 m zurückzubauen ist, macht es somit nur einen geringen Mehraufwand aus, das Fundament vollständig rückzubauen und nicht nur bis 1,50 m Tiefe. Der vollständige Rückbau empfiehlt sich im Hinblick auf eine uneingeschränkte Nachnutzung der Fläche.

In den durchgeführten Interviews mit Vertretern der Behörden wurde insbesondere auch auf den Aspekt der Rückbautiefe der Fundamente eingegangen. Hintergrund der nicht einheitlichen Handhabung ist insbesondere eine verschiedenartige Interpretation des Passus „Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes“. So interpretieren einige Behörden diesen Passus derart, dass der vorherige Zustand möglichst vollständig wieder herzustellen ist, während andere Behörden insbesondere auf die Bodenfunktion abstellen und zu dem Schluss kommen, dass die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes auch dann erfolgt, wenn die Fundamente nicht vollständig entfernt wurden, wohl aber eine landwirtschaftliche Nutzung und Bewirtschaftung der Flächen mittels Maschinen wie bspw. dem Pflug erfolgen kann. Von den befragten Behördenvertretern wurde jedoch in diesem Zusammenhang eine klare Tendenz dahingehend beschrieben, dass in neueren Genehmigungen eine Pflicht zur vollständigen Demontage der Fundamente enthalten ist.

Der eigentliche Rückbau eines Fundaments kann entweder mittels Sprengung oder Bagger erfolgen.

Im Fall einer Sprengung (auch als Lockersprengung bezeichnet) ist zunächst ähnlich der Sprengung eines Turms, gegenüber der zuständigen Behörde eine entsprechende Anzeige zu machen, aus der auch hervorgeht, dass es durch die Sprengung zu keiner Schädigung an umliegenden Anlagen, Häusern oder bspw. Versorgungsleitungen kommen kann. Grundsätzlich kann bei der Sprengung eines Fundaments jedoch von geringeren Erschütterungen ausgegangen werden als bei einer Turmsprengung. Für die eigentliche Sprengung sind zunächst Bohrungen am Fundament anzustellen,

sodass die Sprengladungen im Inneren des Fundaments detonieren können. Vor einer Sprengung wird das Fundament zudem mit Matten abgesichert, sodass absplitternde Gesteinsbrocken möglichst nicht umherfliegen können.

Nach erfolgter Lockersprengung liegen Bewehrungsstahl und Stahlbeton überwiegend getrennt vor und können mithilfe von Baggern aus der Fundamentgrube entfernt werden. Verbleibende Fundamentbestandteile können zudem ebenfalls mittels Bagger entfernt werden.

Neben dem Abbruch mittels Sprengung können Fundamente zudem auch mittels Bagger rückgebaut werden. Hierzu wird das Fundament mithilfe eines Meißels zunächst gebrochen und die freiliegenden Fragmente im Anschluss ausgebagert. Aufgrund der Erschütterungen beim Meißeln kann der Bewehrungsstahl relativ einfach vom Stahlbeton abgetrennt werden bzw. liegt beim Ausbaggern bereits überwiegend getrennt vor.

Gegenüber der Sprengung, die meist innerhalb von 2-3 Tagen abgeschlossen ist, muss beim Rückbau eines Fundaments mittels Bagger von deutlich längeren Zeiträumen ausgegangen werden (ca. 40 m³ pro Tag). Insbesondere bei größeren Fundamenten wird eine Lockersprengung von den meisten Akteuren deshalb als wirtschaftlichere Alternative angesehen.

Zur direkten Verbindung des Fundaments mit dem WEA-Turm befindet sich im Zentrum des Fundaments zudem (je nach Turmkonzept) ein größeres Einbauteil aus Stahl. Bei einer weiteren Verwendung der WEA wird dieses Fundamenteinbauteil teilweise sorgfältig aus dem Fundament entfernt, um nach Feststellung des mangelfreien Zustandes in einem neu zu erstellendem Fundament am Zweitstandort erneut eingesetzt werden.

Abbildung 7: Fundamentrückbau mittels Bagger



Quelle: (Ramboll)

2.2.1.3 Rückbau der Kranstellflächen

Der Rückbau der Kranstellflächen ist grundsätzlich als unproblematisch einzustufen. Mittels Bagger wird der eingebrachte Gesteinsschotter aufgenommen und kann prinzipiell als Schotter (ggf. nach Siebung) in neuen Projekten genutzt werden. Hierbei ist jedoch die Qualität des Schotters gesondert zu berücksichtigen. So kann es in Einzelfällen vorkommen, dass der genutzte Schotter gegenwärtig nicht mehr als Schotter für neue Projekte genutzt werden darf, etwa da sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen zwischenzeitlich geändert haben. So können beispielsweise insbesondere ältere Windparks auch Schottermaterialien aus Schlacken enthalten, welche je nach Bundesland bzw. Projektspezifika gegenwärtig nicht neu eingebaut werden dürfen.

Neben dem Schotter können zudem auch Geotextile oder Geogitter anfallen, die ursprünglich genutzt wurden, um die verschiedenen Schichten klar voneinander abzugrenzen.

Abschließend sind die während des Rückbaus entstandenen Gruben, insbesondere die Fundamentgrube, sowie auch der Bereich der Kranstellfläche, mit Material aufzufüllen. Hierbei sollte grundsätzlich Material gewählt werden, welches die künftige Bewirtschaftung der Flächen ermöglicht. Zudem sind teilweise auch Anforderungen bzgl. der generellen Bodenfunktion, wie bspw. die Sickerfähigkeit zu beachten.

2.2.2 Aktuelle Praxis der Entsorgung und resultierende Stoffströme

Im Folgenden erfolgt eine Kurzbeschreibung der aktuellen Entsorgungswege für die aus dem Rückbau von WEA resultierenden Abfallfraktionen.

2.2.2.1 Beton

Unter „Beton“ werden alle Abfälle des Abfallschlüssels 170101 gefasst, das heißt, Bau- und Abbruchabfälle aus Beton. Das Recyclingverfahren für Betonabbruch besteht aus einem Zerkleinerungsverfahren, das in Bauschuttzubereitungsanlagen durchgeführt wird. Dabei wird der Beton zu Gesteinskörnungen verarbeitet, die vor allem als Untergrundverfüllung im Straßenbau wiederverwendet werden.

Knapp ein Prozent des in Abfallentsorgungsanlagen registrierten Abfallaufkommens aus Beton wird in Sortieranlagen vorbehandelt. Kleinere Mengen des Betons werden zur Verfüllung übertägiger Abbaustätten verwendet oder in Deponien der Klasse 0 deponiert.

Im Jahr 2014 wurden in Deutschland 21.854 kt an Bau- und Abbruchabfällen aus Beton Abfallentsorgungsanlagen zugeführt (Destatis 2016). Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, wurden davon etwa über 95% stofflich verwertet.

Tabelle 1: Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Beton"

Behandlungsmethoden für Bau und Abbruchabfälle aus Beton	[kt]	[%]
Stoffliche Verwertung	20.719,6	95,0
Bauschuttzubereitungsanlagen	20.461,7	93,9
Boden-/chemisch-physikalische/sonstige Behandlungsanlage	92,5	0,4
Asphaltmischanlagen	12,6	0,1
Sortieranlage	152,8	0,7
Sonstige Verwertung	721,8	3,3
Lagerung bergbaufremder Abfälle in übertägigen Abbaustätten		
Energetische Verwertung	0,2	0,0
Thermische Abfallbehandlungsanlage	0,2	
Entsorgung	347,9	1,6
Deponie		
Gesamt	21.800,9	

Quelle: (Destatis 2017)

2.2.2.2 Eisenmetalle

Unter "Eisenmetalle" werden alle Abfälle gefasst, die nach Abfallschlüssel 160117 gelistet sind, darunter in erster Linie der Werkstoff Stahl. Baustahl wird im Allgemeinen vollständig stofflich verwertet (Martens 2011). Die allgemeine Verfahrenstechnik ist die schmelzmetallurgische Recyclingtechnik. Nach qualitätsgerechter Sortierung ist dieses Verfahren, in welchem Stahl eingeschmolzen und anschließend in eine neue Form gegossen wird, der optimale Weg des Recyclings (Martens 2011, 71). Der Recyclingprozess führt bei Stahl zu keinerlei Qualitätsverlust. Stahl ist einer der wenigen Werkstoffe, die sich unbegrenzt oft einschmelzen lassen ohne dabei seine Eigenschaften zu verändern. Tabelle 2 liefert eine Übersicht darüber, in welchen Abfallbehandlungsanlagen Eisenmetalle behandelt werden.

Tabelle 2: Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Eisenmetall"

Behandlungsmethoden für Eisenmetalle	[kt]	[%]
Schredderanlage und Schrottschere	374,3	81,0
Sonstige Behandlungsanlage	52,8	11,4

Behandlungsmethoden für Eisenmetalle	[kt]	[%]
Sortieranlage	34,5	7,5
Gesamt	462,3	

Quelle: (Destatis 2017)

2.2.2.3 Nicht-Eisenmetalle

Unter „Nichteisenmetalle“ werden alle Abfälle gefasst, die nach Abfallschlüssel 160118 gelistet sind. Beim Rückbau von Windenergieanlagen fallen hierbei allen voran Aluminium und Kupfer an. In der Regel werden Nichteisenmetalle vollständig recycelt. Tabelle 3 liefert eine Übersicht darüber, in welchen Abfallbehandlungsanlagen Nicht-Eisenmetalle behandelt werden.

Tabelle 3: Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden “Nicht-Eisenmetall”

Behandlungsmethoden für Nichteisenmetalle	[kt]	[%]
Schredderanlage und Schrottschere	144,4	72,1
Sonstige Behandlungsanlage	49,9	25,0
Chemisch-physikalische Behandlungsanlage	0,9	0,4
Sortieranlage	5,2	2,6
Gesamt	200,4	

Quelle: (Destatis 2017)

Aluminium

Aluminium liegt zumeist als Aluminiumlegierung vor. Solche bestehen aus ca. 99,5% Aluminium und enthalten weitere Elemente, wie Mangan, Magnesium, Kupfer, Silicium und Zink. Sortenreine Abfälle von Aluminiumlegierungen können ohne Qualitätsverlust recycelt werden. Bei nicht sortenreiner Erfassung verkompliziert sich der Recyclingprozess, dann sind Umschmelzprozesse erforderlich, wobei jedoch nicht sämtliche Qualitäten rückgewinnbar sind. (Fraunhofer 2013)

Die Methode der Raffination von Primäraluminium kann nicht angewendet werden, da Aluminium als unedles Metall unter Normalbedingungen mit Sauerstoff reagiert. Eine Raffination durch selektive Oxidation von den überwiegend edleren Verunreinigungen (Legierungen) ist daher nicht möglich. Eine Reinigung des Metalls durch physikalische und chemisch-reaktive Verfahren kann somit nur eingeschränkt erfolgen (Martens 2011, 94).

Im ersten Aufbereitungsschritt des Recyclings sind daher die Metalle freizulegen und durch Trennverfahren anzureichern. Der Aufschluss erfolgt zumeist durch Zerkleinerung, z. B. in Shreddern bzw. Schrottscheren. Anschließend wird das aufgeschlossene Material durch Siebklassierung (Abtrennung von Fein-, und Grobgut), Windsichtung (Abtrennung von flugfähigen, flächigen, d.h. 2-D Verunreinigungen) für die Sortierstufen vorkonditioniert. Magnetisierbare Bestandteile werden durch Magnetscheider (aushebende oder abwerfende Bauweise) abgeschieden. In Wirbelstromscheidern werden die elektrisch leitfähigen Buntmetalle wie Aluminium, Kupfer, Messing, Zink von nichtleitenden, z. B. inerten Partikeln separiert. Metallhaltige Reststoffströme können zudem z. B. als Nachreinigungsstufe mittels Induktionsscheider (Allmetallscheider) zurückgewonnen werden.

Entsprechend gewonnene Vorkonzentrate sind vor dem metallurgischen Prozess weiter zu behandeln. Durch Schwimm-Sink-Trennung (Trennung in einer Schwerflüssigkeit oder Schwertrübe) können Metalle nach ihrer Stoffdichte separiert werden, wobei maximale Trenndichten von bis maximal 3g/cm³ realisiert werden können. Damit können Leichtmetalle (Magnesium- und Aluminiumlegierungen) als Schwimmgut und Schwermetalle (Kuper, Zink, Messing, Blei) separiert werden.

Durch sensorbasierte Trennverfahren können die so erzeugten Vorkonzentrate nach Wandstärken und Stoffgruppen separiert werden. Mittels Röntgen-Transmission (XRT) erfolgt die Identifizierung durch die vom Partikel absorbierte Röntgenstrahlung, wobei diese sowohl von der Stoffdichte als auch von der durchstrahlten Materialdicke beeinflusst wird. Die Röntgensortierung bietet sich an für Metallgemische, in denen sich leichte Metalle wie Aluminium deutlich von schweren Metallen wie Kupfer, Messing, Zink oder Edelstählen unterscheiden lassen. Die Unterscheidung nach Materialdicken ist dann sinnvoll, wenn über dieses Merkmal auch unterschiedliche Legierungen sortiert werden können, wie z. B. dünnwandiges Knetaluminium und dickwandiges Gussaluminium.

Die sensorbasierte Trennung nach Farbe – als einfachste Maßnahme – ist dann möglich, wenn die Schrotte „blank“ sind und keine Oberflächenanhaftungen bzw. Lackierungen aufweisen. Auf diese Weise können z. B. rote/gelbe Metalle (Kupfer und Messing) von grauen Metallen (z. B. Aluminium) getrennt werden.

Mit der Laser-induzierten Plasma-Spektroskopie (LIBS) können Metalllegierungen identifiziert werden. Durch einen hochenergetischen Laserstrahl, der auf die Metalloberfläche geführt wird, wird ein Plasma erzeugt, aus dessen emittierenden Energieniveau auf die elementare Zusammensetzung geschlossen werden kann (Photoeffekt). Es existieren einige Anwendungen für die Aufbereitung sehr hochwertiger Metalle (z. B. Titan-Legierungen), und auch für bestimmte Aluminium-Legierungen.

Nach entsprechender Vorbehandlung wird das Aluminium eingeschmolzen. Um eine marktfähige Aluminiumlegierung herzustellen, kann die Legierung durch Mischen unterschiedlicher Schrotte nach oben oder durch Verdünnung mit Primäraluminium nach unten korrigiert werden (Martens 2011, 105)

Kupfer

Als Abfall anfallendes Kupfer aus dem Rückbau von WEA liegt zumeist in reiner Qualität (Schaltregler, Generatoren, Kabel, Drähte, Kontakte) vor. Sollten aufgrund vorhandener Verunreinigungen mechanische Vorkonditionierungsmaßnahmen erforderlich werden, erfolgt die Bereitstellung als ein Buntmetallvorkonzentrat analog zu technischen Optionen im vorhergehenden Abschnitt. Geringe Verunreinigungen stellen für den metallurgischen Recyclingprozess von Kupfer indes keine grundsätzlichen Hürden dar. Denn im Gegensatz zu Aluminium hat Kupfer eine sehr geringe Sauerstoffaffinität. Dies hat zur Folge, dass Kupfer effektiv von Verunreinigungen (Eisen, Aluminium) abgetrennt werden kann (Raffinationsverfahren). Legierungsmetalle können durch die Möglichkeit der selektiven Oxidation oder Verdampfung rückgewonnen werden (Martens 2011, 114). Die technologischen Möglichkeiten eines effektiven Recyclings unreinen Kupferschrotts sind aufgrund dieser chemischen Materialeigenschaften sehr gut.

Reines Kupfer wird vorwiegend durch Umschmelzen in Induktionstiegelöfen recycelt (Martens 2011, 119).

2.2.2.4 Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Rotorblätter und teilweise auch Gondeln bestehen zu einem großen Anteil aus glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Die Rotorblätter der WEA aus den 90er Jahren, d.h. jene, die aktuell oder in naher Zukunft rückgebaut werden, bestehen größtenteils aus GFK. Prinzipiell gibt es für GFK verschiedene Möglichkeiten der stofflichen oder energetisch-stofflichen Verwertung.

Pyrolyse

Das einzig bisher industriell verfügbare Verfahren zum Recycling von faserverstärktem Kunststoff ist die Pyrolyse (Emmerich/Kuppinger 2014). Diese Technologie stellt eine energetische wie stoffliche Verwertung dar: bei Temperaturen von 500 bis 600°C werden die Fasern aus der Polymermatrix herausgelöst und können so wiedergewonnen werden. Die dabei entstehenden Pyrolysegase werden

zur Energiegewinnung genutzt. Für die Rückgewinnung von Glasfasern ist die Pyrolyse derzeit noch nicht rentabel (Isenburg 2015).

Verwertung in Zementindustrie

(Pehlken 2015) zufolge etablierte sich für GFK die energetisch-stoffliche Verwertung in Zementfabriken am Markt. Die organischen Komponenten des aufbereiteten GFK dienen dabei als Ersatzbrennstoff, die mineralischen Komponenten als Zementmasse. Dieser wird in einer Mischung aus Sekundärbrennstoffen mit einem mittleren Heizwert von 15 MJ/kg zur Energiegewinnung genutzt. Die festen Rückstände dieses Verbrennungsprozesses werden als Bestandteil des Zementklinkers verwendet.

Als Beispiel für eine bereits stattfindende Umsetzung dieses Verfahrens dient die Kooperation des dänischen GFK-Herstellers Fiberline Composites mit dem Zementhersteller Holcim. Fiberline löst auf diese Weise sein GFK-Abfallproblem, Holcim nutzt den hohen Heizwert sowie die mineralischen Komponenten zur Einsparung natürlicher Ressourcen (Fiberline 2010). In Bremen wurde im Jahr 2016 eine Aufbereitungsanlage für GFK-Abfälle in Betrieb genommen. Das Unternehmen Neocomp bereitet dort jährlich bis zu 80.000 Tonnen GFK für die Zementindustrie auf (Milchert 2017, 31 f.).

Der Branchenverband für Faserverstärkte Kunststoffe AVK nennt die Verbrennung in Zementklinker-Herstellungsprozessen als alternative Verwertungsoption. Das gängigste Verfahren stellt diesem zufolge, die thermische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) dar (Isenburg 2015).

Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung in MVA verläuft jedoch unvollständig (Pehlken 2015). Bei der Verbrennung von GFK in einer MVA bleiben bis zu 60% des Materials als Asche zurück (Milchert 2017, 33), welche letztlich auf Deponien entsorgt werden müssen. Zudem können sich bei Verbrennung des GFK-Abfalls die Filter der Verbrennungsanlage zusetzen (Pehlken 2015).

Übersicht und Zusammenfassung

Tabelle 4: Möglichkeiten der Verwertung von GFK Abfällen

Verwertungskategorie (Abfallhierarchie)	Methode	Beschreibung	Herausforderungen
Stofflich/energetisch	Thermisch/Pyrolyse	Polymermatrix zerfällt in Pyrolysegase, die zur Energiegewinnung genutzt werden; Glasfaser bleiben zurück	Wirtschaftlichkeit nicht gegeben
Stofflich/energetisch	Thermisch	GFK als Ersatzbrennstoff in Zementindustrie	Logistik, da es nur wenige Anlagen zur Aufbereitung gibt
Energetisch	Thermisch	Verbrennung in konventioneller MVA	Verstopfung der Abluftreinigungsfilter, unvollständige Verbrennung

Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Verwertung in der Zementindustrie als aktuell beste und gängigste Recyclingoption gilt.

Für trockene Glasfasern besteht der Abfallschlüssel 101103. Unter diesem Schlüssel wurden im Jahr 2015 in Deutschland 52,7 kt an Glasfaserabfall den Abfallentsorgungsanlagen zugeführt. Etwas mehr als ein Drittel davon (19,7 kt) wurden deponiert, der Großteil (27,3 kt) in sonstigen Behandlungsanlagen verwertet.

2.2.2.5 Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK)

Der Trend der letzten Jahre geht hin zu Rotorblättern mit einem Anteil an carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK). Dies ist mit den deutlich besseren mechanischen Eigenschaften der Carbonfasern zu erklären: steigende Durchmessergröße der Rotoren setzen höhere Materialfestigkeit bei gleichzeitig geringerem Gewicht voraus (Pehlken 2015). Dies ist mit den deutlich besseren mechanischen Eigenschaften der Carbonfasern zu erklären: steigende Durchmessergröße der Rotoren setzen höhere Materialfestigkeiten bei gleichzeitig geringerem Gewicht voraus. Diese Anforderungen werden durch den Einsatz größerer Mengen an CFK erfüllt (Pehlken 2015).

Bei den industriell umsetzbaren Methoden für eine Verwertung von CFK stellt die Pyrolyse die beste Möglichkeit einer Verwertung dar, etablierte Verwertungswege bestehen jedoch zurzeit noch nicht. Wie unten im Text dargelegt wird, ist diese jedoch als „Downcycling“ zu verstehen.

Werkstoffliche/mechanische Verwertung

In thermoplastischer Matrix (Polyetheretherketon (PEEK) und Polyphenylenesulfide (PPS)) eingebettete Carbonfaser sind umformbar, weshalb diese mittels einer Hochtemperaturbehandlung werkstofflich recycelt werden können (Li/Englund 2016, 1272 f.) Eine industrielle Umsetzung dieser Ergebnisse findet allerdings aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht statt. CFK-Bauteile in duroplastischer Matrix können zu Halbzeugen oder Maschinenteilen verarbeitet werden. Die Firma Technokon hat ein entsprechendes Verarbeitungsverfahren entwickelt.

Chemisches Recycling

Das chemische Recycling von faserverstärktem Kunststoff hat die Wiedergewinnung der Fasern und Kunststoffe zum Ziel. Dabei werden die chemischen Bindungen der Polymermatrix aufgebrochen und so die Kohlestofffasern vom Polymer abgelöst. Die freigelegten Fasern sind prinzipiell von guter Qualität, oftmals ist jedoch deren Oberfläche kontaminiert. Bei einer eventuellen erneuten Einarbeitung der Faser in Polymere, das heißt der Herstellung eines recycelten CFK, stört diese Verunreinigung die Haftung der Faser zum Polymer. Als weiteren Makel nennen (Pimenta/Pinho 2011) mögliche negative Auswirkungen auf die Umwelt durch den Einsatz von gefährlichen chemischen Lösungsmitteln. Chemisches Recycling von CFK hat das Potenzial zur industriellen Umsetzung, wird aktuell aber noch nicht eingesetzt (Emmerich/Kuppinger 2014).

Pyrolyse

Das einzig bisher industriell verfügbare Verfahren zum Recycling von faserverstärktem Kunststoff ist die Pyrolyse (Emmerich/Kuppinger 2014). Diese Technologie stellt eine energetische wie stoffliche Verwertung dar. Im Pyrolyseprozess wird die Polymermatrix unter Sauerstoffabschluss (Nutzung von z.B. N₂) bei Temperaturen zwischen 500 und 600°C thermochemisch zersetzt (Milchert 2017, 30). Die Matrix zerfällt dabei in Pyrolysegase, welche energetisch verwertet werden. Die Carbonfasern bleiben zurück. Deren Qualität kann aufgrund Rückstände der Matrix auf der Faseroberfläche vermindert sein. Die Fasern sind dadurch steifer, brüchiger und somit auch schwer voneinander zu lösen. Durch eine gezielte Oxidation werden restlichen Matrixrückstände entfernt.

Die mittels der Pyrolysetechnik recycelten Carbonfasern fallen qualitativ in zweierlei Hinsicht von den ursprünglichen Carbonfasern ab. Zum einen weisen die Fasern eine Zugfestigkeit von nur 30–80% auf. Zum anderen sind die wiederaufbereiteten Fasern kürzer als das ursprüngliche Produkt. Die mechanischen Eigenschaften sind daher deutlich schlechter (Milchert 2017, 31). Die Verkürzung der Fasern stellt das aktuell größte Problem im Hinblick auf den Recyclingprozess dar. Es kann hier nicht von einem Stoffkreislauf die Rede sein, sondern es findet ein Downcycling statt. Schwerpunkt aller Forschung an Verfahrensverbesserungen liegt daher auf dem Erhalt möglichst großer Faserlängen, welche letztlich als das entscheidende Qualitätsmerkmal zu verstehen sind (Bifa 2012, 9). Zudem handelt es sich bei der Pyrolyse um ein kosten- und energieintensives Verfahren, das sich nur bei teuren Fasern lohnt (Isenburg 2015).

Die CFK Valley Stade Recyclinganlage hat eine Aufnahmekapazität von ca. 10.000 Tonnen pro Jahr. Das dort wiederaufbereitete CFK wird als Kurzfasernprodukt über die carboNXT GmbH vertrieben (CFK Valley Stade). Den Produzenten zufolge erhalten die recycelten Fasern eine Festigkeit von 90-95% der Ausgangsfasern (Milchert 2017, 31). Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet besteht für dieses Verfahren noch Optimierungsbedarf.

Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung von Carbonfasern in Müllverbrennungsanlagen verläuft unvollständig (Pehlken 2015). Bei der Verbrennung von CFK (wie auch GFK) in einer MVA bleiben bis zu 60% des Materials als Asche zurück (Milchert 2017, 41), welche letztlich auf Deponien entsorgt werden müssen. Neben dieser Problematik ist die konventionelle energetische Verwertung von faserverstärktem Kunststoff insbesondere im Hinblick auf CFK mit weiteren Herausforderungen konfrontiert. Zum einen können durch CFK-Fasern technische Defekte an den Anlagen ausgelöst werden, insbesondere sind negative Auswirkungen auf elektrostatische Partikelabscheider durch CFK zu erwarten. Zum anderen wird vermutet, „dass Carbonfasern unter Sauerstoffeinfluss ab einer Temperatur von 650°C lungengängige Teilchen bilden, die nach Einatmung – ähnlich wie bei Asbestfasern – das Lungenkrebsrisiko erhöhen.“ (Ressource 2016). Festzuhalten ist also, dass die Hausmüllverbrennung für CFK-Abfälle nicht geeignet sind (Bifa 2012).

Übersicht und Zusammenfassung

Tabelle 5: Möglichkeiten der Verwertung von CFK Abfällen

Verwertungskategorie (Abfallhierarchie)	Methode	Beschreibung	Herausforderungen
Stofflich	Chemisch	Ablösung der Faser von Polymermatrix	Industrielle Umsetzung, möglicher Einsatz umweltschädlicher Lösungsmittel
Stofflich/energetisch	Thermisch/Pyrolyse	Polymermatrix zerfällt in Pyrolysegase, die zur Energiegewinnung genutzt werden; Carbonfaser bleiben zurück	Stetige Verkleinerung der Faserlängen; Energie- und Kostenaufwand
Energetisch	Thermisch	Verbrennung in konventioneller MVA	Auslösen technischer Defekte, insb. Bei elektrostatischen Partikelabscheidern; Erzeugung lungengängiger Fasern

Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich keine hochwertige Recyclingmethode für CFK etablieren konnte. Mittels einer Pyrolyse wird es zwar recycelt, jedoch stellt die stetige Verkürzung der Fasern im Recyclingprozess eine Schwierigkeit dar. Dies ist vor allem insofern problematisch als für kürzere Fasern, die nicht mehr weiter in den Recyclingprozess eingebunden werden können, aktuell keine gute Lösung besteht. Die energetische Verwertung in einer MVA ist aufgrund der potenziellen Entstehung problematischer Faserbruchstücke, sowie der Problematik möglicher auftretender technischer Defekte innerhalb der Anlagen nicht möglich. Die mechanische Verwertung zu Füllstoffen im Straßenbau ist einerseits unwirtschaftlich, andererseits ist die Nachfrage dafür bei prognostizierten steigenden Mengen an CFK-Abfall zu gering.

Da keine exakten Statistiken über das Abfallaufkommen von CFK vorliegen, kann eine quantitative Beschreibung der faktischen Abfallströme leider nur in beschränktem Maße stattfinden. Einer Schätzung von (Bifa 2015) zufolge lag in Europa das Abfallaufkommen von CFK bei 12,4 kt. Eine

geordnete Sammlung ist wünschenswert, denn wird CFK wie klassischer Kunststoffabfall behandelt, so wird die oben dargelegte Problematik bei der energetischen Verwertung von CFK akut. CFK-Abfall von WEA kann allerdings problemlos sortenrein erfasst werden. Unter einem eigenen Abfallschlüssel werden sie allerdings nicht geführt.

2.2.2.6 Batterien und Akkumulatoren

Unter Batterien und Akkumulatoren werden alle Abfälle gefasst, die unter die Abfallschlüsselnummern 160601*, 160602*, 160603*, 160604 und 160605 fallen. Die Behandlungs- und Entsorgungswege der jeweiligen Batterietypen sind verschieden. Grundsätzlich besitzen Altbatterien ein hohes Wertstoffpotenzial, können aber auch gefährliche Bestandteile, wie z.B. Blei, Cadmium und Quecksilber beinhalten, weshalb eine vollständige Verwertung erstrebenswert ist.

Altbatterien werden häufig als Batteriegemisch gesammelt und müssen daher vor dem Recyclingprozesses entsprechend sortiert werden. Mittels eines elektromagnetischen Sortierverfahrens oder eines Röntgenverfahrens erfolgt eine Sortierung in die verschiedenen Batteriesysteme (bspw. Alkali-Mangan- oder lithiumhaltige Altbatterien). Hg-haltige Altbatterien werden im Sortierverfahren ebenfalls separiert.

Pb-Akkumulatoren (Abfallschlüssel 160601)*

Pb-Akkumulatoren setzen sich im Mittel folgendermaßen zusammen (Martens 2011, 136):

- Bleimetall (Sb- oder Ca/Sn-Legierung) 25-34%
- Paste (PbO-PbSO₄-Gemisch) 35-40%
- Separatoren (PE) 3-7%
- Gehäusematerial (PP) 5-9%
- Schwefelsäure (H₂SO₄) 10-25%

So beginnt der Recyclingprozess beispielsweise mit der mechanischen Aufbereitung durch Entleerung der Säure. Diese kann mit eines Neutralisierungsverfahrens (NaOH) zu Natriumsulfat (Na₂SO₄) recycelt werden ($H_2SO_4 + 2 NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2 H_2O$). Daraufhin werden die verschiedenen Bauteile des Akkumulators in einem sechsstufigen Prozess voneinander getrennt. Die Paste wird dabei abgesondert und anschließend wird in einem chemischen Prozess der Schwefel vom Blei abgetrennt ($PbSO_4 + 2 NaOH \rightarrow PbO + Na_2SO_4 + H_2O$). Der Schwefel wird als Natriumsulfat (Na₂SO₄) wieder in den Stoffkreislauf eingeführt, während die Pb-Oxide in einem schmelzmetallurgischen Verfahren weiterverarbeitet werden. Dies hat die Homogenisierung der verschiedenen Altbatteriearten und die Reduktion der Pb-Oxide zu Bleimetall (Pb-Legierungen oder Weichblei) zum Ziel (Martens 2011, 136–138).

Das in den Recyclingprozess eingehende Bleimetall ist zumeist eine Sb-Legierung, welche möglichst erhalten werden sollte. Aus diesem Grund wird die PbSb-Fraktion separat eingeschmolzen, woraufhin man Sb-haltiges Rohblei sowie eine Schlacke als Abfall erhält. Das dadurch gewonnene Sb-Blei wird in einem Raffinationsprozess von Cu-, Sn- und As-Verunreinigungen gesäubert. Die von seinem Schwefelteil befreite Paste ist nicht legiert und wird deshalb unter Zusatz eines Reduktionsmittels ebenfalls separat eingeschmolzen.

AlMn- / ZnC-Batterien

Beim Recycling dieser Batteriearten steht u.a. die Verwertung des Zinks im Vordergrund. Ein etabliertes Verfahren ist dabei der sogenannte Imperial-Smelting-Prozess. Zink verdampft ab einer Temperatur von 906°C, sodass bei der thermischen Behandlung der Batterien ein CO₂-reiches Abgas

entsteht, aus welchem metallisches Zink kondensiert werden kann (Martens 2011, 295). Weitere Recyclingverfahren sind das Wälzverfahren im Drehrohrofen, die Zinkverdampfung beim Schmelzen zerkleinerter Batterien zusammen mit Stahlschrott, das Sumitomo-Batrec-Verfahren, das Lichtbogenverfahren sowie das hydrometallurgische Verfahren. Martens (2011, 295) zufolge erzielt das hydrometallurgische Verfahren für Mn und Zn eine stoffliche Verwertungsquote von 100 %.

NiCd-Batterien (Abfallschlüssel 160602)*

Altbatterien dieses Typs werden beispielsweise nach der Batteriezerkleinerung zunächst in einem Vakuumdestillationsofen behandelt, worin bei 100 bis 150°C Wasser und flüchtige organische Stoffe abgesondert werden. Durch weitergehende Erhitzung auf 750°C verdampft das Cd-Metall vollständig und kann daraufhin als hochreines Cd (99,9 %) kondensiert werden. Das im Ofen zurückbleibende Ni-Fe-Gemisch (5-300 ppm Cd) ist für die Stahlmetallurgie geeignet. Alternativ zu diesem Verfahren besteht auch ein hydrometallurgisches Verfahren.

Quantifizierung der Entsorgungswege

Gemäß der Veröffentlichung des UBA zum Recycling von Altbatterien des Jahres 2017 (UBA 2018) werden von 233.439 Tonnen (t) Altbatterien, die im Jahr 2017 den speziellen Recyclingverfahren für Altbatterien zugeführt wurden, 197.241 t Sekundärrohstoffe wiedergewonnen. In den einzelnen Verfahren waren das insbesondere Blei, Schwefelsäure, Stahl, Ferromangan, Nickel, Zink, Cadmium sowie Quecksilber. Die Aufteilung der 233.439 t in die Kategorien

- Blei-Säure-Altbatterien (215.953 t),
- Nickel-Cadmium-Altbatterien (1.264 t) und
- sonstige Altbatterien (16.222 t)

offenbart den hohen Anteil der Blei-Säure-Altbatterien am Gesamtmarkt der Altbatterien.

Im Vergleich zum Vorjahr stieg im Jahr 2017 die Masse der zurückgewonnen Sekundärrohstoffe leicht um 9.289 t. Diese Rohstoffe können gemäß dem UBA im Rahmen einer Kreislaufführung erneut zur Batterie- und Akkuherstellung eingesetzt werden.

2.2.2.7 Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG)

EAG im Sinne des ElektroG sind Geräte, die für den Betrieb mit Wechselspannung von höchstens 1.000 V oder Gleichspannung von höchstens 1.500 V ausgelegt sind. (UBA 2014b) gibt eine stark vereinfachte Zusammensetzung von EAG wie folgt an:

- Metalle: 61%
- Kunststoffe: 21%
- Glas: 5%
- Elektronische Teile: 3%
- Andere Materialien: 10%

Aus dem Rückbau von WEA anfallende elektronische Geräte unterfallen dann dem ElektroG, wenn sie nicht speziell als Teil dieser Anlagen konzipiert und darin eingebaut sind (§ 2 Abs. 2 Nr. 6 ElektroG). Unabhängig davon hat die Befragung von Rückbau-Beteiligten ergeben, dass elektronische Geräte aus WEA in der Praxis die gleichen Erfassungs-, Entsorgungs- und Behandlungspfade durchlaufen, wie herkömmliche Elektroaltgeräte die von anderen Nutzern als privaten Haushalten stammen.

EAG sind getrennt vom unsortierten Siedlungsabfall zu erfassen (§ 10 ElektroG). Gemäß § 20 ElektroG sind EAG vor der Durchführung weiterer Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen einer Erstbehandlung in einer zertifizierten Erstbehandlungsanlage zuzuführen. Im Rahmen der Erstbehandlung von EAG sind mindestens alle Flüssigkeiten zu entfernen und die Anforderungen an die selektive Behandlung nach Anlage 4 ElektroG zu erfüllen. Je nach Gerätekategorie werden EAG in der Regel zunächst entweder manuell weiter zerlegt oder mechanisch zerkleinert. Recyclinganlagen für EAG sind zumeist spezialisiert und zielen auf eine umfassende Rückgewinnung von bestimmten Metallen oder edel-metallhaltigen Fraktionen (z.B. Leiterplatten) ab. Findet eine händische Demontage statt, so werden sortenreine Fraktionen erzielt. Der Prozess beginnt mit der mechanischen Zerkleinerung. Daran anschließend werden mechanische Verfahren wie Windsichtung oder Magnetabschneidung angewandt. Auf diese Weise werden getrennte Fraktionen (Eisen- und Nicht-Eisenmetalle, Glas, Kunststoffe etc.) erzielt, welche einer weiteren (stofflichen) Verwertung zugeführt werden können (Bipro 2016).

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 782.214 Tonnen EAG erfasst (BMU 2018). 72.210 Tonnen hiervon waren EAG aus anderen Quellen als private Haushalte (gewerbliche EAG). Im Recyclingprozess wurde ein Großteil (86,7 %) der EAG stofflich verwertet oder einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt.

Nach Bipro (2016) ist anzunehmen, dass der energetisch verwertete Teil der EAG derzeit noch hauptsächlich dem Kunststoffanteil zugerechnet werden muss. Stofflich verwertet wird hingegen nur der Metallanteil.

Transformatoren

Der in einer WEA verbaute Transformator stellt in Bezug auf das Gewicht ca. die Hälfte der anfallenden Menge an EAG dar. Ein Transformator wird zu Beginn des Recyclingprozesses vollständig demontiert und in den folgenden Fraktionen verwertet (Alku 2018):

- Transformatorengehäuse (im Normalfall aus Aluminium, verzinktem Blech oder Edelstahl)
- Kupfer- bzw. Aluminiumwicklungen
- Trafobleche kalt- oder warmgewalzt (im Normalfall eine Eisen-Silizium-Legierung)
- Holz- und Papierrückstände
- Transformatorenöl
- Porzellanteile

Ist der Transformator erst einmal in diese Wertstoffgruppen zerlegt, können diese einzeln dem Recyclingprozess zugeführt werden. Der genaue Recyclingprozess der Fraktionen Aluminium, Kupfer und legiertes Eisen wurde oben bereits beschrieben. Holz- und Papierrückstände sowie Porzellanteile sind nur in so geringen Mengen gegeben, dass eine detaillierte Beschreibung des Recycling- und Entsorgungsprozesses hier nicht angebracht erscheint.

Etwas anspruchsvoller ist hingegen die Fraktion Transformatorenöl. Dieses ist ein hochraffiniertes Mineralöl oder dünnflüssiges Silikonöl, welches in der Hochspannungstechnik eingesetzt wird. Es ist als gefährlicher Abfall gekennzeichnet und kann unter folgenden Abfallschlüsselnummern geführt werden (Netwaste 2018):

- 130307* nichtchlorierte Isolier- und Wärmeübertragungsöle auf Mineralölbasis
- 130308* synthetische Isolier- und Wärmeübertragungsöle

➤ 130310* andere Isolier- und Wärmeübertragungsöle

Das Transformatorenöl wird in Raffinerien stofflich verwertet und zu Basisölen aufgearbeitet (Netwaste 2018). Vor dem deutschlandweiten Verwendungsverbot polychlorierter Biphenyle (PCBs) im Jahr 1989 wurde diese Chemikalie u.a. als Bestandteil von Transformatorenölen verwendet. Bei WEA aus den 80er-Jahren muss daher sichergestellt werden, dass PCB-freies Transformatorenöl verwendet wurde, ehe dieses dem Recyclingprozess zugeführt wird.

2.2.2.8 Seltene Erden (SE) (Neodym, Dysprosium)

Es gibt eine große Anzahl verschiedener potenzieller technischer Prozesse, SE-Metalle zu recyceln. Aktuell werden jedoch keine dieser Möglichkeiten industriell umgesetzt, ein Recycling von Nd und Dy findet somit nicht statt (Panayotova 2012). Neben derzeit niedrigen Weltmarktpreisen für SE-Metalle, ist dies auch der Tatsache geschuldet, dass Nd und Dy in sehr geringer Konzentration im Abfallstrom vorkommen. Die Elemente sind in der Regel nur ein sehr kleiner Bestandteil innerhalb eines komplexen Gemischs aus anderen Metallen und Plastik. Gegenüber den vielen Endverbraucherprodukten, in denen seltene Erden in sehr geringer Menge vorkommen, haben die Permanentmagneten aus WEA den Vorteil, dass diese vergleichsweise groß sind. Ein Recycling der seltenen Erden könnte sich hier als wirtschaftlich erweisen.

Als weiteren Grund für die fehlende Umsetzung möglicher Recyclingmethoden nennt (Panayotova 2012) die Neuartigkeit mancher Anwendungen von SE. Relevante Masseflüsse befinden sich demnach noch in der Gebrauchsphase und werden erst in den kommenden Jahren zu Abfall werden. In der aktuellen Praxis werden SE als Mischschrott gehandhabt.

(Hitachi 2010) beschreibt ein chemisches Verfahren zur Gewinnung der SE-Elementen Magneten, die in gebrauchten Elektrogeräten aller Art vorkommen (Laptops, Handys etc.) Nd und Dy werden dabei dem Magneten in einem chemischen Extraktionsprozess entzogen. Ersten Ergebnissen zufolge erreichte (Hitachi 2010) eine Rückgewinnung von 95% der im Magneten enthaltenen SE-Elemente. Das Verfahren ist jedoch noch nicht etabliert.

2.2.2.9 Schotter

Gesteinsschotter wird im Abfallschlüssel unter 170504 (Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 170503* fallen) und 170506 (Baggergut mit Ausnahme desjenigen, das unter 170505 fällt) geführt. Prinzipiell kann eingebrachter Gesteinsschotter ohne Behandlung in neuen Projekten wiederverwendet werden. Wird es einer Abfallbehandlungsanlage zugeführt, so wird es entweder als „Boden und Steine“ oder „Baggergut“ geführt. Im Jahr 2015 wurden in Deutschland 115.080,6 kt Boden und Steine sowie 2.174,0 kt Baggergut Abfallbehandlungsanlagen zugeführt (Destatis 2017). Wie aus Tabelle 6 zu entnehmen ist, werden davon über 80% stofflich verwertet.

Tabelle 6: Übersicht Entsorgungs- und Verwertungsmethoden "Schotter"

Behandlungsmethoden	Boden und Steine [kt]	Boden und Steine [%]	Baggergut [kt]	Baggergut [%]
Thermische Abfallbehandlungsanlagen	0,7	0,0		
Chemisch-physikalische Behandlungsanlage	53,1	0,0	603,4	27,8
Bodenbehandlungsanlage	1.273,3	1,1	21,4	0,8
Biologische Behandlungsanlage	66,7	0,1		
Bauschuttzubereitungsanlagen	10.674,7	9,3	115,7	5,3
Sortieranlage	324,6	0,3		
Sonstige Behandlungsanlage	333,0	0,3	552,4	25,4
Sonstige Verwertung	81.619,7	70,9	370,1	17,0

Behandlungsmethoden	Boden und Steine [kt]	Boden und Steine [%]	Baggergut [kt]	Baggergut [%]
Lagerung bergbaufremder Abfälle in übertägigen Abbaustätten				
Entsorgung	20.729,1	18,0	510,3	23,5
Deponie				
Gesamt	115.080,6		2 174,0	

Quelle: (Ramboll)

2.2.2.10 Sonstiges

SF₆ (Schwefelhexafluorid)

SF₆ wird als Isoliergas in der Mittel- und Hochspannungstechnik eingesetzt. Das Recycling dieses Gases ist insofern von besonderer Relevanz, als es mit einem Treibhauspotential von 22.800 gegenüber CO₂ zu den stärksten bekannten Treibhausgasen gehört. Aufgrund dieser Charakterisierung unterliegt die Entsorgung dieses Gases der gesonderten Verordnung (EU) Nr. 517/2014.

Seit 2005 gibt es eine freiwillige Selbstverpflichtung mit den betroffenen Industrien zur Reduktion von SF₆- Emissionen. Diese Selbstverpflichtung enthält auch Vereinbarungen zum Rückbau¹⁰.

Die getrennte Erfassung von SF₆ beim Rückbau der Schaltanlagen ist daher besonders wichtig. Gelingt es, SF₆ ohne Gasaustritt zu sammeln, so kann es aufbereitet und wiederverwendet werden. Dabei wird das SF₆-Gas in einem automatisierten Reinigungsprozess von Stickstoff oder Luft bereinigt. Der Reinheitsgrad des recycelten Gases ist > 99% (Dilo 2018).

Öle und Hydraulik- und Kühlflüssigkeiten

Betriebsmittel wie Altöle und Hydraulikflüssigkeiten werden bereits während der Betriebsphase einer WEA regelmäßig erneuert. Daher ist bereits ein etablierter Entsorgungsprozess vorzufinden. Altöle sind gemäß § 1a Abs. 1 AltöIV definiert als „Öle, die als Abfall anfallen und die ganz oder teilweise aus Mineralöl, synthetischem oder biogenem Öl bestehen.“ Die entsprechenden AVV-Schlüsselnummern sind in Anlage 1 zur AltöIV aufgelistet. Altöle werden im Normalfall stofflich in einem Recyclingprozess zu Basisölen aufbereitet. Basisöl stellt als Mineralöl die Grundkomponente zur Herstellung von Schmierstoffen dar (UBA 2014a). Enthalten Altöle einen zu hohen Gehalt an PCB oder anderen schädlichen Stoffen findet eine Aufbereitung nur unter der Voraussetzung statt, dass die Schadstoffe beim Aufbereitungsprozess sicher zerstört werden. Andernfalls werden sie als Ersatz für normale Brennstoffe in Feuerungsanlagen energetisch verwertet (UBA 2014a).

Hydraulikflüssigkeiten werden in der Regel auf Mineralölbasis hergestellt und werden deshalb in der Abfallphase auf gleiche Weise wie Altöle behandelt.

Geotextilien und Lacke

Geotextilien werden in der Regel aus Polyester, Polyethylen oder Polyamid hergestellt. Es ist davon auszugehen, dass diese nicht getrennt erfasst werden, sondern gemeinsam mit dem Schotter entsorgt werden. Sollte doch eine getrennte Erfassung stattfinden, so werden Geotextilien als Kunststoffe in den Stoffkreislauf eingehen.

Lacke fallen als Beschichtung der Rotorblätter nicht als getrennter Stoff an, sondern werden gemeinsam mit den Rotorblättern (CFK und GFK) entsorgt.

¹⁰ siehe auch Infoseite des Umweltbundesamtes: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/schaltanlagen#textpart-1

2.2.3 Aktuelle Praxis Rücklagen und Rückbaukosten

2.2.3.1 Analyse der aktuell anfallenden Kosten für den Rückbau

Die Finanzierung des Rückbaus einer WEA ist vom Betreiber des Windparks vorzunehmen.

Zudem enthalten BImSchG-Genehmigungen, sowie teilweise auch Nutzungsverträge, oft Bedingungen (siehe auch Kapitel 2.1) zur Erbringung einer Rückbaubürgschaft, die meist von der finanzierenden Bank ausgestellt wird und für die der Betreiber entsprechende Gebühren zahlt. Von einem einzelnen Akteur wurde in diesem Zusammenhang zudem angemerkt, dass in einigen Projekten Pflichten zum Vorhalten von Bürgschaften womöglich fehlen würden. Für gewisse Konstellationen ist dieser Verdacht grundsätzlich begründet, sodass nicht pauschal davon ausgegangen werden darf, dass es für jede deutsche WEA eine Rückbaubürgschaft gibt. Gemäß den Interviews mit den Behörden kann jedoch festgestellt werden, dass es bisher zu keinen Problemen bzgl. der generellen Rückbauverpflichtung der Betreiber gekommen ist. Für den Fall, dass für ein konkretes Projekt keine Rückbauverpflichtung gemäß § 35 BauGB besteht (siehe Kapitel 2.1.2), kann die Rückbauverpflichtung bspw. innerhalb eines B-Plans festgelegt werden. Zudem wurde von einem einzelnen Sachbearbeiter einer Genehmigungsbehörde auch recht pragmatisch festgestellt, dass die Rückbauverpflichtung pauschal immer (auch für WEA die nicht im Außenbereich errichtet werden) in BImSchG-Genehmigungen aufgenommen werde und es diesbezüglich noch keine Probleme gegeben habe.

Hierbei besteht die Bürgschaft normalerweise bis zur Beendigung der Finanzierungslaufzeit (derzeit max. 18–19 Jahre) durch die Bank fort. Nachfolgend wird die Bankbürgschaft üblicherweise durch ein Sicherungskonto ersetzt. Hierzu kann der Betreiber eines Windparks entweder bereits vor Beendigung der Finanzierung lineare Ansparungen auf dem Konto vornehmen oder das für die Kreditfinanzierung ebenfalls vorzuhaltende Schuldendienstdeckungskonto wird zur Beendigung der Projektfinanzierung in ein Reservekonto für den Rückbau umgewandelt und mögliche Differenzbeträge bis zur Höhe der erforderlichen Rückbaubürgschaftshöhe vom Betreiber zusätzlich eingezahlt.

Aufgrund von einer zwischenzeitlich geänderten Einschätzung des Zweitmarktes, wurde zudem von einem einzelnen Akteur angegeben, dass dieser freiwillig auf dem Reservekonto höhere Rückbaurücklagen gebildet habe, als die geforderte Rückbaubürgschaft. Grundsätzlich lässt sich diese Einschätzung jedoch nicht auf andere Akteure übertragen, sodass häufig Rücklagen in Höhe der Bankbürgschaft gebildet und diese als ausreichend für den Rückbau empfunden werden.

Tatsächlich haben einzelne Betreiber zudem spezifische, jedoch meist sehr rudimentäre Ansätze um die zu erwartenden Kosten für den Rückbau ihrer WEA abzubilden. Solche Ansätze basieren bspw. auf einem linearen Kostenansatz als Funktion der Nennleistung und berücksichtigen hierbei nicht die spezifischen Unterschiede der verschiedenen WEA-Konzepte (insbesondere Turmkonzepte oder Nabenhöhen).

In einzelnen Bundesländern wird die Berechnung der Sicherheitsleistung für den Rückbau auch vorgegeben. Beispiele für Methoden aus der Praxis zur Berechnung der Sicherheitsleistung werden in Kapitel 3.4.1 erörtert.

Gemäß den Ergebnissen der Befragungen werden die Kosten für den Rückbau derzeit wie folgt eingeschätzt, wobei nachfolgende Auflistung jeweils aus den Ansätzen der verschiedenen Akteure zusammengetragen wurde und die Werte somit keine gemeinsame Schnittmenge bspw. in Form eines Mittelwertes oder Ähnlichem darstellen:

- 0,6 MW 16.000 €
- 0,6 MW 60.000 €
- 1,5 MW 40.000 € (exkl. Entsorgung)

- 1,5 MW 48.000 €
- 2 MW 100.000 €
- 3 MW 120.000 - 180.000 €
- Aktuelle Modelle¹¹: 60.000 - 70.000 €

Insbesondere bei Berücksichtigung der Gespräche mit den Fachfirmen, sowie auch unter Berücksichtigung der vorstehenden Ergebnisse bzgl. der Verfahrensweise beim Rückbau und den stofflichen Zusammensetzungen einer WEA, wird jedoch schnell deutlich, dass bereits für eine ungefähre Schätzung der Rückbaukosten weitaus detailliertere Informationen zu den WEA bzw. dem Windpark benötigt werden als bspw. nur die Nennleistung.

Für den Bereich des eigentlichen Rückbaus kommt hier in erster Linie dem zum Einsatz kommenden Kran eine besondere Bedeutung zu. Hierbei sind die Nabenhöhe einer WEA, sowie das Gewicht der abzuhebenden schwersten Komponente (in Nabenhöhe) relevant. Basierend auf diesen Eingangsdaten ist zunächst ein geeigneter Kran auszuwählen. Für diesen Kran fallen entsprechend Kosten für die An-/Abfahrt, Nebenkosten (z. B. Begleitfahrzeuge, Mautgebühren, Versicherung), sowie eine Tagespauschale an. Werden mehrere Anlagen umgebaut, sind außerdem zusätzliche Kosten für das Umsetzen (typischerweise 50% der Kosten für An-/Abfahrt) des Krans zu berücksichtigen und die An-/Abfahrtpauschale kann entsprechend auf die verschiedenen WEA umgelegt werden. Besonders die An-/Abfahrtpauschale kann je nach eingesetztem Kran zu erheblichen Kosten (für Nabenhöhen von 140 m bis zu ca. 90.000 €) führen, sodass sich beim Rückbau eines Windparks mit mehreren WEA gegenüber dem Rückbau einer einzelnen WEA klare Skaleneffekte ergeben. Aufgrund der aktuellen Lage auf den Autobahnen und vielen Baustellen, sowie ggf. gesperrten Abschnitten (z. B. Brücken) werden Angebote von Firmen, die Kräne verleihen (typischerweise inkl. Kranführer) gegenwärtig projektspezifisch kalkuliert, da bspw. anfallende Nebenkosten nicht pauschal abgeschätzt werden können.

Ansonsten ist bezüglich der Kosten von großer Relevanz, welcher Turmmodell eingesetzt worden ist. So können bei Stahlrohtürmen, aufgrund des Stahls, mit dem Recycling Gewinne erwirtschaftet werden, die anderen Kosten des Rückbaus entgegenstehen, wohingegen Stahlbeton meist zusätzliche Kosten verursacht.

Weiterhin kann es auch in Abhängigkeit der eingesetzten Rückbaumethode zu unterschiedlichen Kosten kommen. Hierbei empfiehlt es sich derzeit die Demontage mittels Krans zu unterstellen und für Betonturmsegmente eine Sprengung zu berücksichtigen. Bei dem Rückbau der Fundamente, für diese sollte möglichst eine vollständige Entfernung berücksichtigt werden, kann wahlweise entweder eine Sprengung oder die Demontage mittels Bagger berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Entsorgung der einzelnen Stoffe gibt es regional teilweise erhebliche Unterschiede. So wurde bspw. berichtet, dass in Norddeutschland Betonabfall teilweise kostenlos entsorgt werden kann, wohingegen in Süddeutschland meist Gebühren (bis zu 25 €/t) anfallen. Ursächlich sei dies in der üblichen Zulassung von Recyclingschotter in Norddeutschland und der eher seltenen Zulassung in Süddeutschland begründet. Weiterhin befinden sich bspw. die Entsorgungsfirmen für Rotorblätter in Norddeutschland, sodass für eine in Süddeutschland rückzubauende WEA grundsätzlich höhere Transportkosten anfallen.

Insbesondere für den Bereich der Rotorblattentsorgung wurden von den verschiedenen Akteuren erheblich (200 bis 1.400 € je t für Rotorblätter ohne CFK) abweichende Angaben gemacht. Diese Unterschiede finden sich teilweise (jedoch nicht ganz so extrem) auch in den Schätzungen der WEA-

¹¹ Anm.: Hier sind WEA-Typen gemeint, die derzeit rückgebaut werden und keine aktuell neuen WEA-Typen.

Hersteller bezüglich der zu erwartenden Rückbaukosten wieder, die typischerweise als Bestandteil des BImSchG-Antrags einzureichen sind und nach denen sich (je nach Bundesland) die Höhe der zu stellenden Bürgschaft richtet.

Als ein zusätzliches Risiko hinsichtlich der resultierenden Kosten muss der lange Zeitraum angesehen werden, bis zu dem der Rückbau einer WEA tatsächlich erfolgt. Je nach angenommener jährlicher Inflation ergeben sich hier bereits kalkulatorisch erhebliche Schwankungen. Zudem sind Recyclingpreise teilweise sehr volatil. So wurde von einem Befragten bspw. angegeben, dass für Stahlschrott („Brennerschrott“) bereits Preisschwankungen zwischen 80 und 400 € je Tonne beobachtet werden konnten, was einen gravierenden Einfluss auf die bilanzierten Gesamtkosten für den Rückbau hat.

Da in den letzten Jahren gute Bedingungen an Zweitmärkten herrschten, waren die teilweise hohen Kosten für die Entsorgung von rückgebauten WEA-Komponenten in der Vergangenheit bei vielen Akteuren von eher untergeordneter Rolle und wurden ggf. kaum wahrgenommen. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren eher WEA als Repowering-Projekte abgebaut, sodass die resultierenden Kosten für die Demontage immer gegen zukünftige Erlöse durch eine neue, größere WEA gegengerechnet werden konnten, was zukünftig sehr wahrscheinlich häufiger nicht der Fall sein wird (siehe nachfolgendes Kapitel). Entgegen den Ergebnissen der Interviews, die für das konkrete Forschungsvorhaben durchgeführt wurden, und die die gebildeten Rücklagen überwiegend als ausreichend und den Rückbau der WEA somit als nicht unterfinanziert einschätzen, sind uns auch andere Einschätzungen bekannt. So führen wir während Transaktionen regelmäßig Abschätzungen von Rückbaukosten durch und vergleichen diese mit den Rückstellungsempfehlungen. Hierbei zeigt sich häufig, dass die Rückbaukosten einer WEA bzw. eines Windparks teilweise zu optimistisch eingeschätzt werden.

Von einzelnen Akteuren wurde, diesen Beobachtungen komplett gegenläufig, jedoch auch berichtet, dass teilweise Bürgschaften (z.B. 300.000 €/WEA) eingefordert werden, die als deutlich überzogen wahrgenommen werden.

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass die Abschätzung von tatsächlichen Rückbaukosten (speziell für noch junge Projekte) auch bei größtmöglicher Sorgfalt, mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Fragen zu einer möglichen Unterfinanzierung des Rückbaus erscheinen deshalb wenig sinnvoll und können maximal für Projekte beantwortet werden, die in naher Zukunft rückgebaut werden. Vielmehr sollte insbesondere zur Minimierung der zeitlich bedingten Unsicherheiten eine regelmäßige Kontrolle der Bürgschaften/Rücklagen auf Angemessenheit erfolgen, was sowohl in BImSchG-Genehmigungen, als auch in Nutzungsverträgen bereits teilweise fixiert ist. Sollten solche Regelungen für bestehende WEA nicht in den Verträgen/Genehmigungen vorzufinden sein, sollten WP-Betreiber entsprechende Prüfungen intern durchführen und notfalls aus eigenen Stücken entsprechend höhere Rücklagen bilden. Dies besonders, da eine Branche mit dem Fokus auf dem Ziel eine möglichst nachhaltige und grüne Energielandschaft zu fördern, eben auch beim Rückbau und dessen Finanzierung nachhaltig agieren muss, um gesellschaftlich positiv wahrgenommen zu werden.

Bei der tatsächlichen Abschätzung der zu erwartenden und bilanziell zu berücksichtigenden Kosten sollte, entgegen der aktuellen Praxis, sehr viel detaillierter vorgegangen werden. So halten wir es für notwendig, dass besonders die folgenden Aspekte Berücksichtigung finden:

- Nabenhöhe der WEA
- Zahl der rückzubauenden WEA
- Turmkonzept
- Gewichte, Volumina, Zusammensetzung der einzelnen Komponenten

- Kranmodell inkl. Kosten
- Art der Demontage
- Entsorgungskosten (möglichst unter Berücksichtigung der Regionalität)

Weder bei den Berechnungen der WEA-Hersteller (hier fehlt meist die Berücksichtigung der Anlagenanzahl, das konkrete Demontageverfahren und die regionalen Besonderheiten), noch die meist länderspezifischen Ansätze (z. B. prozentuale Anteile der Rohbau-/Herstell-/Investitionskosten oder spezifisch z. B. X €/MW oder Y €/m Gesamthöhe) und die internen Ansätze der Betreiber (gemäß Befragung) weisen diese Detailtiefe auf.

2.2.3.2 Potentiale der Weiternutzung

Bezüglich der generellen Potentiale des Weiterverkaufs ganzer WEA wurde von dem Großteil der befragten Akteure eine ähnliche Einschätzung abgegeben. So waren Zweitmärkte insbesondere in Osteuropa in den vergangenen Jahren ein sehr guter Absatzmarkt für in Deutschland rückgebaute WEA. Eine Entsorgung ganzer WEA war daher eher selten. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die in der Vergangenheit rückgebaute WEA häufig als Repowering-Projekte anzusehen sind und entsprechend ihre ursprüngliche Auslegungsdauer von 20 Jahren oft noch gar erreicht hatten. Folglich kann bei gebrauchten WEA aus Repowering-Projekten tendenziell von einem insgesamt längeren Betrieb am Zweitstandort ausgegangen werden, als dies bei WEA der Fall ist, die ihre ursprüngliche Auslegungsdauer (von z.B. 20 Jahren) bereits vollständig oder fast vollständig am Erststandort verbraucht haben.

Gegenwärtig stellt sich die Situation für den Verkauf gebrauchter WEA teilweise schwieriger dar. So dürfen bspw. in Polen, einem direkt benachbarten und ehemals sehr relevanten Zweitmarkt, aktuell keine gebrauchten WEA mehr errichtet werden. Weiterhin relevante Zweitmärkte befinden sich derzeit vor allem in Osteuropa (Weißrussland, Kasachstan, Ukraine, Georgien). Zudem wird Russland als ein derzeit wachsender Zweitmarkt angesehen. Neben Osteuropa werden gebrauchte WEA zudem auch nach Irland, Italien oder UK verkauft, da hier auskömmliche Fördersysteme, auch für gebrauchte WEA vorhanden sind. Teilweise werden gebrauchte WEA zudem auch in deutlich weiter entfernte Regionen wie bspw. den Nahen Osten, Afrika oder nach Indien verkauft, wobei hier aufgrund der hohen Transportkosten, weniger einzelne WEA, sondern eher größere Windparks bestehend aus mehreren WEA angefragt werden, was zu Einsparungen durch Skaleneffekte bei den Logistikkosten führt. Der Transport wird hierbei in aller Regel vom Käufer übernommen.

Die Findung eines geeigneten Kaufpreises für gebrauchte WEA erfolgt zu klaren marktwirtschaftlichen Bedingungen (Angebot und Nachfrage), wobei einzelne WEA vor einem möglichen Kauf intensiv begutachtet werden. So ist es durchaus üblich auch gesonderte Inspektionen an den WEA durchzuführen, um deren technischen Zustand zu erfassen. Zudem wird sehr großes Augenmerk auf eine lückenlose Dokumentation des bisherigen Betriebs gelegt. Als erheblichen Mangel wird es häufig angesehen, wenn WEA längere Zeit zwischengelagert waren, insofern empfiehlt es sich ältere WEA bereits vor dem Rückbau zu offerieren. Aktuelle Angebote zum Verkauf gebrauchter WEA liegen zwischen 50.000 und 250.000 €/MW, je nach Alter und technischem Zustand.

Von Seiten der Käufer gibt es zudem teilweise klare Präferenzen bezüglich gewisser WEA-Modelle bzw. Hersteller. Bei der WEA-Auswahl fließen häufig bisherige Erfahrungen des Käufers, sowie ggf. die Ausprägung des eigenen, bestehenden Bestandes mit ein. So sind Käufer oft an WEA des Herstellers interessiert deren WEA sie bereits selber betreiben. Nicht zu vernachlässigen sind zudem auch technisch Restriktionen in den Zweitmärkten, die projektspezifisch verstanden werden müssen. So gibt es häufig Begrenzungen aufgrund des vorhandenen Netzanschlusses, wodurch zu leistungsstarke WEA nicht in Betracht kommen. Ähnliche Restriktionen gibt es zudem bspw. auch bezüglich der generellen Dimensionen einer gebrauchten WEA. Letztlich sind als zusätzliche Restriktion für einen

Zweitmarkt auch die vielfältigen nationalen Gesetze und Regelungen zu verstehen, die wie am Beispiel Polens auch zu einem abrupten Ausfall eines ganzen Marktes führen können.

In Hinblick auf die Anlagendimensionen stellt sich zudem auch die Frage, ob ab einer gewissen Anlagengröße eine Zweitnutzung von WEA überhaupt noch wirtschaftlich darstellbar und technisch sinnvoll ist. So steigen die Kosten für den Transport und die erneute Errichtung bzw. Inbetriebnahme bei wachsender Anlagengröße entsprechend deutlich an. Ob dieser Anstieg über mögliche Ertragssteigerungen kompensiert werden kann, lässt sich derzeit nicht prognostizieren. Zudem sind in einem solchen Zusammenhang auch die jeweiligen Marktbedingungen, sowie die tatsächliche zusätzliche Nutzungszeit an dem Zweitstandort von sehr hoher Relevanz.

Zukünftig deutet derzeit vieles auf eine deutliche Senkung der Verkaufschancen ganzer WEA in einen Zweitmarkt hin. So fallen in Deutschland Ende 2020 eine ganze Reihe von WEA aus den Förderbedingungen des EEG. Da diese Anlagen nach heutigen Gesichtspunkten und im gegenwärtigen Strommarktniveau aller Voraussicht nach nicht wirtschaftlich weiter betrieben werden können (WindGuard 2016), ist für die Folgejahre mit sehr hohen Rückbauzahlen zu rechnen und folglich mit einem sehr großen potentiellen Angebot an gebrauchten WEA zu rechnen. Es wird vermutet, dass die Nachfrage nicht in gleichem Maße ansteigt, sodass der überwiegende Teil der rückgebauten WEA nicht weitergenutzt, sondern verwertet werden wird.

Neben der Zweitnutzung ganzer WEA kann zudem auch die Zweitnutzung einzelner Komponenten erfolgen. Hierbei können einerseits demontierte Komponenten direkt in anderen WEA baugleichen Typs genutzt werden oder die Komponenten können in einem Ersatzteillager zwischengelagert und im Fall eines Schadens an einer baugleichen WEA als Ersatzteil eingesetzt werden. Nach Aussage der befragten Akteure wird der Markt für einzelne gebrauchte Komponenten derzeit besser eingeschätzt, als der Markt für gebrauchte vollständige WEA. Einzelne Komponenten werden zudem meist im Inland verkauft. Typische gebrauchte Komponenten für eine solche Zweitnutzung sind insbesondere Großkomponenten (Blätter, Getriebe, Generatoren, Hauptwellen und zum Teil auch größere elektronische Bauteile und Azimutantriebe). Rotorblätter werden hierbei typischerweise als kompletter Satz gehandelt, was darin begründet ist, dass Rotorblätter in ihrer Gewichtsverteilung typischerweise schwanken und zur Vermeidung von Unwuchten möglichst ähnliche Blätter zu Blattsätzen zusammengefasst werden.

Perspektivisch erwarten wir für den Markt der gebrauchten Komponenten eine ähnliche Entwicklung wie bei dem Zweitmarkt für komplette WEA. Hierbei ist jedoch zusätzlich auch immer die verbleibende, im Feld befindliche, Flottenstärke eines WEA-Modells zu berücksichtigen. So sind einzelne Ersatzteiltypen nur in gewissen WEA-Modellen nutzbar. Entsprechend hängen die Potentiale des Zweitmarktes für Komponenten einerseits mit der Anzahl der rückgebauten WEA des jeweiligen Modells (Angebot) und der verbleibenden Flottengröße, für die die jeweiligen Komponenten noch eingesetzt werden könnten (Nachfrage), zusammen.

Zusammenfassend erwarten wir für den gesamten Zweitmarkt eine deutliche Senkung des derzeitigen Weiterverkaufspotentials. Wenn sich keine unmittelbare Zweitnutzung anschließt, sollten Anlagenkomponenten einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden. Abfälle zur Verwertung sind gemäß § 1 Abs. 3 Nr. 5 maximal drei Jahre von der Deponieverordnung ausgeschlossen.

2.2.4 Aktuelle Praxis Ausweichreaktionen und unzulässige Praktiken

Sämtliche befragten Akteure wurden auch zu möglicherweise bekannten unzulässigen Ausweichreaktion / Praktiken befragt. Die entsprechenden Antworten lassen sich grundsätzlich differenzieren in den Bereich der Demontage, den Bereich der Entsorgung/Verwertung und den Bereich der Finanzierung.

2.2.4.1 Demontage

Als übergreifendes Problem bei der Demontage von WEA wurde von vielen Befragten ausgeführt, dass der Bereich des Rückbaus einer WEA, weitgehend nicht oder nur unzureichend reglementiert wird. So gebe es keine marktübergreifenden Standards wie der Rückbau einer WEA erfolgen soll, was die generelle Definition von unzulässigen Praktiken erschwert.

Die Möglichkeit von Behörden, Vorgaben zu machen und deren Einhaltung zu kontrollieren wird gemäß den Ergebnissen der Befragung sehr unterschiedlich wahrgenommen. So gibt es durchaus Behörden, die konkrete Vorgaben machen und diese auch vor Ort prüfen. Am Markt wird jedoch aktuell kein einheitliches Vorgehen diesbezüglich beobachtet, sodass Behörden häufig nur sehr unspezifisch bis gar nicht in den Rückbau einer WEA eingebunden sind.

Ähnlich stellt sich die Situation auf Grundlage der Ergebnisse der direkten Befragung der Behörden dar. Insgesamt ist festzustellen, dass die vorliegende Erfahrung auf Seiten der Behörden noch sehr begrenzt sind. Zudem handelte es sich bei den bisher zurückgebauten WEA überwiegend um Repowering-Projekte, was für die Sachbearbeiter der Immissionsschutzbehörden den Vorteil hatte, dass man im Zuge der neuen BImSchG-Genehmigung ohnehin in Kontakt zu dem Betreiber der rückzubauenden WEA stand und somit auch den Rückbau der alten WEA mitgestalten konnte. Für diese Vorhaben wurde zudem deutlich angemerkt, dass der Rückbau gegenüber der Errichtung der neuen WEA klar zweitrangig priorisiert wurde. Für Rückbauprojekte, die kein Repowering waren, wurden dagegen zum Teil auch deutliche Probleme beschrieben. So kommt es durchaus vor, dass die Rückbauanzeige unterbleibt und die Behörden den Rückbau einer WEA erst deutlich verzögert und zufällig mitbekommen. Solche Fälle werden jedoch eher der Unkenntnis der Betreiber zugeschrieben, führen jedoch zwangsläufig dazu, dass die Behörden den Rückbauprozess und schließlich auch den Verlust der Leistung überhaupt nicht überprüfen können. Ein relevantes Problem ist hierbei auch, dass viele alte WEA noch unter Baurecht genehmigt worden sind und zwischenzeitlich in die Zuständigkeit der Immissionsschutzbehörden gefallen sind. Solche sehr alten Genehmigungen enthalten vielfach deutlich weniger und unspezifische Nebenbestimmungen. Als ein Beispiel wurde diesbezüglich erläutert, dass es bei einzelnen WEA-Genehmigungen keine Pflicht zur Anzeige eines Betreiberwechsels gibt. Bei solchen WEA können die zuständigen Immissionsschutzbehörden den Betreiber einer WEA häufig nur durch längere Recherchen ausfindig machen, was zweifelsfrei als großer Mangel zu werten ist. Neuere Genehmigungen enthalten dagegen gemäß der Einschätzung der Befragten sehr viel detailliertere Bestimmungen, sodass man aus Problemen der letzten Jahre klar die richtigen Schlüsse gezogen habe, problematisch ist jedoch, dass aufgrund der langen Betriebsphasen von WEA positive Effekte, insbesondere was den Rückbau betrifft, erst deutlich zeitverzögert auftreten.

Sehr interessant ist zudem auch die Auffassung der Behörden bzgl. Zuständigkeit im Bereich des Rückbaus. So wurde von einem Befragten zwar grundsätzlich erläutert, dass die Immissionsschutzbehörden auch für die Überwachung des Rückbaus zuständig sind, diese Zuständigkeit sei jedoch nur für den Bereich zum Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen gegeben. Dies stehe im klaren Gegensatz zur Genehmigung einer WEA, die eine Konzentrationswirkung (auch für andere Rechtsbereiche) aufweist. Praktisch führe dies dazu, dass die Immissionsschutzbehörde den Rückbau einer WEA nur dahingehend bewerten darf, ob von den dargestellten Methoden schädliche Umwelteinflüsse ausgehen oder nicht. Andere Rechtsbereiche wie bspw. der Arbeitsschutz, baugesetzliche Regelungen oder Ähnliches werden dagegen von den Immissionsschutzbehörden nicht betrachtet, weswegen der Betreiber einer WEA eigentlich Rückbauanzeigen an diverse Fachbehörden stellen müsse. Von anderen Behördenvertretern wurde dahingehend jedoch entgegenstehend angegeben, dass eine interne Weiterleitung, auch an andere Fachbehörden erfolge, insofern dies als nötig erachtet wird.

Übergreifend wurde jedoch von allen Behördenvertretern angegeben, dass die Einflussnahme auf Rückbauvorhaben derzeit noch sehr gering sei. So werden in der Regel keine direkten Vorgaben gemacht und Abrissgenehmigungen oder ähnliches nicht ausgestellt. Dies im Übrigen auch, da man die schädlichen Umweltauswirkungen, die von Rückbauarbeiten an ausgedienten Altanlagen ausgehen können, als insgesamt als gering einstuft, insbesondere auch bei Bezug auf andere Anlagen, die unter das BImSchG fallen, welches dem Betreiber klare Pflichten zuweist.

Nachfolgend werden zwei Beispiele für einzelne Rückbau-Aspekte dargestellt, die aus unserer Sicht von den Behörden zusätzlich fokussiert werden sollten und deutlich für die Schaffung von Standards sprechen.

Als ein erstes Beispiel hierfür kann bspw. das Zerlegen von Rotorblättern auf der Baustelle herangezogen werden. Gemäß den Ergebnissen unserer Recherchen ist dieser Prozess nicht übergreifend reglementiert und wird lokal sehr unterschiedlich gehandhabt. Dies führt grundsätzlich zu einer Ungleichbehandlung verschiedener Betreiber. Es sollte zudem untersucht werden, ob von den beim Sägen entstehenden Stäuben Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen.

Als ein zweites Beispiel zur Verdeutlichung der Schaffung von klaren Standards wird auf eine alternative Rückbaumethode, ohne Kraneinsatz verwiesen. So wird in Deutschland teilweise auch das Umziehen von WEA praktiziert. Hierbei wird die WEA mittels eines Seils und eines Kraftfahrzeugs umgezogen, während häufig ein zusätzlicher Bagger an der Rückseite das Fundament anhebt, um das Umkippen der WEA zu unterstützen. Das Verfahren ist grundsätzlich auf eher kleinere WEA limitiert, wird jedoch gemäß den Ergebnissen der Befragungen gegenwärtig noch angewandt, obgleich von einigen Akteuren erhebliche Bedenken diesbezüglich geäußert wurden. Gegenüber dem Rückbau mit einem Kran, führt das Verfahren zu deutlich geringeren Kosten, führt jedoch häufig zu einer Verteilung von GFK-Splittern und Stäuben in der unmittelbaren Umgebung, sowie ggf. auch zu einer Kontamination der Böden durch die in den Anlagen verbliebenden Restmengen an Betriebsflüssigkeiten. Die Tätigkeiten sind arbeitsschutztechnisches ein Sicherheitsrisiko und stürzende Anlagen tragen zur Bodenverdichtung bei. Mögliche Verbesserungen dieser Verfahrensweise, wie bspw. das Umziehen der WEA bei einer Rotorstellung entgegen der Fallrichtung oder der Überzug der Rotorblätter mit Vlies, führen gemäß den Ergebnissen unserer Befragung noch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Von einigen Fachfirmen aus dem Bereich des Rückbaus wurde zudem auch ausgeführt, dass derzeit ein hoher Preisdruck insbesondere durch Unternehmen aus Osteuropa aufgebaut werde. Teilweise würden hier gängige deutsche Regelungen (z.B. Arbeitssicherheit) nicht eingehalten. Durch das vielfältige Ausbleiben von Kontrollen, verschärfe dies die Wettbewerbssituation zunehmend.

Gemäß der Bewertung eines einzelnen Akteurs führt das Fehlen von Standards zudem vereinzelt auch zu einer Verunsicherung verschiedener Betreiber. So seien einzelne Betreiber derart um ihren Ruf besorgt, dass Sie an Rückbaufirmen derart überzogene Anforderungen stellen würden, die unter Umständen nicht umsetzbar seien.

Da während der Befragungen auch Indikationen für ein mögliches Aufkommen von schädlichen Stoffen innerhalb von Beschichtungen/Lacken der Türme aufgekommen sind, sollte dieser Problematik gesondert nachgegangen werden.

Als ein grundsätzliches Problem während des Rückbaus, ist zudem die im Baugewerbe gängige Praxis des Einsatzes und der zum Teil mehrfachen Weitergabe von Arbeiten an Subunternehmer zu nennen. So begründet sich hieraus zwar grundsätzlich kein pauschaler Mangel und teilweise werden auch qualitativ sehr hochwertig arbeitende Firmen unterbeauftragt, oft führt ein solches Geschäftsverhalten, jedoch auch zu qualitativen Problemen bis hin zu arbeitsschutzrechtlich bedenklichen Verhalten, bei einer gleichzeitigen Schaffung von nur schwer zu durchschauenden Verantwortlichkeiten.

2.2.4.2 Entsorgung / Verwertung

Für den Bereich der Entsorgung/Verwertung werden die in Deutschland branchenübergreifenden Standards als grundsätzlich sinnvoll und funktional aufgefasst. So werden Entsorgungsnachweise und teilweise auch Wiegescheine ausgestellt und somit eine gute Dokumentation der Entsorgung/Verwertung geschaffen. Gemäß der Bewertung der meisten befragten Akteure sei dies ein etablierter und gut funktionierender Prozess, vereinzelt gaben Akteure jedoch auch an, dass Entsorgungsnachweise nicht durchgehend eingefordert werden. So wurde auch beschrieben, dass bspw. das Vergraben von ganzen Rotorblättern in Einzelfällen praktiziert worden sei. Ähnlich zeichnet sich diesbezüglich auch die Einschätzung mit Blick auf die befragten Behördenvertreter. So wurden verschiedene Angaben bzgl. der einzufordernden Dokumente zu Entsorgung gemacht. Während einzelne Behörden die Entsorgung vollständig nachgewiesen haben wollen, reicht es Anderen die Entsorgungsfirmen namentlich zu kennen und wieder andere fordern bezgl. der Entsorgung überhaupt keine Dokumentation ein.

Weitgehend negativ werden außerdem auch die aktuellen Entsorgungswege für GFK und CFK-Abfälle eingeschätzt. So haben viele Akteure noch grundsätzliche Bedenken bzgl. der zu erwartenden Stoffmengen und der aktuell verfügbaren Entsorgungswege (GFK als Ersatzbrennstoff zur Zementindustrie, Faserrückgewinnung durch Pyrolyse für CFK) und sehen hier weiteren Forschungsbedarf. Zudem werden die Hersteller von Rotorblättern von vielen Akteuren in der Pflicht gesehen, das Design und die Materialenauswahl deutlich in Richtung einer besseren Recyclingfähigkeit zu optimieren und ggf. auch R-Fasern in neuen Rotorblättern einzusetzen. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch über eine Rücknahmepflicht von Rotorblättern nachzudenken.

Mit Bezug auf die Rotorblätter (und teilweise auch auf andere Komponenten) sollten zudem die technischen Spezifikationen bzw. deren Informationsgehalt dahingehend verbessert werden, dass die stoffliche Zusammensetzung und die stofflichen Mengen eindeutig bestimmbar sind und während des Rückbaus klar ist, an welchen Stellen bspw. GFK und wo CFK verbaut ist.

Einige Akteure schätzen zudem (branchenübergreifend) die Verwertungswege für Betonabfälle (derzeit primär als Füllmaterial) nicht optimal ein und plädieren hier insbesondere für eine verstärkte Nutzung von R-Beton. Dies auch vor dem Hintergrund einer zukünftigen Verknappung von Bausanden.

2.2.4.3 Finanzierung

Aufgrund der Gespräche mit finanzierenden Banken, lassen sich derzeit aus dem Bereich der Rückbaubürgschaften kaum Probleme ableiten. So gaben die befragten Banken an, dass bisher noch in keinem Fall der finanzielle Ausfall des Betreibers eingetreten sei und die Rückbaubürgschaften tatsächlich abgerufen wurden. Anderweitige möglicherweise unzulässige Praktiken sind den Banken zudem nicht bekannt.

Unter Berücksichtigung einer Verlängerung der Finanzierungslaufzeiten, als Folge der Anpassungen am EEG, rückt die Thematik des Rückbaus von WEA jedoch zunehmend in den auch in den Fokus von Banken.

Ähnlich kann auch die Situation bzgl. der Grundstückseigentümer eingeschätzt werden. So konnten keine Verpächter identifiziert werden, die tatsächlich negative Erfahrungen mit dem Rückbau von WEA gemacht haben.

2.3 Umweltfachliche Bewertung der Praxis und Aufzeigen von Problemen

Im Falle des Rückbaus von WEA sind Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft nicht zu umgehen, wenn auch auf einen engen Zeitraum befristet.

Eine der Zulassungsvoraussetzungen für den Bau von WEA ist die Abgabe einer Verpflichtungserklärung, das Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und Bodenversiegelungen zu beseitigen.

Trotz der gesetzlich festgelegten und in den jeweiligen Gutachten zum Bau der WEA erwähnten Verpflichtung zum Rückbau außer Betrieb genommener WEA fehlen derzeit konkrete Leitfäden zur praktischen Umsetzung von Rückbauvorhaben.

Anders als bei der Errichtung und der sich daran anschließenden Betriebsphase einer WEA und somit längerfristig vorhandenen negativen Auswirkungen auf Natur und Landschaft, ist der Rückbau von WEA als temporäre Maßnahme zu betrachten, die mit dem Ziel der Verbesserung des Zustandes von Natur und Landschaft an dem entsprechenden Standort erfolgt. Je nach Vorgehensweise beim Rückbau findet dieser innerhalb eines Zeitraums von Tagen statt. Die Maßnahme erstreckt sich ausschließlich auf diesen begrenzten Zeitraum des Rückbaus und findet in einem bereits zur Bebauung freigegebenen Gebiet statt.

Demnach ist durch den Rückbau bei Einhaltung gesetzlicher Vorgaben nicht mit signifikant negativen Auswirkungen auf Natur und Landschaft zu rechnen. Somit sind bei guter Rückbaupraxis die aus dem Rückbau resultierenden Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft als nicht erheblich einzustufen.

Des Weiteren bestehen die WEA aus verschiedenen Komponenten, die aktuell unterschiedliche Potentiale für das Recycling oder die Wiederwertung bieten (siehe Kapitel 2.2.2).

An dieser Stelle wird der Status quo des Rückbaus unter Umweltgesichtspunkten zu den folgenden relevanten Aspekten in zusammenfassender Form beschrieben:

- Wiederherstellung des ursprünglichen Flächenzustandes
- Bestimmung der Emissionen
- Bestimmung der Flurschäden und Bodenverdichtung
- Verbleib kritischer Abfallströme.

2.3.1 Wiederherstellung des ursprünglichen Flächenzustandes

Nach Außerbetriebnahme von WEA sind die genutzten Flächen wieder in den ursprünglichen Zustand zu überführen. In der Praxis sind zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden.

- In Einzelfällen besteht die Möglichkeit, den geforderten Rückbau des Fundamentes bis auf eine Tiefe von 1,50 m unter Geländeoberfläche zu beschränken. Dies wird beispielsweise in Bereichen landwirtschaftlicher Nutzflächen praktiziert, da deren Funktion durch verbleibendes Material im Untergrund nicht beeinträchtigt werden.
- In der Regel sind WEA jedoch vollständig zurückzubauen, das gesamte Fundament ist demnach zu entnehmen und abzutransportieren. Entstandene Gruben sind unter Beachtung der ursprünglichen Bodenfunktion wieder aufzufüllen, so dass die ursprüngliche Nutzung und Funktion wiederhergestellt wird.

Die Rückmeldung aus der Praxis ist jedoch, dass beide Varianten in der Praxis Anwendung finden, da unterschiedliche Interpretationen für „vollständig“ bestehen. In neuere Genehmigungen gibt es jedoch die Tendenz, dass die Fundamente ganz entfernt werden müssen (Pfähle aus Pfahlgründungen jedoch nicht miteingeschlossen, siehe Kapitel 2.2.1). Die Rückmeldung insbesondere der betroffenen Landwirte zeigt jedoch, dass nur ein vollständiger Rückbau des gesamten Fundaments (und nicht nur

bis auf eine Tiefe von 1,50 m unter der Geländeoberkante) die volle landwirtschaftliche Nutzung erlaubt.

Die Wiederherstellung der Kranstellflächen ist grundsätzlich unproblematisch, der verwendete Schotter wird mittels Bagger entnommen, Geotextilien oder Geogitter werden entfernt.

2.3.2 Bestimmung der Emissionen

Die durch den Rückbau zu erwartenden Emissionen beziehen sich auf Schall (Baulärm), Einträge in Boden und Grundwasser, Staubpartikel. Zur Minimierung von Gefährdungen durch Stoffeinträge im Baustellenbetrieb sind organisatorische und technische Maßnahmen (Sorgfalt bei der Handhabung von Gefahrstoffen, Überprüfung von Fahrzeugen und Maschinen auf Dichtigkeit hinsichtlich Schmier- und Treibstoffverlusten, Einsatz von technisch einwandfreien Fahrzeugen, Geräten und Maschinen etc.) festzulegen und deren Einhaltung während des Rückbaus zu überprüfen.

Bezüglich des Schallschutzes ist zu beachten, dass die Rückbaumaßnahmen dem aktuellen Stand der Technik entsprechend erfolgen. Ziel ist es, die bestmögliche Schallminderung sowie die Reduzierung von Erschütterungen zu erreichen. Da die Rückbaumaßnahmen im Außenbereich stattfinden, sind in der Regel keine wesentlichen Auswirkungen auf schutzwürdige Wohnbebauungen zu erwarten. Ungeachtet dessen ist als Minderungsmaßnahme der Einsatz von schallgedämpften Fahrzeugen und Maschinen anzustreben.

Durch die rückstandslose Entfernung sämtlicher Betriebsflüssigkeiten während der Vorbereitungsarbeiten für den Rückbau sowie das Vorhalten von Bindemitteln, sind Immissionen in Grundwasser und Boden nicht zu erwarten bzw. nur in minimalem Ausmaß.

Die beim Zerlegen von Rotorblättern entstehenden Staubemissionen sollten nach Möglichkeit durch geeignete Maßnahmen auf ein Minimum beschränkt werden. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, werden für das Zerlegen der Rotorblätter teilweise Spezialbagger mit Kreissägen-Aufsatz eingesetzt. Bei dieser Form der Zerlegung kommt es allerdings zu einem erheblichen Eintrag von freiwerdenden Stäuben in die Umgebung.

Eine Alternative stellt ein Verfahren mit Einhausung der Rotorblattsäge dar (Veolia 2017). Die Einhausung verhindert eine Ausbreitung der freiwerdenden Stäube in die Umgebung. Durch Wasserberieselung wird zudem die Staubentwicklung reduziert.

In der aktuellen Praxis werden die Emissionen als unkritisch betrachtet, jedoch herrschen Unsicherheiten aufgrund fehlender Leitlinien, der auch Maßnahmen zur Vermeidung von Emissionen beinhaltet.

2.3.3 Bestimmung der Flurschäden und Bodenverdichtungen

Nach Abschluss der Rückbaumaßnahmen ist sicherzustellen, dass der Standort die natürlichen Bodenfunktionen und ursprünglichen Nutzungsfunktionen wieder erfüllt. Um dies zu erreichen, sind Maßnahmen erforderlich, wie beispielsweise die Entsiegelung der genutzten Flächen, die Beseitigung nachhaltiger Verdichtungen in Ober- und Unterboden sowie die Schaffung einer geeigneten Folgenutzung.

Hinsichtlich des Bodenschutzes sind die durchzuführenden Maßnahmen so durchzuführen, dass sie einen möglichst geringen Einfluss auf den Boden ausüben und die ursprünglichen Bodenfunktionen vollständig wiederherstellen. Dazu zählen insbesondere das vollständige Entfernen von Fundamenten und die Wiederverfüllung der Baugruben mit geeignetem Bodenmaterial.

Im Zusammenhang mit der Baustellenlogistik bieten sich dabei folgende Maßnahmen an:

- bevorzugte Verwendung von Raupenfahrzeugen (statt Reifenfahrzeugen)

- bevorzugte Befahrung des Bodens bei entsprechend günstigen Witterungsverhältnissen (je trockener der Boden, desto geringer die Verdichtungsgefahr)
- Sicherstellung der ressourcenschonenden Lagerung sowie des vollständigen Abtransportes der anfallenden Materialien und Stoffe
- Anlage von Baustraßen aus Kies oder Baggermatratzen sowie Sicherstellung der Verfügbarkeit von Stellplätzen für Baufahrzeuge
- Verwendung von Fallbetten zur Reduzierung der in den Boden eingebrachten Energie beim Aufprall des durch Sprengung zerstörten Turmes.

In der aktuellen Praxis werden die Emissionen als unkritisch betrachtet, jedoch herrschen Unsicherheiten aufgrund fehlender Leitlinien, der auch Maßnahmen zur Vermeidung von Flurschäden und Bodenverdichtungen beinhaltet.

2.3.4 Recycling von Anlagenbestandteilen und kritische Abfallströme

Neben den oben beschriebenen Umweltthemen (Flächenzustand, Emissionen, Flurschäden) sind beim Rückbau vor allem auch die Auflagen im Hinblick auf eine ordnungsgemäße und vollständige Entsorgung der verschiedenen Anlagenteile im Sinne des KrWG zu berücksichtigen (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2).

Nach den Ergebnissen zum Status quo der Entsorgung zeigt sich, dass für ein Teil der Materialien angewandte Verfahren für eine umweltverträgliche Entsorgung bestehen. Folgende Materialgruppen gehören dazu:

- *Beton, Eisenmetalle (Stahl), Nichteisenmetalle.*
Nach Aufbereitung in mobilen oder stationären Anlagen werden Beton und Eisenmetalle als Sekundärrohstoffe weiter verwertet. Nichteisenmetalle (in erster Linie Kupfer und Aluminium) können - sortenrein erfasst – metallurgisch verwertet werden.
- *Batterien, Akkumulatoren.*
Grundsätzlich haben die Altbatterien ein hohes Wertstoffpotenzial. Wegen der Materialien, die in den unterschiedlichen Batterien enthalten sind, werden diese getrennt gesammelt. Die Verwertung von Batterien und Akkus konzentriert sich auf die Rückgewinnung dieser Stoffe. Nicht verwertbare Bestandteile werden ordnungsgemäß beseitigt.
- *Schotter.*
Schotter kann als sekundäre Rohstoffquelle im Rahmen von Baumaßnahmen grundsätzlich wiederverwendet werden.
- *Öle, Hydraulik- und Kühlflüssigkeiten.*
Eine ordnungsgemäße Entsorgung dieser Betriebsmittel ist bereits aus dem normalen Wartungsbetrieb aufgestellt.

Nach der gängigen Rückbaupraxis können die folgenden „kritischen“ Abfälle – im Gegensatz zu oben genannten Abfallströmen - nur teilweise dem stofflichen Verwertungsprozess zugeführt werden.

- *Glasfaserverstärkter (GFK) und Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK).*
Derzeit stehen die stoffliche oder energetische Verwertung oder thermische Beseitigung der Verbundstoffe in der Diskussion. Gegenwärtig fehlt ein qualitätsgesichertes, wirtschaftlich

gesichertes und hochwertiges Verwertungsverfahren von Verbundmaterialien in Form der Rotorblätter.

➤ *Seltene Erden (Neodym, Dysprosium, Terbium bzw. auch Praseodym).*

Für die Seltenerdmetalle, die in einer WEA bei getriebelosen Synchrongeneratoren in den Permanentmagneten enthalten sind, existieren keine etablierten Recycling-Verfahren. Angesichts des erwarteten Rohstoffbedarfes an den o. g. werthaltigen Materialien (vorkommend in geringen Mengen) sind an WEA angepasste Recyclingverfahren für Permanentmagnete anzustreben, die eine sortenreine und hochwertige stoffliche Verwertung erlauben.

Schwefelhexafluorid (SF₆).

SF₆ ist ein Gas, das als Isoliermedium mit hohem Treibhauspotential in elektrischen Betriebsmitteln der Energieübertragung verwendet wird. Die Entsorgung dieses Gases unterliegt der gesonderten Verordnung (EU) Nr. 517/2014. Daher sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um SF₆-Emissionen bei der Rückgewinnung, beim Recycling und bei der Beseitigung des SF₆ im Rahmen des WEA-Rückbaus zu minimieren.

2.4 Zwischenfazit zum Status quo des Rückbaus und der Entsorgung von WEA

Rechtliche Vorgaben für Rückbau und Entsorgung von WEA

Für den Rückbau von WEA bestehen abhängig von der Größe der Anlage zwei verschiedene Genehmigungsregimes, für Anlagen bis 50 m Höhe das allgemeine Baurecht und für größere Anlagen das Immissionsschutzrecht (siehe Kapitel 2.1.1). Für den immissionsschutzrechtlichen Bereich sind für den Rückbau relevante Umweltpflichten für den Betreiber definiert („Nachsorgepflichten“) und behördliche Überwachungsinstrumente stehen bereit; demgegenüber ist die Überwachungsichte bei lediglich dem Baurecht unterliegenden WEA eingeschränkt. Mit Blick auf Rückbauverpflichtung ist zu unterscheiden zwischen Anlagen, die im Außenbereich ohne Geltung eines qualifizierten Bebauungsplans liegen; für diese Anlagen gilt seit 2004 die Regelung des § 35 Abs. 5 BauGB, wonach in der Regel („soll“-Vorschrift) Verpflichtungserklärungen zu Rückbau der WEA und zur Beseitigung von Bodenversiegelungen abzugeben und hierzu Sicherheitsleistungen seitens der Behörde einzufordern sind. Für andere WEA, insbesondere solche im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans, gilt § 35 Abs. 5 BauGB nicht; entsprechende Festlegungen können aber im Bebauungsplan niedergelegt sein (siehe Kapitel 2.1.2).

Pflichten zur Entsorgung von Abfällen aus WEA treffen im Bereich immissionsschutzrechtlich genehmigter WEA den Betreiber, der auch für die Einhaltung der abfallrechtlichen Vorgaben (wie namentlich der Vorgaben der GewAbfV zu Bau- und Abbruchabfällen) verantwortlich ist. Demgegenüber gelten mangels spezieller integrierter Vorgaben bei baurechtlich genehmigten Anlagen Pflichten zur Entsorgung der beim Rückbau entstehenden Abfälle für den jeweiligen Erzeuger/Besitzer der entsprechenden Abfälle, d.h. in der Regel den Bauherrn des Rückbauvorhabens bzw. den Grundstückseigentümer (siehe Kapitel 2.1.3).

Inwieweit diese Vorgaben von den zuständigen Behörden angewandt und überwacht werden und inwieweit hier Überwachungsinstrumente wie bauaufsichtsrechtliche oder abfallrechtliche Anordnungen zur Anwendung gelangen, wird in den Ländern verschieden gehandhabt. Die Ergebnisse der Befragung einiger ausgewählter Behörden zur Praxis bestätigt dies. Einzelne Beispiele zur Handhabung sind in Kapitel 2.2.4.1 dargestellt.

Eine Analyse der aktuellen Interventionsmöglichkeiten für Behörden und ggfs. darauf aufbauende Zuweisung von Produkt- bzw. Betreiberverantwortung über bestehende rechtliche Regelungen hinaus, ist in Kapitel 7 weitergehend betrachtet.

Aktuelle Praxis des Rückbaus und der Entsorgung resultierender Stoffströme

Die aktuelle Praxis des Rückbaus von WEA untergliedert sich in vier Phasen:

1. Vorbereitungsarbeiten
2. Demontage der WEA
3. Demontage des Fundaments
4. Rückbau der Kranstellflächen (und ggf. Kabel)

Für den Rückbau werden in aller Regel Fachfirmen, Abbruchfirmen oder Firmen aus dem Bereich der Wartung & Instandsetzung von WEA beauftragt. Die nachfolgende Verwertung der rückgebauten WEA kann auf verschiedene Weisen erfolgen. So kann die WEA vollumfänglich abgebaut und an einem neuen Standort neu errichtet werden, einzelne Komponenten der WEA können in baugleichen WEA verwendet werden bzw. als Ersatzteil zwischengelagert werden oder die rückgebauten Komponenten können zerlegt und dem Recycling bzw. der Entsorgung zugeführt werden. Im Falle einer Entsorgung der Komponenten bestehen die Hauptabfallströme aus inerten Materialien (z.B. Beton, Schotter), GFK/CFK sowie Eisen- und Nichteisenmetalle.

Aktuelle Praxis Rücklagen und Rückbaukosten

Bezüglich der aktuellen Rückbaukosten und der davon abhängigen Rücklagenbildung durch die Betreiber bestehen unterschiedliche Schätzungen. Die Bandbreite der geschätzten Rückbaukosten erstreckt sich von ca. 30.000 € bis ca. 60.000 € pro MW Nennleistung. Insbesondere bei Berücksichtigung der Gespräche mit den Fachfirmen, sowie auch unter Berücksichtigung der vorstehenden Ergebnisse bzgl. der Verfahrensweise beim Rückbau und den stofflichen Zusammensetzungen einer WEA, wird jedoch schnell deutlich, dass bereits für eine ungefähre Schätzung der Rückbaukosten weitaus detailliertere Informationen zu den WEA bzw. dem Windpark benötigt werden als bspw. nur die Nennleistung. Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass die Abschätzung von tatsächlichen Rückbaukosten (speziell für noch junge Projekte) auch bei größtmöglicher Sorgfalt, mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

Bezüglich der Potenziale der Weiternutzung von ganzen WEA oder Komponenten dieser erwarten wir aufgrund unserer Erfahrung für den gesamten Zweitmarkt eine deutliche Senkung des derzeitigen Weiterverkaufspotentials.

Aktuelle Praxis Ausweichreaktionen und unzulässige Praktiken

Als übergreifendes Problem bei der Demontage von WEA wurde von vielen Befragten ausgeführt, dass der Bereich des Rückbaus einer WEA weitgehend nicht oder nur unzureichend reglementiert wird. So gebe es keine Standards, wie der Rückbau einer WEA erfolgen soll, was die generelle Definition von unzulässigen Praktiken erschwert.

Für den Bereich der Entsorgung/Verwertung werden die in Deutschland bestehenden Standards als grundsätzlich sinnvoll und funktional aufgefasst. Kritisch wird hier eher der Export ganzer Anlagen und Komponenten ins Ausland gesehen, wo in einigen Fällen keine sachgemäße Entsorgung sichergestellt werden kann. Weitgehend negativ werden außerdem auch die aktuellen Entsorgungswege für GFK und CFK-Abfälle eingeschätzt. So haben viele Akteure noch grundsätzliche Bedenken bzgl. der zu erwartenden Stoffmengen und der aktuell verfügbaren Entsorgungswege. Zudem werden die Hersteller von Rotorblättern von vielen Akteuren in der Pflicht gesehen, das Design und die Materialenauswahl deutlich in Richtung einer besseren Recyclingfähigkeit zu optimieren.

Technische Spezifikationen, die die stoffliche Zusammensetzung und Mengen in der WEA verbauten Komponenten eindeutig bestimmbar machen und Hinweise geben, an welchen Stellen kritische Materialien verbaut sind, werden prinzipiell als hilfreich angesehen, um unzulässige Praktiken zu vermeiden.

Aufgrund der Gespräche mit finanzierenden Banken, lassen sich derzeit aus dem Bereich der Rückbaubürgschaften kaum Probleme ableiten. So gaben die befragten Banken an, dass bisher noch in keinem Fall der finanzielle Ausfall des Betreibers eingetreten sei und die Rückbaubürgschaften tatsächlich abgerufen wurden.

Umweltfachliche Bewertung der Praxis und Aufzeigen von Problemen

Hinsichtlich der in 2.3 beschriebenen Auswirkungen des Rückbaus von WEA auf die Umwelt, sind die Aspekte „Bestimmung der Emissionen“ und Flurschäden und Bodenverdichtung“ übergreifend als unkritisch zu betrachten.

Der Aspekt „Wiederherstellung des ursprünglichen Flächenzustandes“ ist als teilweise kritisch zu bewerten, da ein vollständiger Rückbau der gesamten Fundamente aus Umweltgesichtspunkten vorteilhaft ist, dies jedoch nicht immer erfolgt.

Weiterhin ist der Verbleib bestimmter Abfallströme als kritisch zu bewerten. Auch wenn nach den Ergebnissen des „Status quo zur Entsorgung“ Rücknahmesysteme und Recyclingverfahren für einen größeren Teil der Materialien existieren, ist in der Gesamtheit die Verantwortung der Beteiligten in der Wertschöpfungskette für die hochwertige Verwertung einzelner Stoffe beim WEA-Rückbau nicht vollständig geklärt und umgesetzt. Es verbleiben kritische Abfallstoffe, deren Entsorgung ein Problem im Hinblick auf die Einhaltung der Regelungen gemäß KrWG darstellt, insbesondere des § 6 KrWG zur Abfallhierarchie.

3 Abfall- und Kostenprognose für den Zeitraum bis 2040

Zur Erstellung einer Abfall- und Kostenprognose für die in Deutschland rückzubauenden WEA bis 2040 wird zunächst eine geeignete Datengrundlage benötigt. Hierzu wird für die bisher in Betrieb genommenen WEA auf eine interne Datenbank zurückgegriffen. Diese Datenbank wird seit mehr als 20 Jahren von Ramboll Mitarbeitenden gepflegt und im Zuge der allgemeinen Geschäftstätigkeit kontinuierlich erweitert und validiert. Eine ausführliche Beschreibung der Datenbank, sowie Auswertungen zum bestehenden deutschen Windenergieanlagenbestandes (onshore) bzw. dessen Rückbau befindet sich in Anlage C dieses Berichts.

Nachfolgend wurden die WEA aus der Datenbank, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, zu geeigneten Gruppen zusammengefasst. Hintergrund dieser „Clusterung“ ist, dass der deutsche Windenergieanlagenbestand bzgl. der eingesetzten Anlagen überaus heterogen ist. So lassen sich zwar grundsätzlich besonders erfolgreiche WEA-Modelle identifizieren, insgesamt bestehen die in Deutschland betriebenen WEA jedoch auch aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Modellen, die teilweise auf grundlegend anderen Konzepten beruhen. Erschwerend kommt hinzu, dass einzelne WEA in der Regel auf unterschiedlichen Türmen und somit mit unterschiedlichen Nabenhöhen verfügbar sind, was zwangsläufig einen Einfluss auf die tatsächlich vorhandenen Materialmengen hat. Zusammenfassend lässt sich der deutsche Windenergieanlagenbestand, somit nicht exakt erfassen. Wohl aber kann durch eine geeignete Gruppierung der ähnlichen WEA-Modelle und Turmkonzepte, ein Ansatz gefunden werden, mit welchem die zukünftigen Abfallströme ungefähr abgeschätzt werden können.

Da die genutzte Datenbank nur die bestehenden WEA berücksichtigt, die Abfallprognose jedoch bis 2040 erstellt wird, sind zudem zukünftige Ausbauszenarien zu erörtern. Hierzu werden in Kapitel 3.2 zwei unterschiedliche Szenarien postuliert und der zukünftige Ausbau der deutschen Onshore-Windenergie entsprechend abgeschätzt. Dies geschieht analog zu den vorstehenden Überlegungen erneut unter Berücksichtigung von Clustern, wobei diesbezüglich auch derzeit noch nicht verfügbare Technologien postuliert werden, die als eine Art „Next-Generation“ WEA-Modelle verstanden werden können.

Basierend auf der Datenbank der bestehenden WEA, den beiden zukünftigen Ausbauszenarien und der Clusterung, werden nachfolgend in Kapitel 3.3 Abfallprognosen bis ins 2040 zu den relevantesten Stoffgruppen hergeleitet. Hierzu werden je Cluster spezifische Materialmengen definiert, welche unter Berücksichtigung des voraussichtlichen Rückbauzeitpunktes, als Abfälle bilanziert werden. Hierbei gehen wir gemäß der Vorgabe des UBA von einer Betriebsphase von 20 Jahren aus.

Abschließend erfolgt in Kapitel 3.4 eine Abschätzung der resultierenden Rückbaukosten. Die so ermittelten Kosten werden zudem zwei Berechnungsansätzen, die zur Bestimmung einer angemessenen Bürgschaftshöhe Anwendung finden, gegenübergestellt, sodass mögliche Finanzierungslücken zumindest indikativ bewertet werden können.

3.1 Materialzusammensetzung der WEA und übliche Lebensdauern

Zur Erstellung einer Abfallprognose ist ein einem ersten Schritt zunächst eine adäquate Erfassung des deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestandes unerlässlich. Hierbei besteht die Herausforderung, dass es keine öffentlich verfügbaren Datenbanken oder anderweitigen Quellen, die den Bestand exakt beschreiben, gibt. So wurde zwar im Jahr 2014 ein Anlagenregister eingeführt, in dem WEA zu bestimmten Ereignissen (z. B. Genehmigung, Inbetriebnahme, Außerbetriebnahme) vom jeweiligen Betreiber zu melden sind, dieses Register beinhaltet jedoch nicht die älteren WEA, für die ein meldepflichtiges Ereignis eben noch nicht vorgelegen hat. Zudem gibt es, obgleich das Ausbleiben einer Meldung beim Anlagenregister auch Rechtsfolgen für den Betreiber nach sich ziehen kann, auch Indizien das nicht sämtliche Betreiber dieser Pflicht nachkommen. Obgleich die Einführung des

Anlagenregisters, welches von der Bundesnetzagentur verwaltet wird, somit ein erster richtiger Schritt zur Überwachung und Steuerung des Ausbaus der Windenergie bzw. der erneuerbaren Energien (EE) insgesamt (Anm.: Das Anlagenregister beinhaltet neben Windenergieanlagen auch andere EE-Technologien) ist, kann das Register zusammenfassend jedoch nicht für die Erstellung von Abfallprognosen zum WEA-Rückbau verwendet werden, da erhebliche Lücke vorliegen. Da auch der Gesetzgeber diese Lücken und die verknüpften Problemstellungen erkannt hat, befindet die Überführung der Daten aus dem Anlagenregister, welches diverse erneuerbare Technologien beinhaltet, in ein übergreifendes Marktregister, welches neben EE-Technologien auch andere energiewirtschaftlich relevante Anlagen enthält, in Planung. Für dieses Marktstammdatenregister sind zudem auch rückwirkende Meldepflichten für bestehende Anlagen vorgesehen, sodass erstmals eine öffentlich verfügbare und vollständige Datengrundlage vorliegen würde. Leider wurde der Realisierungspfad für dieses Marktstammdatenregister verschoben, sodass die für dieses Projekt benötigten Informationen nicht rechtzeitig vorliegen.

Die weitere Beschreibung der Datengrundlage, inklusive der Vorstellung der „WP-Deutschland“ Datenbank von Ramboll, der angewandten Datenaufbereitung sowie Auswertung, befinden sich in Anlage C.

3.1.1 Einteilung der in Deutschland errichteten WEA in Cluster

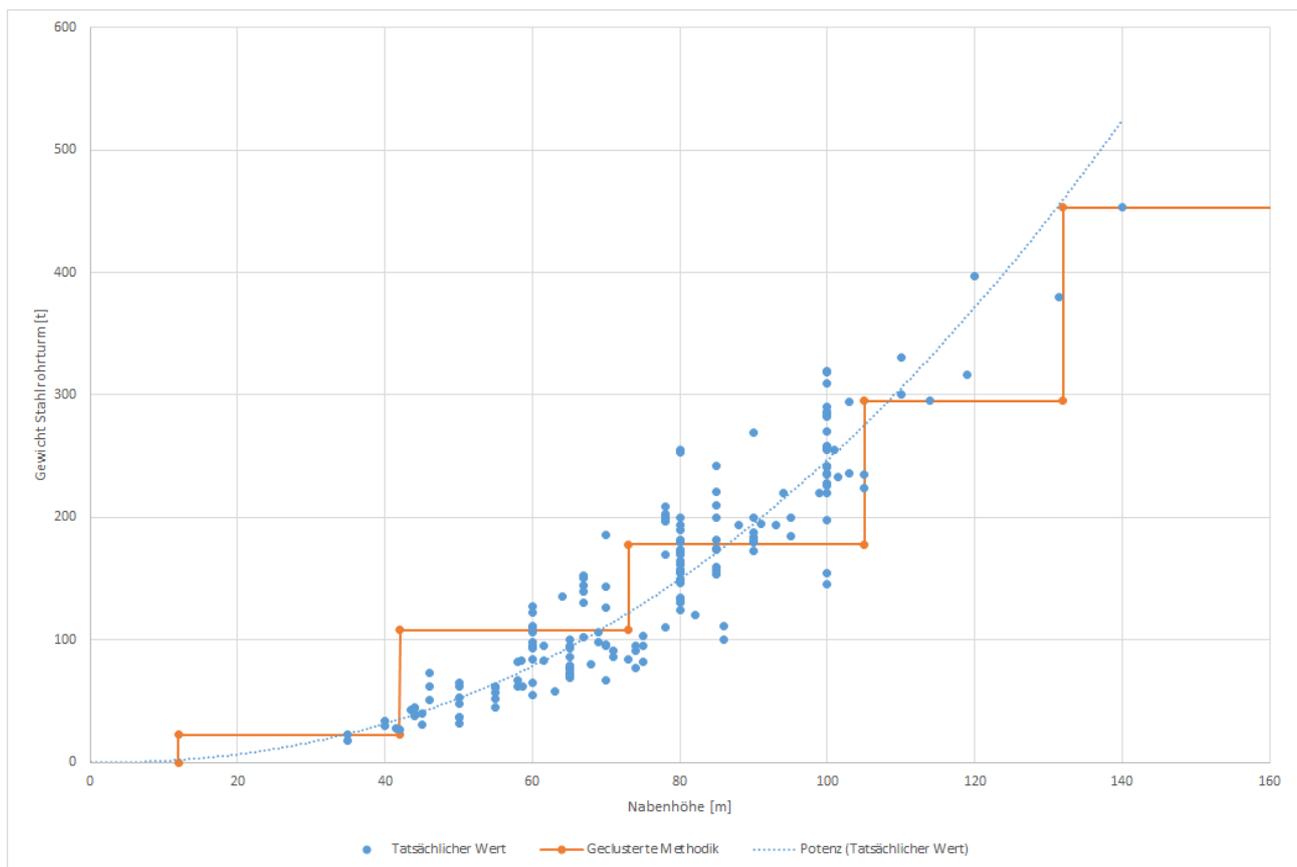
3.1.1.1 Methodisches Vorgehen

Wie in Anlage C beschrieben beinhaltet die „WP-Deutschland“ Datenbank an Vielzahl an WEA-Konfigurationen (d.h. an Kombinationen aus verschiedenen WEA-Modellen, Turmtypen und Nabenhöhen). Grundsätzlich unterscheiden sich all diese Konfigurationen bezgl. der verbauten Materialien und deren Zusammensetzung. Für eine exakte Ermittlung der anfallenden Abfallmengen beim Rückbau der WEA, müssten entsprechend spezifische Ansätze für jede dieser Konfigurationen angesetzt werden. Hierbei könnte zwar grundsätzlich der Aufwand geringfügig reduziert werden, indem für gleiche WEA auf verschiedenen Türmen (bzw. Nabenhöhen) nur unterschiedliche Ansätze bezgl. der verbauten Materialmengen in den Türmen und Fundamenten genutzt werden und die Ansätze für die Rotor- und Gondelmassen gleichbleiben, insgesamt ist ein solches Vorgehen jedoch mit überschaubarem zeitlichen Aufwand nicht durchführbar.

Ersatzweise werden für die Abfallprognose deshalb Cluster gebildet, die jeweils eine bestimmte Anzahl an verschieden, jedoch ähnlichen WEA-Modelle beinhalten. Für diese Cluster werden dann angemessene Ansätze bezüglich der Materialmengen angenommen, wobei hierbei auch die Verteilung der WEA-Modelle innerhalb des Clusters berücksichtigt wird. Letztendlich sollen die Materialmengen-Ansätze je Cluster somit sämtliche WEA innerhalb des Clusters bestmöglich beschreiben.

In Abbildung 8 wird die angewandte Methodik anhand einer Grafik veranschaulicht:

Abbildung 8: Grafische Veranschaulichung der genutzten Cluster-Methodik



Quelle: (Ramboll)

In vorstehender Abbildung ist zur Veranschaulichung der Methodik beispielhaft das Gewicht eines Stahlrohrturms über dessen Nabenhöhe aufgetragen. Hierbei werden die tatsächlich bekannten Daten als blaue Punkte dargestellt. Durch diese Datenpunkte wurde einerseits eine Regressionskurve gelegt (blau gepunktet) und andererseits die geclusterte Methodik anhand einer orangen Linie dargestellt. Augenscheinlich weichen sowohl die Cluster, als auch die Ausgleichskurve in verschiedenem Maße von den einzelnen Datenpunkten ab. Bei Betrachtung der Grafik entsteht zudem der Eindruck, dass eine Herangehensweise mittels Ausgleichskurve gegenüber der Cluster-Methodik, zu insgesamt geringeren Abweichungen führt. Diese Einschätzung ist korrekt, solange es sich bei den Datenpunkten um jeweils einen Datensatz (bspw. eine WEA im Bestand) handelt. Tatsächlich kann ein einzelner Datenpunkt jedoch für eine sehr unterschiedliche Anzahl an WEA innerhalb des Bestandes stehen, sodass bezogen auf den Gesamtfehler (bspw. für eine Abfallprognose) die exponentielle Regression, nicht unbedingt zu den besten Ergebnissen führt. Die einzelnen Datenpunkte müssen ergänzend auch entsprechend der quantitativen Bedeutung gewichtet werden, weswegen ein geclustertes Vorgehen beschränkt wurde, bei welchem die Festlegung eines Wertes je Cluster, die Gesamtanzahl der WEA innerhalb des Clusters und die Clusterverteilung Berücksichtigung fanden.

Ergänzend wird die gesamte WEA für die Clusterbildung gedanklich in zwei Teile geteilt, d.h. die Zuordnung einer spezifischen WEA aus der „WP-Deutschland“ Datenbank erfolgt in zwei verschiedene Cluster:

1. „WEA-Cluster“ (siehe Kapitel 3.1.1.2)

Das „WEA-Cluster“ ergibt sich dabei direkt aus einem bestimmten WEA-Modell (bzw. dem Hersteller, der Nennleistung und dem Rotordurchmesser), d.h. beinhaltet den „oberen“ Teil einer WEA (Gondel, Rotorblätter, etc.). Zudem werden elektrotechnische Bauteile wie etwa die MS-

Schaltanlagen oder die Transformatoren, die sich (je nach WEA auch im unteren Bereich des Turms befinden können ebenfalls den Clustern zugeordnet.

2. „Turm-Cluster“ (siehe Kapitel 3.1.1.3)

Das „Turm-Cluster“ ergibt sich aus dem Turmmodell und der spezifischen Nabenhöhe, d.h. beschreibt den „unteren“ Teil einer WEA. Zudem werden auch die Fundamente den Turm-Clustern zugeordnet.

Gegenüber der Zuweisung einer spezifischen WEA-Konfiguration (d.h. WEA-Modell und Nabenhöhe) in nur eine Clusterkategorie ergibt sich aus der Nutzung von zwei Clusterkategorien eine insgesamt deutlich reduzierte Anzahl an benötigten Clustern, was den tatsächlichen Aufwand erheblich reduziert.

3.1.1.2 Einführung der WEA-Cluster

Insgesamt wurden für die vorliegenden Datensätze der „WP-Deutschland“ Datenbank 14 Cluster gebildet (siehe Tabelle 7). Insgesamt sechs dieser Cluster beinhalten WEA mit einem Getriebe, sechs weitere Cluster beinhalten getriebelose WEA, ein Cluster beinhaltet leistungsschwache WEA mit einer Leistung bis max. 450 kW und ein Cluster beinhaltet Offshore-WEA, die (vermutlich) als Prototyp an Land errichtet worden sind, um erforderliche Tests durchzuführen. Da Offshore-WEA sich grundsätzlich maßgeblich von Onshore-Anlagen unterscheiden und insgesamt nur 19 WEA dem „Offshore-Cluster“ zuzuweisen sind, wird das Cluster nachfolgend nicht weiter betrachtet. Da bei den getriebelosen WEA zudem zwei unterschiedliche Konzepte existieren, erfolgte hier eine zusätzliche Unterteilung. So beinhalten die Cluster „DD_01“ und „DD_02“ getriebelose WEA mit einem permanentmagnetisch erregtem Synchrongenerator (das Konzept wird bspw. von Vensys Energy AG und Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A., genutzt) und die Cluster „DD_03“ bis „DD_06“ getriebelose WEA mit einem fremderregten Synchrongenerator (das Konzept wird z.B. durch die Enercon GmbH genutzt).

Neben der Unterteilung der Cluster nach dem Antriebsstrangkonzzept („Gear“ vs. „Direct Drive“) und der Art der Erregung (magnetisch vs. elektrisch) wurden die Cluster zudem anhand der anlagenspezifischen Eigenschaften Rotordurchmesser und Nennleistung weiter unterteilt. Hierbei wurde ein Schwerpunkt auf die Eingruppierung nach dem Rotordurchmesser gesetzt, da sich aus diesem die Nennleistung zumindest indirekt ergibt bzw. zumindest physikalisch die maximal umwandelbare kinetische Energie des Windes berechnen lässt. Weiterhin steht der Rotordurchmesser in direktem Zusammenhang mit dem Gewicht der Rotorblätter, sodass die Gruppierung anhand der Leistung nur von sekundärer Bedeutung erschien.

Die Abgrenzung, ab welchem Rotordurchmesser ein neues WEA-Cluster beginnt, erfolgte unter Berücksichtigung der möglichst exakten Zusammenführung von WEA-Plattformen innerhalb eines Clusters. Die Grenzwerte des Rotordurchmessers wurden so gewählt, dass WEA-Modelle der gleichen Turmkonzepte eines Herstellers mit vergleichbaren WEA-Modellen anderer Hersteller, in demselben Cluster eingeordnet werden. Insgesamt bilden die WEA-Cluster somit auch den Technologiewandel ab, wobei eine höhere Nummerierung (mit Ausnahme des Schrittes vom Cluster „DD_02“ zu „DD_03“, bei dem von den magnetisch erregten Generatoren zu den elektrisch erregten Generatoren übergegangen wird) ein Indikator für jüngere Anlagengenerationen ist.

Die Anzahl der insgesamt gebildeten Cluster, wurde unter dem Ziel der Findung möglichst guter Resultate bzgl. der nachfolgenden Analysen und einem angemessenen Aufwand festgelegt. Die Anzahl der Unterkategorien für die Cluster der WEA mit und ohne Getriebe (jeweils. magnetisch und elektrisch erregt) erfolgte zudem auf der Basis der Zusammensetzung des deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestandes. Mit Verweis auf die Verteilung der Antriebsstrangkonzepete aus Anlage C erfolgte die Bildung von insgesamt sechs Clustern für WEA mit Getriebe und von sechs Clustern für WEA ohne Getriebe, von welchen jeweils vier Cluster elektrische erregte Direct-Drive WEA und zwei

Cluster magnetisch erregte Direct-Drive WEA (die einen geringeren Marktanteil aufweisen) beinhalten.

In nachfolgender Tabelle 7 werden die WEA-Cluster näher spezifiziert:

Tabelle 7: Beschreibung der verwendeten WEA-Cluster

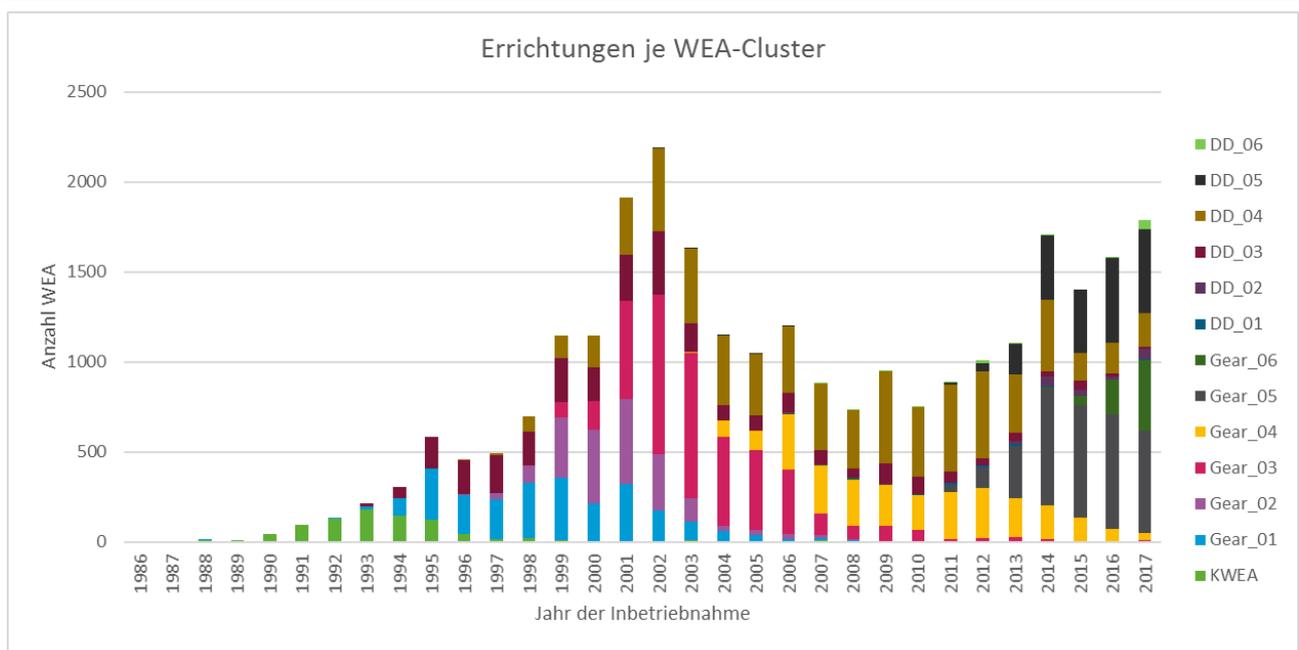
WEA-Cluster	Anzahl WEA	Gesamtleistung [MW]	Antriebsstrang- / Generatorkonzept	Rotordurchmesser [m]			Nennleistung [kW]		
				Min.	Mengengew. Mittelwert	Max.	Min.	Mengengew. Mittelwert	Max.
KWEA	887	167	diverse	3.8	25.2	37.0	5	188	450
Gear_01	2463	1613	WEA mit Getriebe	36.0	46.3	52.7	500	655	900
Gear_02	1918	2381	WEA mit Getriebe	54.0	60.9	66.0	850	1,242	1,750
Gear_03	4203	7112	WEA mit Getriebe	70.0	77.0	87.0	1,500	1,692	2,500
Gear_04	2655	5885	WEA mit Getriebe	88.0	92.9	104.0	2,000	2,216	3,400
Gear_05	2943	8558	WEA mit Getriebe	107.0	114.9	120.0	2,300	2,908	3,600
Gear_06	652	2164	WEA mit Getriebe	122.0	127.2	140.0	3,000	3,319	5,000
DD_01	61	110	WEA ohne Getriebe / magnetisch erregt	62.0	83.5	101.0	1,200	1,797	3,000
DD_02	186	528	WEA ohne Getriebe / magnetisch erregt	112.0	115.0	142.0	2,300	2,837	3,600
DD_03	2935	1879	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	40.3	45.3	58.6	500	640	1,000
DD_04	6498	13294	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	66.0	74.6	82.0	1,500	2,046	3,000
DD_05	1889	5476	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	92.0	104.3	115.0	2,350	2,899	6,000
DD_06	93	514	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	126.0	131.0	141.0	4,200	5,529	7,500

Quelle: (Ramboll)

Die spezifische Verteilung der Rotordurchmesser und der Nennleistungen innerhalb der einzelnen Cluster finden sich in Anlage D.

Die Anzahl der WEA je WEA-Cluster unter dem Gesichtspunkt des Jahres der Inbetriebnahme werden in nachfolgender Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Anzahl der WEA je WEA-Cluster und Jahr der Inbetriebnahme



Quelle: (Ramboll)

3.1.1.3 Einführung der Turm-Cluster

Neben den WEA-Clustern, die eine Gruppierung der WEA-Modelle insbesondere aufgrund der Merkmale Rotordurchmesser, Nennleistung und Triebstrangkonzzept abbilden, sind ergänzend auch die unterschiedlichen Türme bzw. Nabenhöhen zu berücksichtigen. Hierzu wurde insgesamt zehn „Turm-Cluster“ eingeführt (siehe Tabelle 8), welche einerseits das Turmmodell und andererseits ein Intervall von Nabenhöhen berücksichtigen. Hierbei wurden insgesamt fünf Cluster für Stahlrohtürme, drei Cluster für Hybridtürme (diese beinhalten auch die von der Enercon GmbH als Betonturm bezeichneten Türme) und zwei Cluster für Gittermasttürme gebildet. Die einzelnen Turmmodell-Cluster wurden zudem analog zu den WEA-Clustern unterteilt, wobei sich die Turm-Cluster an den Nabenhöhen orientieren.

In Tabelle 8 werden die Turm-Cluster näher spezifiziert:

Tabelle 8: Beschreibung der verwendeten Turm-Cluster

Turm-Cluster	Anzahl WEA	Gesamtleistung [MW]	Turmtyp	Nabenhöhe [m]		
				Min.	Mengengew. Mittelwert	Max.
Stahl_01	911	219	Stahlrohturm	0.0	34.5	42.0
Stahl_02	8204	9637	Stahlrohturm	42.0	62.8	71.0
Stahl_03	6901	11818	Stahlrohturm	73.0	88.1	103.0
Stahl_04	2083	4576	Stahlrohturm	105.0	110.8	129.0
Stahl_05	1107	3566	Stahlrohturm	132.0	140.2	166.0
Hybrid_01	3316	6953	Hybridturm	84.6	98.9	108.4
Hybrid_02	850	2167	Hybridturm	113.0	119.2	134.0
Hybrid_03	3907	10596	Hybridturm	135.0	140.4	164.0
Gitter_01	20	3	Gittermastturm	18.0	32.1	71.0

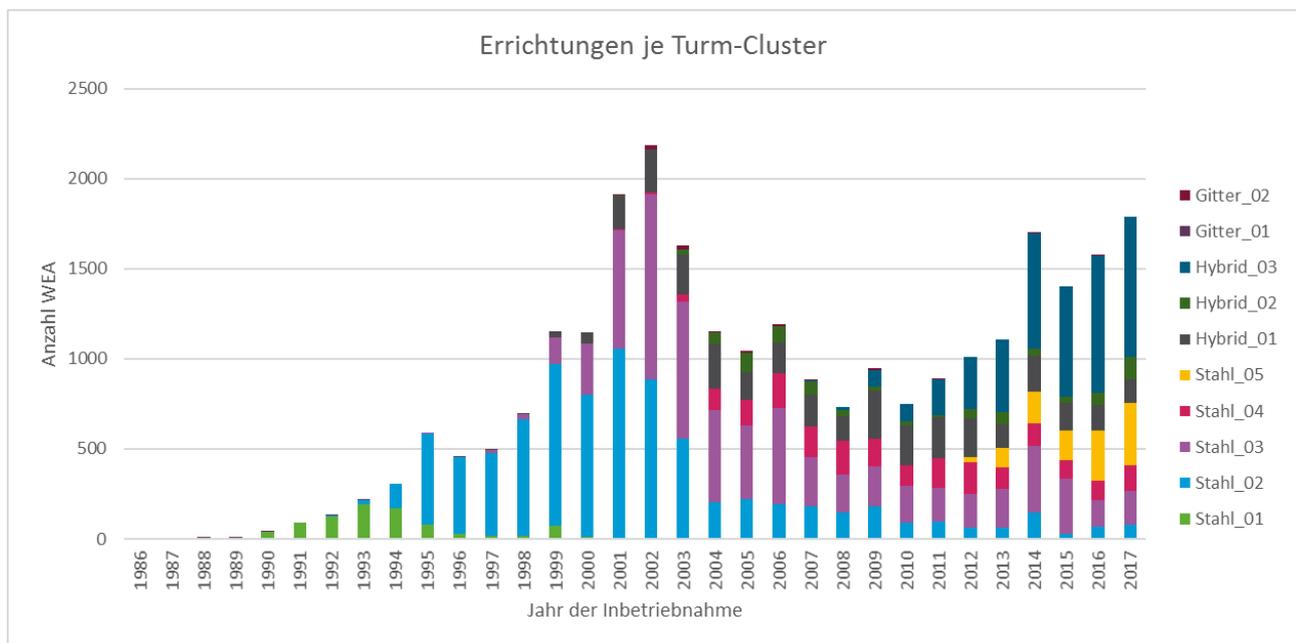
Turm-Cluster	Anzahl WEA	Gesamtleistung [MW]	Turmtyp	Nabenhöhe [m]		
				Min.	Mengengew. Mittelwert	Max.
Gitter_02	84	144	Gittermastturm	111.5	119.1	160.0

Quelle: (Ramboll)

Die spezifische Verteilung der resultierenden Nabenhöhen innerhalb der einzelnen Turm-Cluster befindet sich in Anhang E.

Die Anzahl der WEA je Turm-Cluster und je Inbetriebnahme-Jahr werden in nachfolgender Abbildung 10 dargestellt.

Abbildung 10: Anzahl der WEA je Turm-Cluster und Jahr der Inbetriebnahme



Quelle: (Ramboll)

3.1.1.4 Materialmengen je Cluster

Für die vorstehend eingeführten WEA- und Turm-Cluster sind Materialabschätzungen zu treffen. Hierbei ist der Anspruch an einen geeigneten Ansatz darin, die Gesamtheit aller WEA bzw. Türme innerhalb des Clusters möglichst gut zu beschreiben. Zwangsläufig vorkommende Abweichungen von einzelnen WEA-Modelle bzw. Türmen sollen hierbei möglich gegenseitig egalisiert werden.

Zur Findung zweckmäßiger Ansätze wurden deshalb in einem ersten Schritt zunächst die mengengewichteten Mittelwerte des Rotordurchmessers und der Nennleistung je WEA-Cluster bzw. der Nabenhöhen je Turm-Cluster berechnet. Nachfolgend wurden möglichst solche WEA-Modelle und Türme bzgl. ihrer Materialmengen ausgewertet, die bezüglich ihrer Spezifika in der Nähe zu diesen mengengewichteten Mittelwerten liegen. Ergänzend wurde zudem auch Augenmerk darauf gerichtet, besonders häufig vorkommende WEA-Modelle bzw. Türme innerhalb des jeweiligen Clusters in die Materialmengenabschätzung einzubeziehen. Hierzu wurden die jeweiligen Spezifikationen ebenfalls mit ausgewertet und die Materialmengenansätze des jeweiligen Clusters auch vor dem Hintergrund der Verhältnismäßigkeit für diese besonders häufig vorkommenden WEA-Modelle bzw. Türme validiert.

Für die Materialmengen in den Fundamenten wird eine von den Clustern teilweise losgelöste Methodik angewandt, die sich an den tatsächlichen Gesamthöhen der jeweiligen WEA orientiert und ebenfalls nachfolgend beschrieben wird.

Materialien je WEA-Cluster

Die Bestimmung der Materialmengen je WEA-Cluster erfolgte, wie zuvor beschrieben, unter Berücksichtigung der Spezifikationen von WEA, die bzgl. ihres Rotordurchmessers in unmittelbarer Umgebung der mengengewichteten Mittelwerte aller WEA des Clusters liegen.

Die Feststellung der materialeitigen Zusammensetzung der WEA-Cluster ist teilweise durch die Herstellergeheimnisse eingeschränkt. So werden Angaben zu Gesamtgewichten von Rotorblättern, dem Rotor (d. h. 3 x Rotorblatt zzgl. Nabe) und dem Maschinenhaus bei allen WEA-Herstellern spezifiziert, konkrete Angaben zur stofflichen Zusammensetzung fehlen hingegen oftmals. Somit sind die Ergebnisse der Prognosen, trotz der detaillierten und sorgfältig erarbeiteten Grundlagen für eine Näherung, durchaus mit einer Unsicherheit behaftet.

Als grundsätzlich zielführendes Vorgehen, wurden deshalb die Gesamtgewichte der Komponenten Rotorblatt, Nabe und Gondel für die verschiedenen WEA-Cluster (wie vorstehend beschrieben) ermittelt. Nachfolgend wurden diese Gesamtgewichte anteilig auf die relevantesten Stoffgruppen aufgeteilt. Hierzu wurden aus solchen Spezifikationen, die die konkreten stofflichen Anteile ausweisen, Mittelwerte ermittelt und auf die Gesamtgewichte der einzelnen Komponenten angewandt.

Sofern sich aus der technologischen Ausprägung des WEA-Clusters Besonderheiten ergeben, wurden diese hierbei entsprechend berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang wurden bspw. für die Cluster „DD_03“ bis „DD_06“ (d. h. die elektrisch erregten Direct-Drive WEA) erhöhte Kupfermengen berücksichtigt, welche sich in den Kupferwicklungen des Ringgenerators befinden (Anm.: In neueren Generatoren des Herstellers Enercon GmbH werden die Kupferwicklungen, teilweise durch Aluminiumwicklungen ersetzt – für die Abfallprognose bis 2040 erwarten wir diesbezüglich jedoch noch keine relevanten Änderungen). Aufgrund der magnetischen Erregung der Generatoren in den Clustern „DD_01“ und „DD_02“ wurden folglich geringere Kupferanteile berücksichtigt.

Als ein weiteres Beispiel in diesem Zusammenhang wurden für die Cluster „DD_03“ bis „DD_06“, welche überwiegend aus Enercon-Anlagen bestehen, auch berücksichtigt, dass bei Enercon-Anlagen die Gondelverkleidung aus Aluminium besteht, sodass die Aluminiummengen für diese Cluster entsprechend angehoben wurden.

Als grundsätzlich problematisch ist dagegen zu sehen, dass nur begrenzte Informationen zu den Anteilen von CFK innerhalb der Rotorblätter (insofern CFK überhaupt genutzt wird) von den WEA-Herstellern verfügbar sind.

Zumindest lässt sich in gewissem Umfang den Spezifikationen entnehmen, ob generell CFK verwendet wird oder nicht. Demnach wird CFK bei einigen WEA-Modelle aus den WEA-Clustern „Gear_04“ bis „Gear_06“ eingesetzt. Für die Cluster „DD_03“ bis „DD_06“, die überwiegend aus WEA des Herstellers Enercon GmbH bestehen, wurde gemäß den technischen Spezifikationen keine Indikationen auf die Verwendung von CFK gefunden, allerdings verwendet die Enercon GmbH CFK in den Rotorblättern der E-103 EP2, die derzeit jedoch noch nicht in Deutschland errichtet wurde und vermutlich auch eher für andere Märkte konzipiert wurde (der Prototyp wurden 2017 in Frankreich errichtet, die für 2017 geplante Serienfertigung blieb bislang noch aus). Für die Cluster „DD_01“ und „DD_02“ konnten ebenfalls keine Indikationen für die Verwendung von CFK gefunden werden.

Innerhalb der nachfolgenden Analysen wird CFK somit lediglich in den Clustern „Gear_04“ bis „Gear_06“ berücksichtigt. Aufgrund von fehlenden Spezifikationen der Hersteller zu den eingesetzten CFK-Mengen, wird ein Schätzwert von einem Entsorgungsfachbetrieb zu den CFK-Anteilen je

Rotorblatt aufgegriffen. Demnach kann für eine WEA (dessen Rotorblätter CFK enthalten) bei einem Rotordurchmesser von 120 m von einem CFK-haltigen Anteil von bis zu 20 %, bezogen auf das Gesamtgewicht des Rotorblattes, ausgegangen werden. Da insgesamt nicht in alle WEA-Modelle der Cluster „Gear_04“ bis „Gear_06“ CFK-haltige Rotorblätter eingesetzt werden, reduzieren sich die Anteile für das Cluster entsprechend. Zudem kann für Rotordurchmesser unter 120 m (d.h. für das Cluster „Gear_04“) ein geringerer CFK- Anteil und für Rotordurchmesser über 120 m (d.h. für das Cluster „Gear_06“) ein höherer CFK-Anteil vorausgesetzt werden. Insgesamt gehen wir von folgenden CFK-Anteilen (CFK-haltiges Rotorblattmaterial zum Gesamtgewicht je Rotorblatt) je Cluster aus:

- „Gear_04“ 10 %
- „Gear_05“ 15 %
- „Gear_06“ 20 %

Bezüglich dieses Ansatzes weisen wir mit Nachdruck darauf hin, dass die Ansätze tatsächlich mit großen Unsicherheiten behaftet sein können. Leider ist die Datengrundlage bzgl. des CFK-Einsatzes und der CFK-Anteile wie beschrieben schlecht. So musste bspw. auch für die Cluster „DD_01“ bis „DD_06“ davon ausgegangen werden, dass keine bzw. keine relevanten CFK Mengen eingesetzt wurden, was maßgeblich aus technischen Beschreibungen zu den Rotorblättern abgeleitet wurde. Für die nahe Zukunft ist ein transparenterer Umgang mit der Thematik in jedem Fall wünschenswert.

Aus den Gesamtgewichten der einzelnen Komponenten und den ermittelten stofflichen Anteilen wurden je Cluster folgende Materialmengenansätze abgeleitet:

- Verbundwerkstoffe (mit GFK, ohne CFK) aus den Rotorblättern und der Einhausung
- Verbundwerkstoffe (mit CFK) aus den Rotorblättern
- Stahl aus der Nabe und dem Maschinenhaus
- Kupfer aus dem Maschinenhaus
- Aluminium aus dem Maschinenhaus
- Elektroschrott aus dem Maschinenhaus und der untersten Turmebene (Anm.: Hier befindet sich je nach WEA-Modell häufig der Trafo und die MS-Schaltanlage, sowie ggf. weitere Steuerschränke.)

Insgesamt werden für die einzelnen WEA-Cluster folgende Materialmengen berücksichtigt (Anm.: Weitere Nachkommastellen werden innerhalb unseres Modells berücksichtigt, aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit jedoch innerhalb dieses Berichts nicht dargestellt):

Tabelle 9: Materialmengen der WEA-Cluster

WEA-Cluster	Antriebsstrang- / Generatorkonzept	Verbundwerkstoffe (ohne CFK)	Verbundwerkstoffe (mit CFK)	Stahl	Kupfer	Aluminium	Elektroschrott	Betriebsflüssigkeiten
		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[l]
KWEA	diverse	3.1	0.0	11.4	0.4	0.0	2.5	230
Gear_01	WEA mit Getriebe	8.1	0.0	26.2	0.9	0.1	4.0	340

WEA-Cluster	Antriebsstrang- / Generatorkonzept	Verbundwerkstoffe (ohne CFK)	Verbundwerkstoffe (mit CFK)	Stahl	Kupfer	Aluminium	Elektroschrott	Betriebsflüssigkeiten
		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[l]
Gear_02	WEA mit Getriebe	16.4	0.0	53.1	1.8	0.2	6.3	510
Gear_03	WEA mit Getriebe	21.1	0.0	70.6	2.3	0.2	7.5	590
Gear_04	WEA mit Getriebe	22.2	4.4	78.6	2.6	0.2	9.4	730
Gear_05	WEA mit Getriebe	34.7	9.2	117.6	3.8	0.3	10.9	840
Gear_06	WEA mit Getriebe	39.4	13.3	127.0	4.1	0.4	14.3	1080
DD_01	WEA ohne Getriebe / magnetisch erregt	20.6	0.0	66.2	1.1	0.2	7.5	375
DD_02	WEA ohne Getriebe / magnetisch erregt	41.0	0.0	102.1	1.6	0.3	13.1	750
DD_03	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	5.0	0.0	22.7	3.0	0.1	4.0	150
DD_04	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	21.3	0.0	86.9	11.5	0.3	10.5	575
DD_05	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	58.2	0.0	176.6	15.0	3.9	13.1	750
DD_06	WEA ohne Getriebe / elektrisch erregt	76.8	0.0	237.7	21.0	5.3	17.7	1050

Quelle: (Ramboll)

Materialien je Turm-Cluster

Analog zu den WEA-Clustern, wurden ebenfalls die Materialmengen je Turm-Cluster ermittelt. Die Findung von geeigneten Ansätzen zu den Materialmengen basiert hierbei maßgeblich auf dem Turmmodell und der Nabenhöhe.

Da die Türme des Herstellers Enercon GmbH, aufgrund von höheren Turmkopfmassen (d. h. Gondelgewicht zzgl. Rotorgewicht) teilweise deutlich höhere Gewichte aufweisen, als vergleichbare Türme anderer Hersteller, wurde zudem auch mit unterschiedlichen Gewichten (in Anlehnung an die Zusammensetzung des deutschen Windenergieanlagenbestandes) gearbeitet.

Für das Konzept des Gittermastturms konnten zudem leider nur sehr wenige technische Angaben zu den verwendeten Massen identifiziert werden. Für Gittermasttürme wurde deshalb einem Ansatz von der Homepage des BWE¹² gefolgt, wonach etwa 50 % des Materials von Stahlrohrtürmen notwendig sind.

Bezüglich des Bewehrungsstahls in Hybridtürmen bzw. den Betonabschnitten, ist zudem darauf hinzuweisen, dass konkrete Angaben insbesondere für die Türme mit geringeren Nabenhöhen nicht verfügbar sind. Ersatzweise wurden die Bewehrungsanteile (Stahlgewicht zu Betongewicht) aus den Hybridtürmen für größere Nabenhöhen genutzt, um die Bewehrungsmengen für die kleineren Hybridtürme abzuschätzen. Hierbei ist in den aufgeführten Bewehrungsmengen auch solcher Stahl enthalten, der bei der Verspannung der Turmabschnitte untereinander mit Stahlseilen, benötigt wird.

¹² <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/konstruktiver-aufbau/turm-und-mast>

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass je nach WEA-Modell bzw. Hersteller zum Teil große Abweichungen der verbauten Aluminium-Mengen vorliegen. Dies aller Voraussicht nach, da je nach Hersteller teilweise anstatt Aluminium auch Stahl für Turmeinbauten verwendet wird. Bei unserer Mengenabschätzung handelt es sich um einen aus unserer Sicht plausiblen Schätzwert.

Nachfolgende Ansätze bzgl. der genutzten Materialmengen wurden für die insgesamt 10 verschiedenen Turm-Cluster genutzt:

Tabelle 10: Materialmengen der Turm-Cluster

Turm-Cluster	Turmtyp	Stahl (Turmseg.)	Stahl (Bewehrung)	Stahl (Gesamt)	Beton	Aluminium
		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]
Stahl_01	Stahlrohrturm	22.8	0.0	22.8	0.0	0.2
Stahl_02	Stahlrohrturm	108.0	0.0	108.0	0.0	0.3
Stahl_03	Stahlrohrturm	178.0	0.0	178.0	0.0	0.3
Stahl_04	Stahlrohrturm	295.0	0.0	295.0	0.0	0.5
Stahl_05	Stahlrohrturm	453.0	0.0	453.0	0.0	0.9
Hybrid_01	Hybridturm	49.3	50.6	99.9	686.4	0.4
Hybrid_02	Hybridturm	69.0	68.9	137.9	933.4	0.5
Hybrid_03	Hybridturm	101.5	82.1	183.6	1112.8	0.9
Gitter_01	Gittermastturm	11.4	0.0	11.4	0.0	0.0
Gitter_02	Gittermastturm	165.0	0.0	165.0	0.0	0.0

Quelle: (Ramboll)

Materialien in den Fundamenten

Zur Erfassung der Materialmengen der Fundamente erfolgte eine Auswertung diverser Fundamentdatenblätter in Abhängigkeit spezifischer WEA-Kennzahlen, wie der Nennleistung, der Nabenhöhe oder dem Rotordurchmesser. Hierbei wurde die bestmögliche Korrelation der Fundamentgewichte über die Gesamthöhe GH (d.h. Nabenhöhe zzgl. ½ Rotordurchmesser) festgestellt.

Für Standardflachfundamente ohne Auftriebssicherung konnte folgende Näherung für das Fundamentgesamtgewicht in Abhängigkeit der Gesamthöhe GH der WEA abgeleitet werden:

$$\text{Fundamentgewicht [t]} = 121,45 \cdot e^{0,0164 \cdot \text{GH [m]}}$$

Im Mittelwert werde 3,6 % dieses Gewichts durch Stahl und die verbleibenden Anteile durch Beton bestimmt.

Für Standardflachfundamente mit Auftriebssicherung wurde eine mittlere Gewichtszunahme von 28 % gegenüber Standardflachfundamente ohne Auftriebssicherung festgestellt. Zudem liegt der ermittelte Stahl-Gewichtsanteil bei Standardflachfundamenten mit Auftriebssicherung im Mittel mit 4,5 % höher.

Für Pfahlgründungen (Tiefgründungen) wurde eine mittlere Gewichtszunahme von 18 % gegenüber Standardflachfundamente ohne Auftriebssicherung ermittelt. Der Gewichtsanteil von Stahl bei Pfahlgründungen liegt im Mittel bei 4,3 %.

Da die Festlegung des Fundamenttyps standortspezifisch erfolgt und von komplexen bodenmechanischen Kennwerten abhängt, wurde ergänzend die Abschätzung eines Experten, der im Bereich der Fundamentauslegung unter Anderem bereits für viele Hersteller tätig gewesen ist und bundesweit hohe Marktanteile beansprucht, zur Verteilung der Fundamenttypen für den deutschen Windparkbestand eingeholt. Diese Einschätzung wurde je für Nord-, Mittel- und Süddeutschland erfragt und auf Grundlage des Anlagenbestandes in den drei Regionen, zu einem Gesamtanteil der Fundamenttypen für ganz Deutschland zusammengefasst.

Für den deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestand wurden hieraus folgende Fundamenttypanteile berechnet:

- | | |
|--|------|
| 1. Standardflachfundamente ohne Auftriebssicherung | 58 % |
| 2. Standardflachfundamente mit Auftriebssicherung | 28 % |
| 3. Pfahlgründungen | 14 % |

Für die Berechnung der Beton und Stahlmengen wurden hieraus folgende Ansätze abgeleitet:

$$\text{Fundamentgewicht [t]} = 121,45 \cdot e^{0,0164 \cdot \text{GH [m]}} \cdot (58 \% \cdot 100 \% + 28 \% \cdot 128 \% + 14 \% \cdot 118 \%)$$

$$\text{Stahl [t]} = 121,45 \cdot e^{0,0164 \cdot \text{GH [m]}} \cdot (58 \% \cdot 3,6 \% \cdot 100 \% + 28 \% \cdot 4,5 \% \cdot 128 \% + 14 \% \cdot 4,3 \% \cdot 118 \%)$$

$$\text{Beton [t]} = 121,45 \cdot e^{0,0164 \cdot \text{GH [m]}} \cdot (58 \% \cdot 96,4 \% \cdot 100 \% + 28 \% \cdot 95,5 \% \cdot 128 \% + 14 \% \cdot 95,7 \% \cdot 118 \%)$$

Vorstehende Formeln werden in einem ersten Schritt (unabhängig von den WEA-Clustern und den Turm-Clustern) unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesamthöhen (GH) der spezifischen WEA auf den deutschen Windenergieanlagenbestand angewandt, um die resultierenden Abfallströme aus den Fundamenten abzuschätzen. In einem nachfolgenden Rechenschritt werden die resultierenden Stoffmengen unter Berücksichtigung des jeweiligen Turm-Clusters zu Mittelwerten aggregiert.

Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den Formeln um Näherungen handelt und WEA-Modelle spezifisch auch deutliche Abweichungen bzgl. der Fundamentgewichte festgestellt wurden.

3.1.2 Lebensdauer / Betriebsphase einer Onshore-WEA

Zur Abschätzung der resultierenden Abfallströme aus dem vorstehend detailliert beschriebenen deutschen Windenergieanlagenbestand (onshore) ist eine Annahme bezgl. der Lebensdauer bzw. der Betriebsdauer je WEA zu treffen. Diesbezüglich kann grundsätzlich zwischen einem technisch geprägten und einem wirtschaftlich geprägten Ansatz unterschieden werden. Die Grundüberlegungen zur Lebensdauer einer WEA, wie in Anlage B.2 getroffen, werden dafür für das Modell zur Marktentwicklung im folgenden Text präzisiert/erweitert.

Unter technischen Gesichtspunkten werden WEA in Anlehnung an die spezifischen Annahmen aus der jeweiligen Typenprüfung zunächst für einen fest definierten Zeitraum genehmigt. Für diesen Zeitraum ist (unter Wahrung der Nebenbestimmungen) die Standsicherheit der WEA gewährleistet. Für WEA liegt dieser Zeitraum typischerweise bei 20 Jahren. Durch eine gesonderte Beurteilung zum spezifischen Zustand einer WEA kann nach Ablauf dieser Frist jedoch auch eine Verlängerung der Betriebsphase erwirkt werden. Insbesondere für einige WEA der frühen Generation ergeben sich so, aufgrund von sehr konservativen Auslegungen, teilweise erheblich längere Betriebsphasen. Allerdings kann es standortspezifisch auch vorkommen, dass eine WEA aufgrund der hohen Belastungen am Standort, welche die den unterstellten Lasten aus der Typenprüfung sehr ähnlich sind, auch nicht weiterbetrieben werden kann. Somit ist die typische Lebensdauer einer WEA aus technischer Sicht auf 20 Jahre zzgl. x Monate ausgelegt. Der Vollständigkeit sei diesbezüglich angemerkt, dass neue WEA-Modelle zum Teil inzwischen schon für einen grundsätzlich längeren Zeitraum als 20 Jahre ausgelegt werden.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Lebensdauer einer WEA auf den Zeitraum begrenzt, währenddessen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Dies ist der Fall, wenn die Einnahmen aus dem Verkauf des produzierten Stroms die Investitions- und Betriebskosten übersteigen. Folglich ist die Vergütung je produzierter kWh ein maßgeblicher Einflussfaktor auf die wirtschaftliche Lebensdauer einer WEA. Im derzeitigen Marktumfeld, insbesondere bzgl. der an den Börsen erzielten Strompreise, ist ein wirtschaftlicher Betrieb gemäß (WindGuard 2016) von nicht geförderten Onshore-WEA in Deutschland aktuell nur schwer darstellbar, weswegen WEA als erneuerbare Energien eine gesetzliche Förderung erhalten. Die Laufzeit dieser EEG-Förderung beträgt für einen Großteil der deutschen Onshore-WEA 20 Jahre zzgl. des verbleibenden Zeitraums im Jahr der Inbetriebnahme. Eine am 01.02.2010 in Betrieb genommene WEA erhält eine finanzielle Förderung nach dem EEG entsprechend bis zum 31.12.2030. Bezüglich des Förderzeitraums sind zudem zwei Besonderheiten zu berücksichtigen. So gelten erstens sämtliche vor dem 01.04.2000 in Betrieb genommenen WEA, unabhängig vom tatsächlichen Datum der Inbetriebnahme, als zum 01.04.2000 in Betrieb genommen. Diese Sonderregelung führt folglich zu einer sehr großen Anzahl an WEA die letztmalig am 31.12.2020 einen Förderanspruch nach dem EEG haben (und vermutlich in 2021 rückgebaut werden). Zweitens ist zu berücksichtigen, dass WEA, deren Förderanspruch durch ein Ausschreibungsverfahren bestimmt wurde, einen Förderanspruch von exakt 20 Jahren haben. Hierbei müssen solche WEA an Ausschreibungen teilnehmen, die nach dem 31.12.2016 genehmigt worden sind. Bei einer üblichen Realisierungsphase, d.h. dem Zeitraum zwischen Erhalt der Genehmigung und Inbetriebnahme, von etwa 2 Jahren (Anm.: Eher etwas kürzer) kommt es somit zu einer (theoretischen) Verdichtung der rückzubauenden WEA im Jahr 2039, da hier einerseits solche WEA zurückgebaut werden, die in 2018 in Betrieb genommen wurden und nicht an Ausschreibungen teilnehmen mussten (Vergütungsanspruch somit bis zum 31.12.2038), und andererseits solche WEA die an einer Ausschreibung teilnehmen mussten und in 2019 in Betrieb genommen wurden.

Zur Vereinfachung gehen wir nachfolgend auch für WEA deren Vergütung über eine Ausschreibung bestimmt wurde, von einem Rückbau im 21. Kalenderjahr nach dem Jahr der Inbetriebnahme aus. Der Vollständigkeit halber wird zudem darauf hingewiesen, dass die Gewinner der Ausschreibungen in 2017 vielfach Bürgerenergiegesellschaften gewesen sind, die häufig noch keine Genehmigung innehaben und für die eine längere Realisierungsphase gilt. Diese Effekte lassen sich jedoch nicht detailliert abbilden und würden (bei hohen Realisierungsquoten den Zubau betreffend) ohnehin nur zu einer Verschiebung des Rückbaus um wenige Jahre führen. Die Vergütung betreffend, ist letztlich auch darauf hinzuweisen, dass auch von einer gewissen Entwicklung des Strompreises insgesamt ausgegangen werden kann. So prognostizieren Studien üblicherweise steigende Strommarktpreise, unterscheiden sich jedoch bzgl. der Anstiegsraten. Über die Laufzeit einer WEA könnte dies dazu führen, dass die erwirtschaftbare Vergütung an der Strombörse oder bei einem Direktabnehmer über der Förderung des EEG liegt. In einem solchen Fall würde der Förderzeitraum des EEGs keinen Einfluss auf die Lebensdauer einer WEA mehr haben. Für diese Studie führen derartige Überlegungen jedoch per se zu weit und sind spekulativ, zudem verbleiben die technischen Restriktionen bzgl. der Standsicherheit.

Zusammenfassend gehen wir von einer Lebensdauer je WEA in Anlehnung an den Förderzeitraum des EEG je WEA (d.h. 20 Jahre zzgl. des verbleibenden Jahres der Inbetriebnahme) aus. Dies führt zu einer Verdichtung der rückzubauenden WEA im Jahr 2021, wobei wir für die dann mehr als 20 Jahre alten WEA davon ausgehen, dass ein Weiterbetrieb eben bis zum 31.12.2020 technisch möglich ist. Bei einem Auslaufen der finanziellen Förderung nach dem 31. Dezember eines Jahres, berücksichtigen wir den tatsächlichen Rückbau im nachfolgenden Kalenderjahr. Für WEA die an Ausschreibungen teilnehmen mussten (Genehmigung ab 2017, angenommene Inbetriebnahme ab 2019) gehen wir ebenfalls von einem Rückbau im 21. Kalenderjahr nach dem Jahr der Inbetriebnahme aus.

3.2 Marktentwicklung und -wachstum für WEA

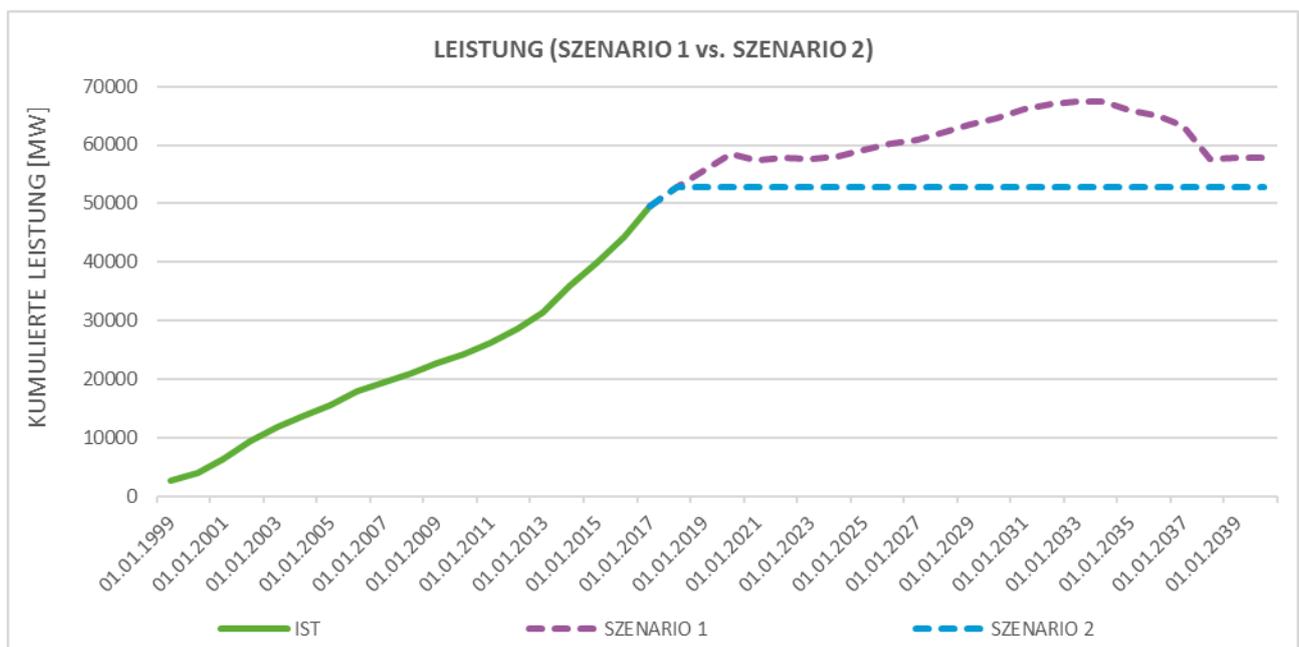
3.2.1 Vorstellung der Szenarien der Marktentwicklung

Die Prognose der Marktentwicklung erfolgt in den beiden bereits im Rahmen der Ausschreibung vom UBA definierten Szenarien, in denen zwei Entwicklungspfade der zugebauten bzw. kumulierten installierten Leistung festgeschrieben sind. Die Grundlage der Prognose bilden die vorliegenden IST-Zahlen des Anlagenbestands bis Ende 2017. Der Prognosezeitraum umfasst die Jahre 2018 bis 2040 einschließlich. In beiden Szenarien und für alle Cluster wird eine durchschnittliche wirtschaftliche Lebenszeit einer Anlage entsprechend der Dauer der EEG Förderung von 20 Jahren angenommen. Tatsächlich sind sowohl der Weiterbetrieb von Anlagen über die EEG Förderung hinaus als auch der vorzeitige Rückbau von Anlagen zu beobachten bzw. zu erwarten. Da es insbesondere zum Weiterbetrieb von Anlagen außerhalb der EEG Förderung noch keine Daten geben kann, wird für die Prognosen angenommen, dass sich beide Effekte ausgleichen.

3.2.1.1 Szenario 1: Marktentwicklung bei vollständiger Erfüllung des EEG

In SZENARIO 1, einem dem EEG17 entsprechenden Szenario, wird der brutto Zubau der Leistung pro Jahr entsprechend der Ausbaukorridore Windenergie an Land des EEG17 gewählt (vgl. Tabelle 11). Die Entwicklung des netto Zubaus bzw. der kumulierten installierten Leistung ist in Abhängigkeit von dem ab 2021 verstärkt einsetzen Rückbau von Anlagen volatil und zwischen 2034 und 2038 negativ (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11: Entwicklung kumulierte Leistung in SZENARIO 1 und SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

Zu beachten ist hier, dass im EEG17 die jährliche Leistung definiert wird, die in dem entsprechenden Jahr ausgeschrieben wird. Ein tatsächlicher Zubau bzw. die Inbetriebnahme dieser Leistung erfolgt mit einem Zeitverzug für Beschaffung und Errichtung der jeweiligen Anlagen von ca. 2 Jahren. Diese Verschiebung wird in der Prognose berücksichtigt.

Tabelle 11: Brutto Zubau Szenario 1

JAHR	Volumen	Volumen	Quelle ZUBAU
------	---------	---------	--------------

	AUSSCHREIBUNG [MW]	ZUBAU (brutto) [MW]	
2017	2.800	5.264	IST
2018	2.800	3.300	PROG SZENARIO 1
2019	2.800	2.800	PROG SZENARIO 1
2020	2.900	2.800	PROG SZENARIO 1
2021	2.900	2.800	PROG SZENARIO 1
2022 bis 2040	Jährlich jeweils 2.900	2.900	PROG SZENARIO 1

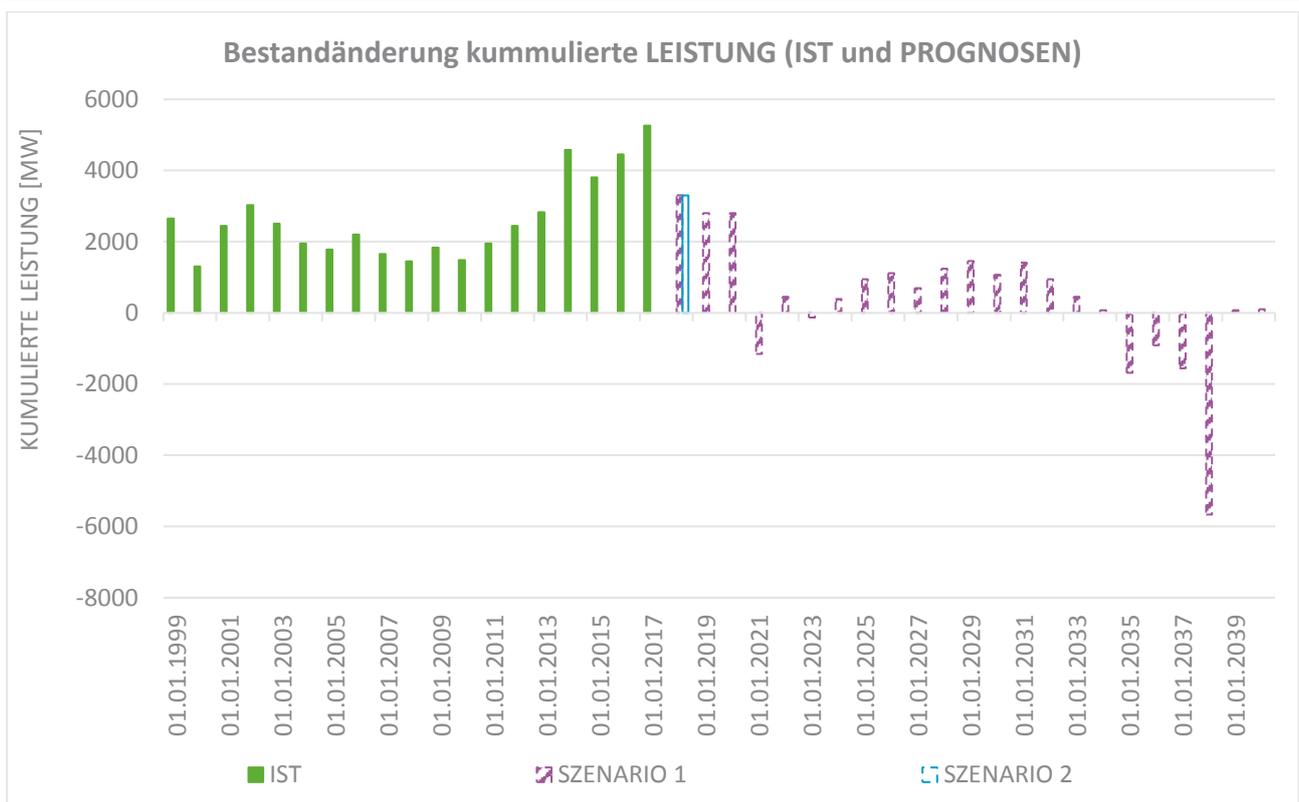
Quelle: (Ramboll)

Zusätzlich ist zu beachten, dass im EEG17 Übergangsregelung für den Wechsel zum Ausschreibungsmodell enthalten sind, die Projekte mit einer bis zum 31.12.2016 vorliegenden BImSchG Genehmigung von dem Ausschreibungsregime des EEG17 ausnehmen. Da die vorgesehene alternative Förderung in Anlehnung an das Marktprämienmodell des EEG14 für viele Projekte vorteilhaft ist, ist in den Jahren 2017 und 2018 ein Vorzieheffekt zu beobachten bzw. zu erwarten. Die im EEG17 festgelegte abnehmende Entwicklung der Marktprämien in Anhängigkeit des Monats der Inbetriebnahme verschiebt einen Großteil dieses Effekts in das Jahr 2017, was in den IST Zahlen an dem absoluten Maximum der zugebauten Leistung ablesbar ist (vgl. Tabelle 11). Trotzdem wird auch für 2018 ein über dem Ausschreibungsvolumen des EEG2017 für dieses Jahr liegender Zubau erwartet (WindGuard 2017).

3.2.1.2 Szenario 2: Marktentwicklung bei Erhalt der derzeitigen Gesamtleistung (Stand 2018)

In SZENARIO 2 soll die zugebaute Leistung ab 2019 dem Rückbau des jeweiligen Jahres entsprechen, so dass sich ein netto Zubau von 0 MW ergibt (vgl. Abbildung 12). Die kumulierte installierte Leistung wird auf dem Wert von 2018 eingefroren. Für die Prognose wird angenommen, dass außer Betrieb genommene Leistung noch im selben Jahr durch einen entsprechenden Zubau ersetzt wird. Die ausgeschriebene Leistung eines Jahres entspricht in SZENARIO 2 dem erwarteten Betrag des kumulierten Rückbaus in zwei Jahren.

Abbildung 12: Jährliche Veränderung kumulierte Leistung in SZENARIO 1 und SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

Da der dimensionierende Leistungswert gemäß Ausschreibung der kumulierten installierten Leistung des Jahres 2018 entsprechen soll, ist dieser Wert selber ebenfalls Gegenstand der Prognose, da zum Analysezeitpunkt keine IST-Daten für 2018 vorliegen. Zur Konsistenzsicherung wird im Rahmen des SZENARIO 2 für 2018 der Wert des brutto Zubaus aus SZENARIO 1 übernommen (vgl. Tabelle 12)

Tabelle 12: Brutto Zubau Szenario 2

JAHR	Volumen AUSSCHREIBUNG [MW]	Volumen ZUBAU (brutto) [MW]	Quelle ZUBAU
2017	0	5.264	IST
2018	0	3300	PROG SZENARIO 1
2019	3954	0	PROG SZENARIO 2
2020	2443	0	PROG SZENARIO 2
2021	3027	3954	PROG SZENARIO 2
2022	2511	2443	PROG SZENARIO 2
2023	1950	3027	PROG SZENARIO 2
2024	1782	2511	PROG SZENARIO 2
2025	2202	1950	PROG SZENARIO 2
2026	1656	1782	PROG SZENARIO 1
2027	1446	2202	PROG SZENARIO 2
2028	1831	1656	PROG SZENARIO 2
2029	1486	1446	PROG SZENARIO 2
2030	1951	1831	PROG SZENARIO 2

JAHR	Volumen AUSSCHREIBUNG [MW]	Volumen ZUBAU (brutto) [MW]	Quelle ZUBAU
2031	2447	1486	PROG SZENARIO 2
2032	2827	1951	PROG SZENARIO 2
2033	4579	2447	PROG SZENARIO 2
2034	3808	2827	PROG SZENARIO 2
3035	4456	4579	PROG SZENARIO 2
2036	8564	3808	PROG SZENARIO 2
2037	22	4456	PROG SZENARIO 2
2038	0	8564	PROG SZENARIO 2
2039	-	22	PROG SZENARIO 2
2040	-	0	PROG SZENARIO 2

Quelle: (Ramboll)

Anzumerken ist, dass die Prognose im SZENARIO 2 streng nach der Definition des UBA durchgeführt worden ist. Der bereits 2017 ausgeschriebene, vergebene und im Jahr 2019 eigentlich wirksam werdende Zubau wird daher nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zu den im Rahmen des EEG geförderten Anlagen, die Gegenstand von IST Analyse und Prognosen sind, können weitere Anlagen außerhalb des EEG existieren. Da deren Effekt auf die kumulierte Leistung des deutschen Anlagenbestands im bisherigen regulatorischen Rahmen aber zu vernachlässigen ist, wird deren Zu- bzw. Rückbau in beiden Szenarien nicht berücksichtigt.

3.2.2 Vorgehen Marktprognose

Der vom UBA vorgegebene Rahmen definiert für beide Szenarien die jährlichen kumulierten Werte der zugebauten bzw. kumulierten Leistung in Deutschland. Zur späteren Prognose von Abfallmengen und in gewissem Umfang auch Entsorgungskosten (vgl. Abschnitte 3.3 und 3.4) ist innerhalb des jeweiligen Szenarios eine Ermittlung der tatsächlich pro Cluster und Jahr zugebauten Anlagenanzahl erforderlich. Diese Ermittlung wird im Rahmen der Marktprognose in einem dreistufigen Verfahren durchgeführt:

- In einem ERSTEN SCHRITT wird im Rahmen einer Top-Down-Prognose (TD PROG) unter Vernachlässigung der WEA-Cluster auf Grundlage der mittleren Leistung einer in dem jeweiligen Jahr zugebauten Anlage die Anzahl der in diesem Jahr zugebauten Anlagen berechnet, wobei die Entwicklung der mittleren Leistung pro zugebauter Anlage den erwarteten technischen Fortschritt widerspiegelt. Die Entwicklung der mittleren Leistung pro zugebauter Anlage ist dabei selber Gegenstand einer Prognose (vgl. Abbildung 13).
- In einem ZWEITEN SCHRITT ist es erforderlich, die Entwicklung der aktuellen WEA-Cluster fortzuschreiben sowie zukünftige WEA-Cluster hinsichtlich ihrer Leistung sowie dem zeitlichen Verlauf ihres wahrscheinlichen Lebenszyklus zu definieren (vgl. Abschnitt 3.2.4). Die Betrachtung zukünftiger WEA-Cluster ist erforderlich, da nicht zu erwarten ist, dass sich der Lebenszyklus, der sich aktuell im Markt befindlich Cluster bis 2040 erstrecken wird.
- In einem DRITTEN SCHRITT wird die TD PROG mit Hilfe einer Button-Up-Prognose (UP PROG) innerhalb der Grenzen des aus dem jeweiligen Szenarios ermittelten jährlichen Zubaus sowie unter Berücksichtigung von Leistung und Lebenszyklus der prognoserelevanten WEA-Cluster

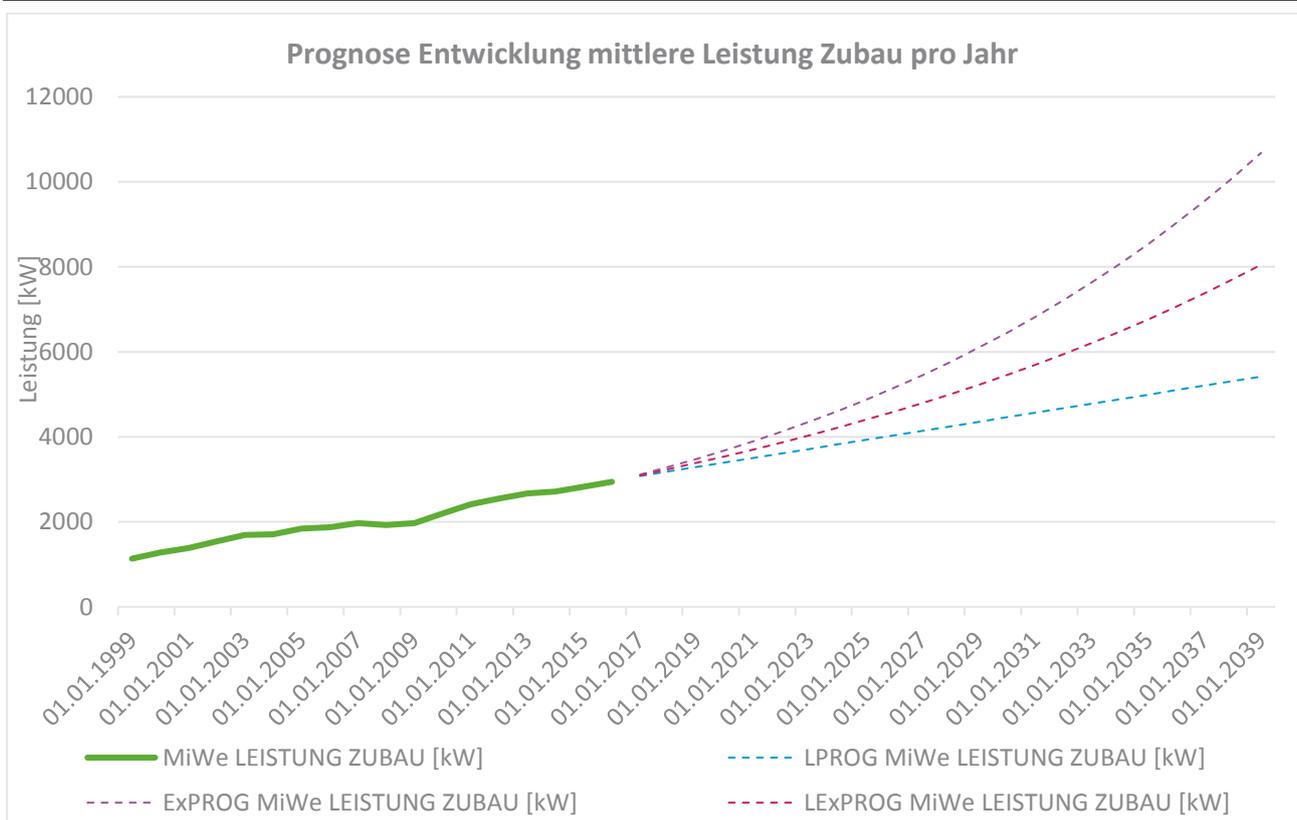
detailliert und so die Verteilung des Zubaus pro Jahr auf die jeweiligen Cluster bestimmt. Das Ergebnis stellt die Marktprognose dar.

Anzumerken ist, dass insbesondere die zukünftige Anlagenanzahl bzw. deren Verteilung auf die jeweils marktrelevanten WEA-Cluster Gegenstand der Marktprognose ist. Der Fokus der Untersuchung liegt daher auf der Prognose der WEA-Cluster. Eine Fortschreibung der Turm-Cluster erfolgt dann, wenn diese für die Prognose von Abfallmengen und Entsorgungskosten erforderlich ist.

3.2.3 Top-down-Prognose

Grundlage der TD PROG bildet die Entwicklung der mittleren Leistung des jährlichen Zubaus im Prognosezeitraum, die aus den vorhandenen IST Daten fortgeschrieben wird. Der Entwicklungskorridor wird ab 2017 aus einem linearen Modell mit einem konstanten Zuwachs von 106 kW pro Jahr (LPROG, untere Grenze) sowie einem exponentiellen Modell (ExPROG, oberer Grenze) mit einer Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate, CAGR) von 5,76 aufgespannt (vgl. Abbildung 13). Innerhalb dieses Korridors wird der jährliche Mittelwert beider Modelle (LExPROG) für die weiteren Prognosen verwendet.

Abbildung 13: Entwicklung mittlere Leistung pro zugebauter Anlage



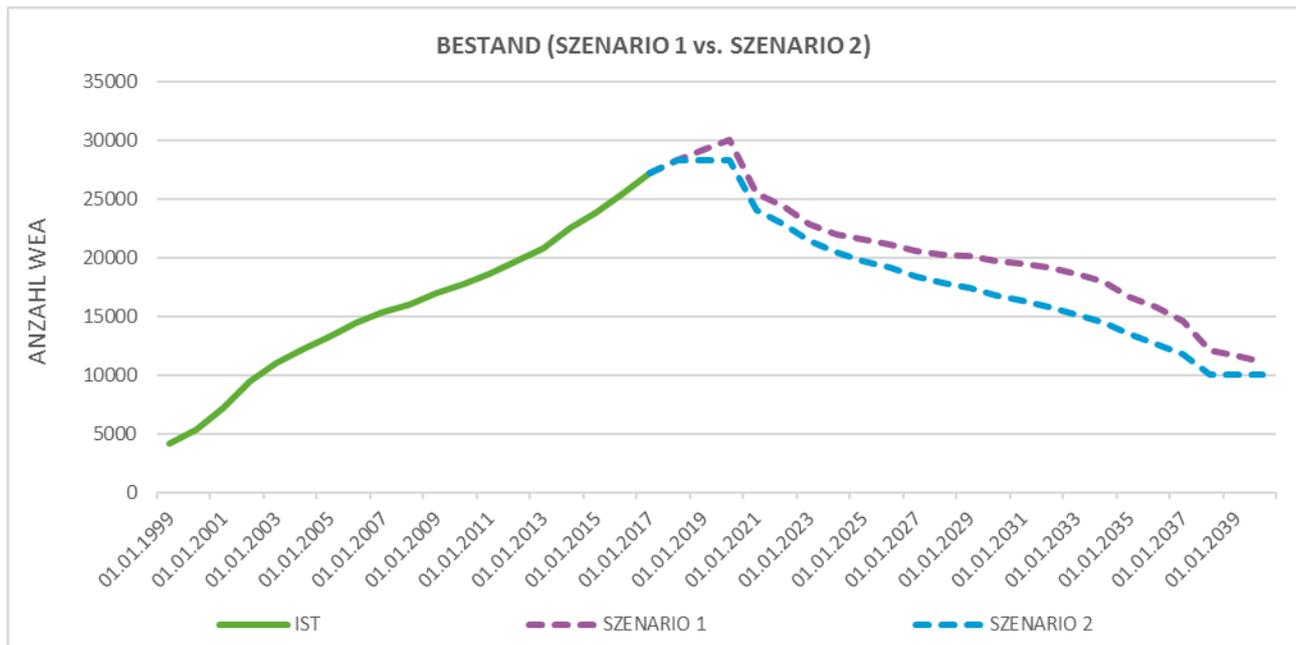
Quelle: (Ramboll)

Anzumerken ist, dass die mittlere Leistung der pro Jahr zugebauten Anlagen innerhalb eines WEA-Clusters zwar ansteigen kann, aber nicht entsprechend der mittleren Leistung über alle Cluster ansteigen muss, da der jährliche Zuwachs der mittleren Leistung auch durch eine Verschiebung der Verteilung zwischen den Clustern begründet sein kann.

Mit Hilfe der mittleren Leistung einer zugebauten WEA pro Jahr (vgl. Abbildung 13) können aus der Entwicklung der kumulierten Leistung nach dem Szenario Rahmen für SZENARIO 1 und SZENARIO 2 die Anzahl der zugebauten Anlagen pro Jahr unabhängig von ihrer Verteilung auf die einzelnen Cluster abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 14).

Die kumulierte Leistung und damit auch der Anlagenbestand entwickeln sich im Vergleich der beiden Szenarien im Prognoseverlauf zunächst unterschiedlich. Während die kumulierte Leistung in SZENARIO 1 zwischen 2017 und 2034 annähernd stetig steigt (Ausnahme 2022) bleibt sie in SZENARIO 2 definitionsgemäß konstant (vgl. Abbildung 11). Der maximale Unterschied zwischen beiden Szenarien stellt sich mit 14.500 MW entsprechend im Jahr 2034 ein. Da das SZENARIO 1 gemäß EEG17 jedoch anhand des brutto Zubaus definiert ist und dieser ab 2034 durch den anstehenden Rückbau überkompensiert wird, sinkt in SZENARIO 1 die kumulierte Leistung ab 2034 wieder ab, so dass die Differenz zwischen beiden Szenarien am Ende des Prognosezeitraums noch 4.900 MW beträgt.

Abbildung 14: Entwicklung WEA Bestand in SZENARIO 1 und SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

Der WEA-Bestand entwickelt sich in beiden Szenarien trotz zunächst steigender bzw. konstanter kumulierter Leistung nach einem absoluten Maximum im Jahr 2020 deutlich rückläufig (vgl. Abbildung 14). In beiden Szenarien überkompensiert der technische Fortschritt, also das Ansteigen der mittleren Leistung des jährlichen Zubaus, den zugelassenen kumulierten brutto Zubau - SZENARIO 1 entsprechend EEG17, SZENARIO 2 entsprechend Rückbau. Im gegebenen Szenario Rahmen und bei Zutreffen der Prognose der mittleren Leistung des jährlichen Zubaus beträgt der deutsche WEA-Bestand 2040 noch 37% (SZENARIO 1) bzw. 35% (SZENARIO 2) der jeweiligen Maximalwerte in den Szenarien.

3.2.4 Bestimmung und Fortschreibung prognoserelevante WEA-Cluster

Für die Prognose werden diejenigen der bestehenden WEA-Cluster identifiziert, die im Jahr 2017 Marktrelevanz besaßen und diese voraussichtlich auch mindestens im Jahr 2018 besitzen werden, wobei sich die Marktrelevanz 2018 bzw. 2019 bereits an den vorliegenden Ergebnissen der Ausschreibungsrunden des EEG 2017 ablesen lassen. Von einer Marktrelevanz eines Clusters wird im Rahmen dieser Prognose in allen Jahren ausgegangen, in denen insgesamt mindestens 100 Anlagen dieses Clusters errichtet worden sind. Für zukünftige Cluster wird diese Periode geschätzt.

Nach dem Kriterium der Marktrelevanz ergeben sich aus den IST Daten im Jahr 2017 unmittelbar vier potentiell prognoserelevant Cluster (vgl. Tabelle 13):

- Gear_05
- Gear_06
- DD_04
- DD_05

Für das Cluster DD_04 ist eine Marktrelevanz über 2017 hinaus auf Grundlage der Ergebnisse der bisher durchgeführten Ausschreibungen (Bundesnetzagentur 2019a) und der neu gemeldeten Genehmigungen im Anlagenregister der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2019b) jedoch zweifelhaft, so dass das Cluster DD_04 aus der Prognose ausgeschlossen wurde.

Tabelle 13: WEA Cluster (inklusive Fortschreibung)

Cluster	Typ	Mittlere Leistung Zubau pro Jahr [kW]	Marktrelevanz* (Jährlicher Zubau ≥ 100)	Ursprung	Prognose relevant
Gear_01	Getriebe	604 - 850	2000 - 2003	IST Daten	Nein
Gear_02	Getriebe	850 – 1300	2000 - 2003	IST Daten	Nein
Gear_03	Getriebe	1511 - 2080	2000 - 2007	IST Daten	Nein
Gear_04	Getriebe	2000 - 2497	2005 - 2015	IST Daten	Nein
Gear_05	Getriebe	2844 – 3000	2012 - 2024	IST Daten	Ja
Gear_06	Getriebe	3284 – 5600	2016 – 2026	IST Daten	Ja
Gear_07	Getriebe	4200 – 4800	2026 - 2036	Prognose	Ja
Gear_08	Getriebe	6500 - 8000	Ab 2036	Prognose	Ja
DD_01	Direkt	1200 - 3000	._**	IST Daten	Nein
DD_02	Direkt	2540 - 3041	._**	IST Daten	Nein
DD_03	Direkt	508 - 813	2000 - 2003	IST Daten	Nein
DD_04	Direkt	1500 - 2300	2000 - 2017	IST Daten	Nein
DD_05	Direkt	2800 - 2900	2013 - 2019	IST Daten	Ja
DD_06	Direkt	4200 – 7500	2018 - 2027	IST Daten / Prognose	Ja
DD_07	Direkt	5250 – 5750	2027 bis 2035	Prognose	Ja
DD_08	Direkt	7000 - 9000	Ab 2035	Prognose	Ja

* Die Schätzung der Marktrelevanz zukünftiger WEA Cluster erfolgt in Anlehnung an Szenario 1

** Jährlicher Zubau stets kleiner 100 Anlagen

Quelle: (Ramboll)

Das bereits in den IST-Daten vorkommende Cluster DD_06, das nach dem Kriterium der Marktrelevanz 2017 in der Prognose zu vernachlässigen wäre sich aber noch am Anfang seines Lebenszyklus befindet, ist in den Prognoseumfang aufgenommen.

Da die Marktrelevanz bei den aus den IST-Daten identifizierten WEA-Cluster zwischen 2012 (Gear_05) und 2018 (DD_06) eingesetzt hat, ist nicht zu erwarten, dass diese Cluster ihre Marktrelevanz bis zum Ende des Prognosezeitraums behalten werden. Vielmehr ist auf Grund des technischen Fortschritts bzw. der Entwicklung der mittleren Leistung der pro Jahr zugebauten Anlagen (Abbildung 13) vorhersehbar, dass diese Cluster zwischen 2020 und 2025 ihre Marktrelevanz verlieren werden. Zur Abbildung zukünftiger Anlagengenerationen ab 2025 werden im Rahmen der Marktprognose vier zusätzliche WEA-Cluster aufgenommen (vgl. Tabelle 13).

Die Dauer der Marktrelevanz sämtlicher WEA-Cluster im Prognoseumfang wird initial mit 10 Jahren angenommen, wobei diese Dauer durch Anpassungen des Zubaus pro Cluster und Jahr an die vorgegebenen Szenarien bei einigen Clustern verkürzen kann. Bei diesem Prozess wird SZENARIO 1 als dimensionierend angenommen. Zusätzlich wird auch innerhalb der einzelnen Cluster im Prognoseumfang mit einer ansteigenden mittleren zugebauten Leistung pro Anlage im Zeitverlauf gerechnet (vgl. Tabelle 13).

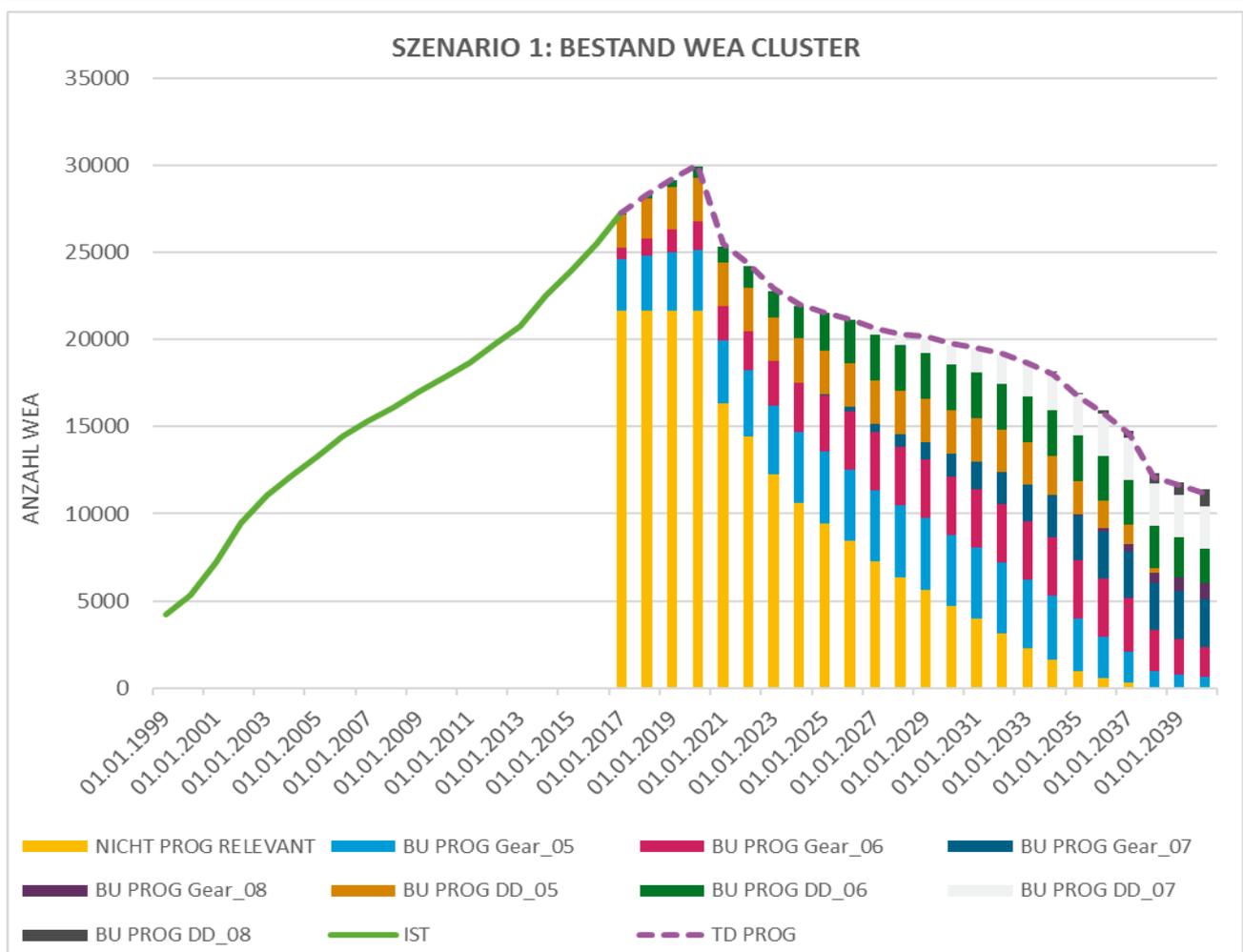
3.2.5 Bottom-up-Prognose

Zur Ermittlung des Bestands von WEA der einzelnen Cluster im Rahmen der Bottom-Up-Prognose wird die Anzahl der pro Jahr und Cluster zugebauten Anlagen unter Berücksichtigung der Marktrelevanz der Cluster (vgl. Abschnitt 3.2.4) durch Ramboll-Experten initial geschätzt. Diese initiale Schätzung wird mathematisch an das die kumulierte Leistung vorgebende Szenario sowie an die Top-down ermittelten Bestände der WEA pro Jahr angepasst, wobei die durch die initiale Schätzung festgelegten Verhältnisse der Cluster unter einander bis auf Rundungseffekte konstant bleiben.

Bei der Schätzung für den Anteil der Anlagen mit Getriebe wird in Glättung der IST-Zahlen in beiden Szenarien ein Korridor zwischen 50% und 60% eingestellt, wobei sich auf Grund des erwarteten schnelleren Wachstums der Leistung von Anlagen ohne Getriebe ein leichter Trend zu diesen Anlagen ergibt. Durch die Definition eines Korridors können in der Schätzung die Verschiebungen auf Grund der nicht vollständig parallelen Marktrelevanz von korrespondierenden Clustern zu Anlagen mit und ohne Getriebe abgebildet werden. Auf die Modellierung der in den IST-Zahlen erkennbaren starken Volatilität dieses Verhältnisses wird in der Prognose außerhalb dieses Korridors verzichtet.

In den Auswertungen für die beiden Szenarien werden im Zeitverlauf die Anteile der Cluster sowohl als Anlagenbestand (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16) als auch als kumulierte installierten Leistung (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18) dargestellt, wobei sich der Anteil der Cluster an der jeweiligen kumulierten Leistung pro Jahr unmittelbar aus ihrer Definition ergibt (vgl. Abschnitt 3.2.4). Anzumerken ist, dass auch Bestand und Leistung von früheren nicht prognoserelevanten Cluster als Sockel in den Auswertungen erscheinen. Die Anteile der früheren Cluster werden zur besseren Übersichtlichkeit aggregiert dargestellt.

Abbildung 15: Entwicklung WEA Bestand nach Clustern in SZENARIO 1



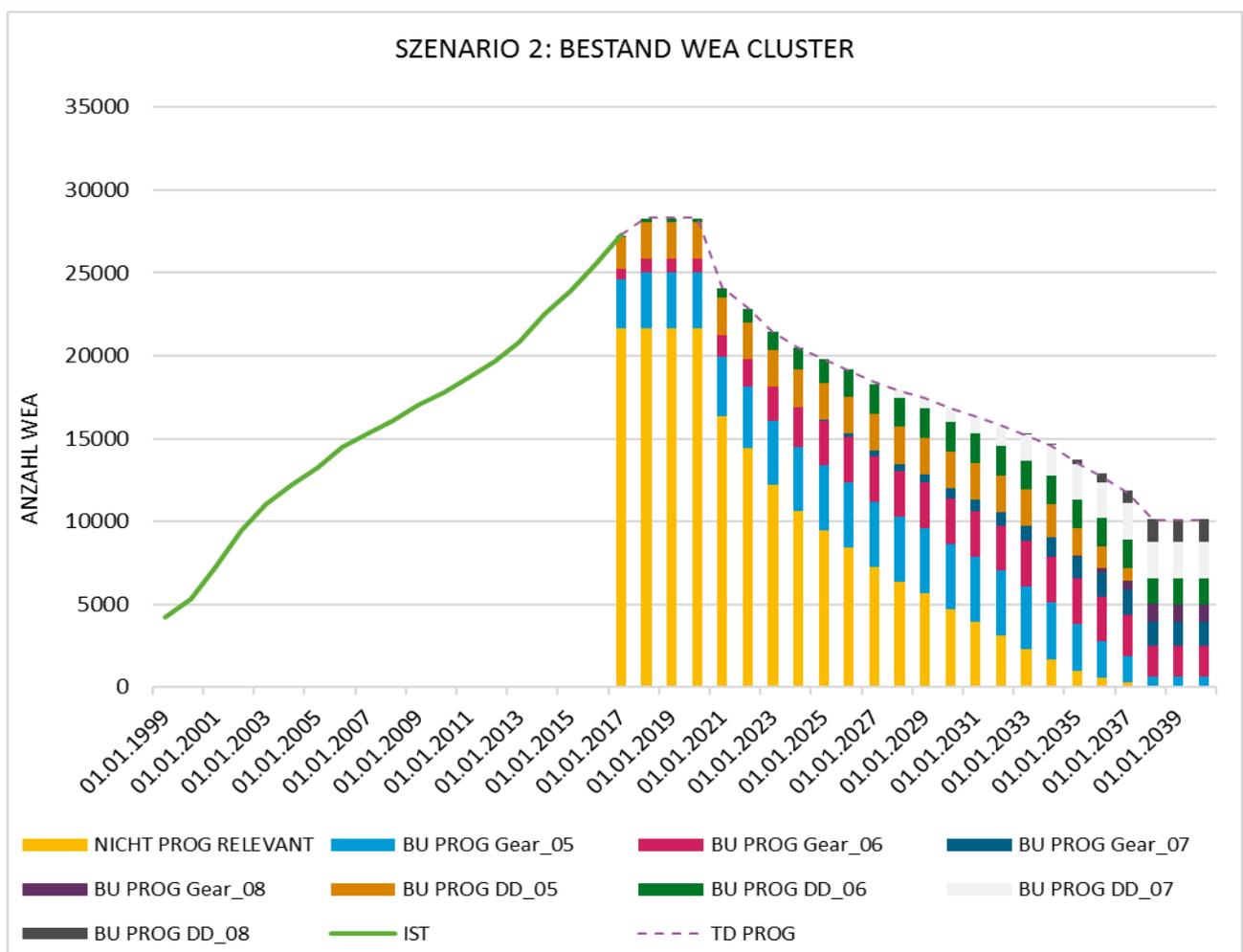
Quelle: (Ramboll)

In beiden Szenarien wird der installierte WEA Bestand am Anfang des Prognosezeitraums tatsächlich noch stark durch bereits aktuell installierte Anlagen früherer Cluster bestimmt. Rückbau in größerem Ausmaß ist erst mit dem Auslaufen der Förderung des ersten EGG ab 2021 zu erwarten.

Da 2021 sämtliche vor 2000 errichtete aber nachträglich ins EEG aufgenommene WEA rückgebaut werden, erreicht der absolute Rückgang des Bestands in diesem Jahr ein Maximum. Bei diesen Anlagen handelt es sich überwiegend um WEA mit einer Leistung <450 kW, die in dem Cluster KWEA zusammengefasst sind (vgl. Kapitel 3.1.1.2). Da im EEG17 Anlagen mit einer Leistung <750 kW nicht Bestandteil der Ausbaukorridore und damit vom Ausschreibungsmodell ausgenommen sind, wird ein eventuell zukünftig stattfindender Zubau dieser Anlagen in den Prognosen definitionsgemäß nicht mehr erfasst.

Ein Vergleich der Bestandsprognosen beider Szenarien zeigt im Zeitverlauf eine Verschiebung zwischen den betrachteten WEA-Clustern. Im SZENARIO 1 mit seinem durch das EEG17 definierten konstanten brutto Zubau durchlaufen die betrachteten Cluster einen typischen Lebenszyklus in ihrer Marktrelevanz. Der im Vergleich zu früheren Clustern abnehmende Bestand von WEA späterer Cluster ist mit der Marktdämpfung durch die definierten Ausbaukorridore in Kombination mit der steigenden Leistung der WEA innerhalb der Cluster zu erklären (vgl. Abbildung 15).

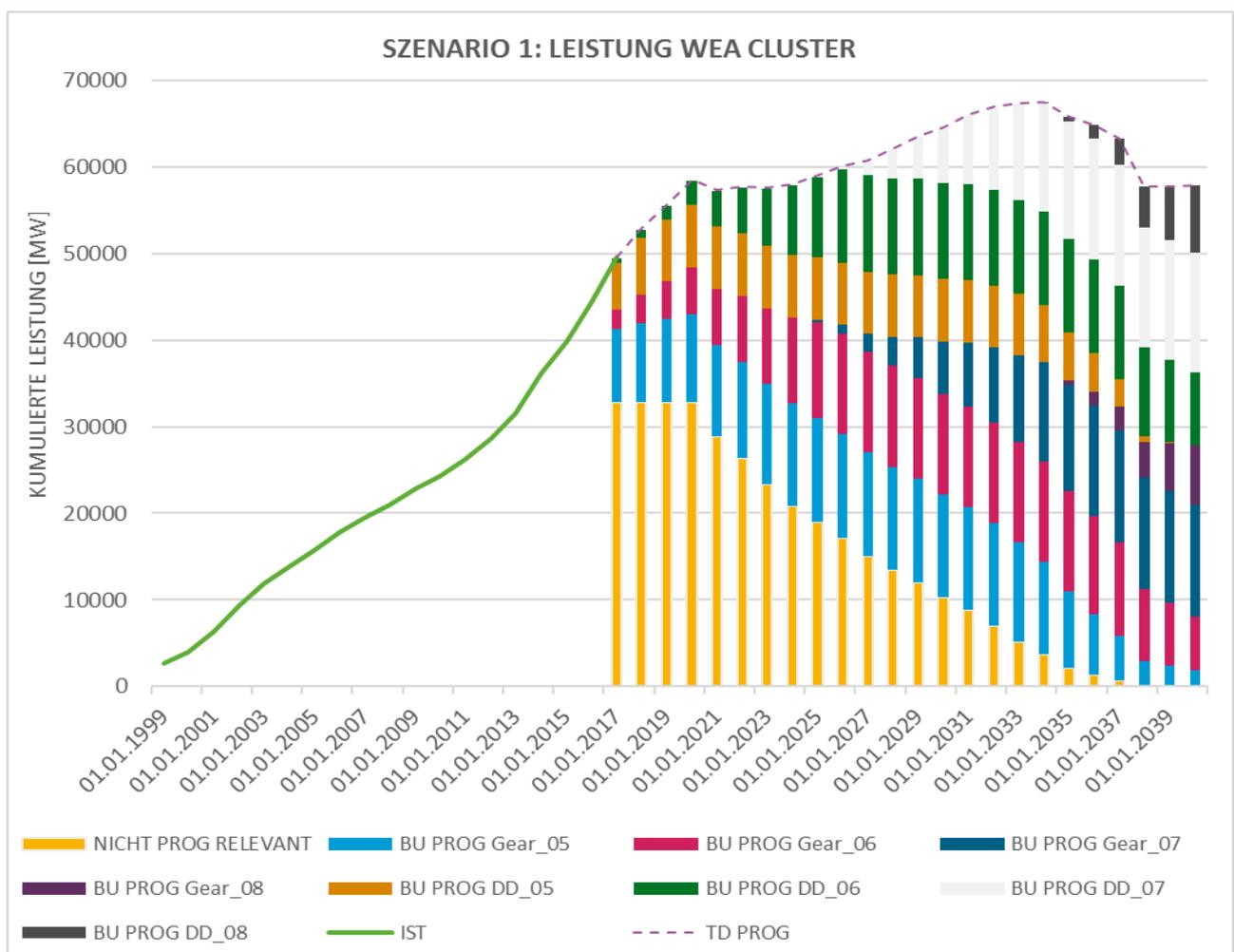
Abbildung 16: Entwicklung WEA Bestand nach Clustern in SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

Im Vergleich zu SZENARIO 1 erfolgt der Zubau neuer WEA in SZENARIO 2 im Jahresvergleich unregelmäßig. Am Anfang sowie insbesondere am Ende des Prognosezeitraums ergibt sich in SZENARIO 2 ein verstärkter jährlicher Zubau. In Folge ist die Zusammensetzung des WEA-Bestands in diesem Szenario in Richtung derjenigen WEA-Cluster verschoben, die in den entsprechenden Jahren Marktrelevanz aufweisen. Im Vergleich zu SZENARIO 1 sind in SZENARIO 2 die frühen Cluster Gear_05 und DD_05 sowie die ab 2035 marktrelevanten Cluster Gear_08 und DD_08 ab ihrem Erscheinen stärker im Bestand gewichtet. Dagegen sind in SZENARIO 2 insbesondere die Cluster Gear_07 und DD_07 im Vergleich zu den übrigen Clustern im Bestand unterrepräsentiert (vgl. Abbildung 16).

Abbildung 17: Entwicklung kumulierte Leistung nach Clustern in SZENARIO 1

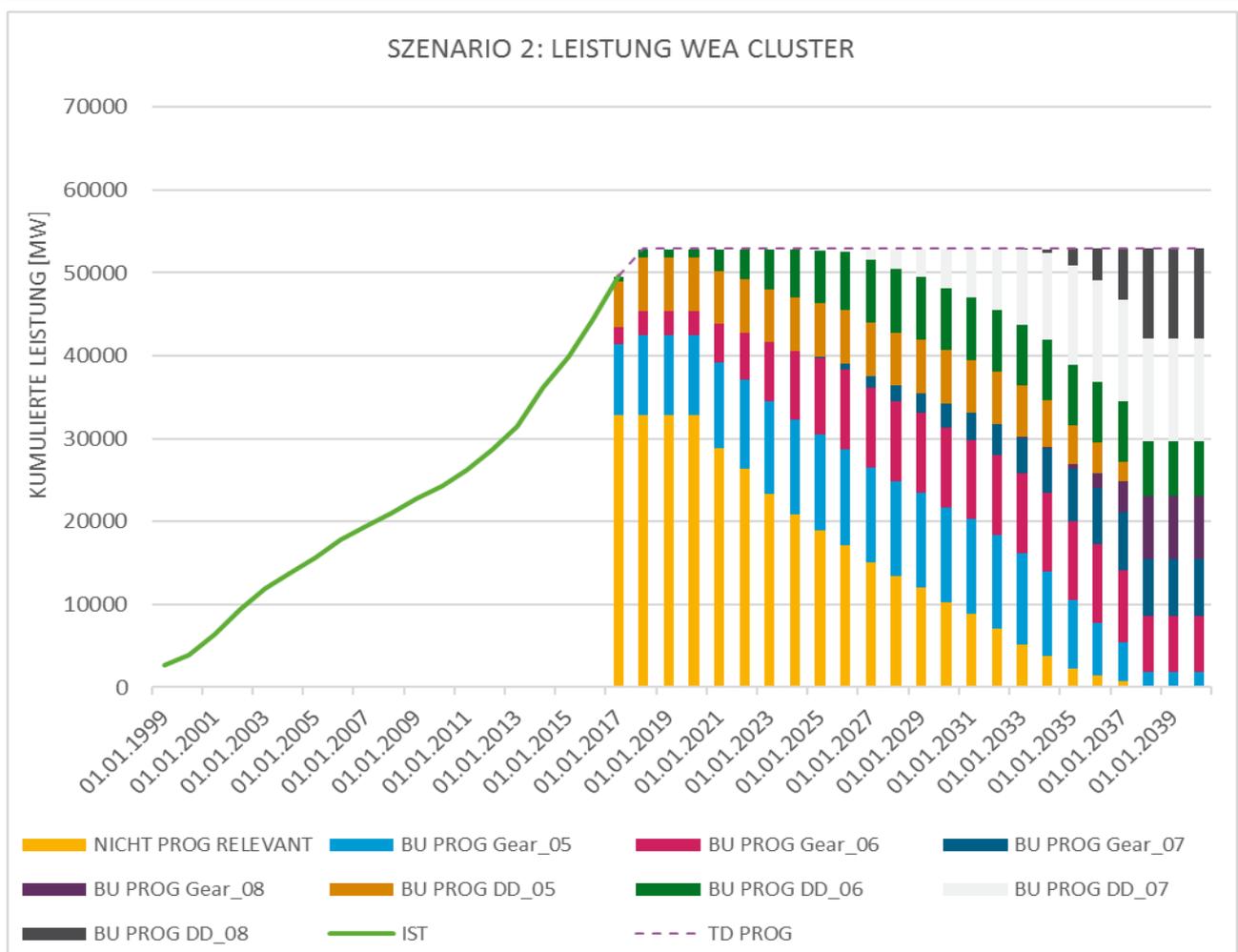


Quelle: (Ramboll)

Im Gegensatz zum Bestand ist im Hinblick auf die kumulierte installierte Leistung der Anteil der vor 2018 zugebauten WEA bereits zu Beginn des Prognosezeitraums geringer. Auch der 2021 überwiegend durch den Rückbau der WEA des Clusters KWEA ausgelöste starke Rückgang des Bestands tritt bei der kumulierten Leistung in keinem der Szenarien auf. Frühe WEA sowie insbesondere die Anlagen im Cluster KWEA tragen auf Grund ihrer geringen Leistung pro Anlage nur wenig zur kumulierten Leistung 2020 bei, so dass ihr gleichzeitiger Rückbau zwar mengen- nicht jedoch leistungsmäßig auffällig ist.

Noch deutlicher als im Vergleich der Bestände der einzelnen Cluster zeigt der Vergleich ihres Beitrags zur kumulierten Leistung, dass der im Zeitverlauf annähernd regelmäßige Zubau (brutto) des EEG17 zu einer ähnlichen Marktentwicklung der einzelnen Cluster im SZENARIO 1 führt (vgl. Abbildung 17).

Abbildung 18: Entwicklung kumulierte Leistung nach Clustern in SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

3.3 Abfallprognose auf Grundlage der Materialanalyse

Aus den in den vorherigen Kapiteln entwickelten WEA- und Turm-Clustern, den Materialmengen je Cluster, der Zusammensetzung des deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestandes, dem prognostizierten Ausbau und den Ansätzen zur Lebensdauer einer WEA, werden in diesem Kapitel die resultierenden Abfallströme für die relevantesten Stoffgruppen hergeleitet und dargestellt.

Zeitlich werden hierbei die Jahre von 2020 bis 2040 betrachtet, wobei sich aufgrund der beiden Ausbau-Szenarien in den letzten Jahren Abweichungen zwischen den beiden Szenarien ergeben.

In den dargestellten Abfallströmen ist der Weiterverkauf und damit die Wiedernutzung (bspw. an einem neuen Standort) ganzer WEA oder einzelner Komponenten explizit nicht berücksichtigt. Diese Annahme basiert maßgeblich auf den Ergebnissen aus Kapitel 2.2.3.2, wonach der Zweitmarkt bereits aktuell erste Sättigungserscheinungen aufweist, die sich aller Voraussicht nach unter Berücksichtigung der zukünftig sehr hohen Rückbauzahlen weiter ausprägen werden. Zudem gibt es, wie in Anlage B.2 und in Kapitel 3.1.2 beschrieben, auch technische Grenzen, welche bzgl. der Lebensdauer einer WEA zu berücksichtigen sind. Für einzelne Komponenten (insbesondere Großkomponenten) unterstellen wir eine Lebensdauer, welche der Lebensdauer der gesamten Anlage entspricht. Dieser Ansatz ist zudem auch vor dem Hintergrund der Alterung der Flotte, d.h. der Anzahl der in Betrieb befindlichen WEA gleichen Modells, und somit der Anlagenzahl in denen eine alte Komponente überhaupt wiedereingesetzt werden kann, als realistisch einzuschätzen.

Sollte sich unserer Einschätzung zum Zweitmarkt für Anlagenteile zukünftig als falsch herausstellen, würden sich, von der Möglichkeit des Anlagenverkaufs ins Ausland abgesehen, ein Teil des Abfallaufkommens lediglich um wenige Jahre in die Zukunft verlagern. Bei einem Verkauf von Komponenten oder WEA ins Ausland würden sich die prognostizierten Abfallmengen entsprechend verringern.

3.3.1 Abfälle aus dem Rückbau von WEA am Ende des Lebenszyklus

3.3.1.1 Szenario 1: Marktentwicklung bei vollständiger Erfüllung des EEG

Bei Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Eingangsgrößen folgen für das SZENARIO 1 folgende jährlichen zu erwartenden Abfallmenge:

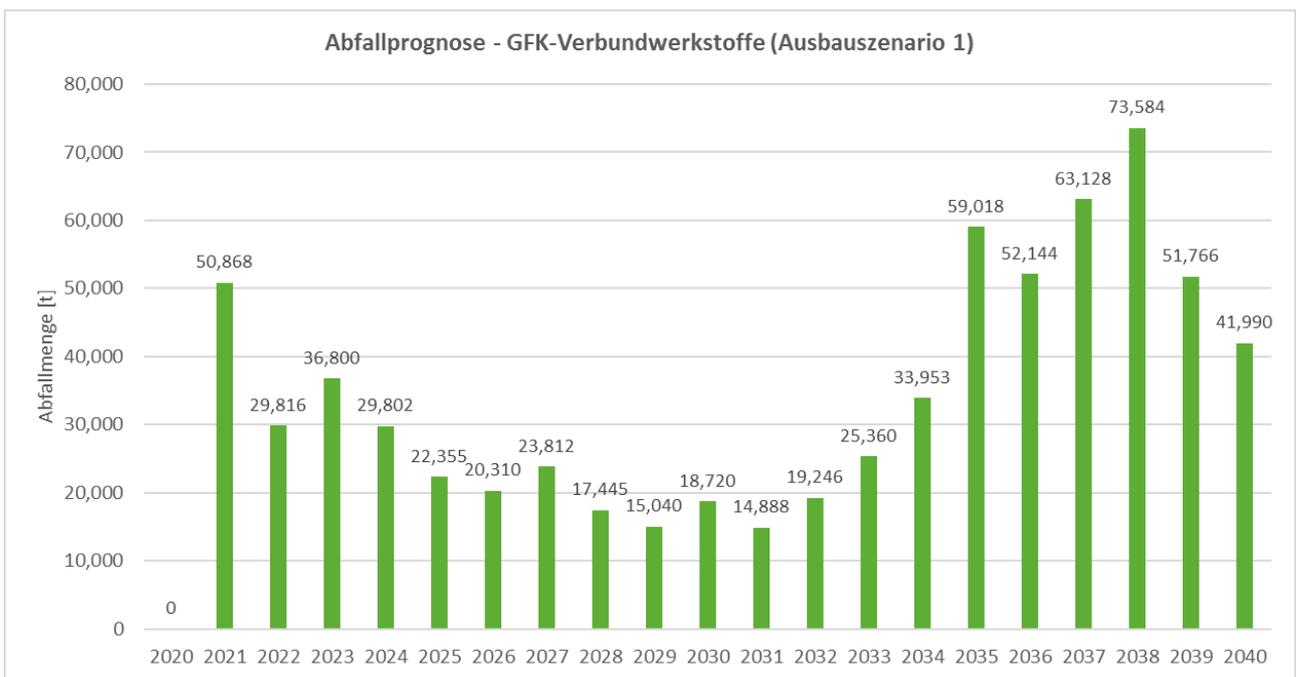
Tabelle 14: Abfallprognose für das SZENARIO 1

Jahr	Verbundwerkstoffe (GFK) t	Verbundwerkstoffe (GFK/CFK) t	Stahl t	Kupfer t	Aluminium t	Beton t	Elektroschrott t
2020	0	0	0	0	0	0	0
2021	50.868	9	847.700	12.458	2.083	3.213.839	25.580
2022	29.816	9	421.403	6.806	906	1.694.005	12.685
2023	36.800	9	522.440	9.117	1.072	2.137.698	15.543
2024	29.802	18	407.432	7.462	838	1.750.188	12.341
2025	22.355	416	319.353	6.269	662	1.551.112	9.454
2026	20.310	469	295.495	5.589	604	1.454.516	8.597
2027	23.812	1.454	352.332	6.323	694	1.652.742	10.241
2028	17.445	1.206	258.577	5.561	540	1.285.948	7.867
2029	15.040	1.192	225.907	4.810	470	1.078.614	6.777
2030	18.720	1.022	280.550	7.076	629	1.607.386	8.708
2031	14.888	867	226.452	5.494	533	1.385.931	6.874
2032	19.246	1.514	288.547	6.872	714	1.855.381	8.609
2033	25.360	2.292	359.174	7.958	1.069	2.420.860	10.258
2034	33.953	3.581	440.832	8.326	1.631	2.981.945	11.653
2035	59.018	6.815	691.289	13.112	2.837	4.496.682	18.741
2036	52.144	6.954	601.338	10.203	2.605	4.044.531	15.702
2037	63.128	8.669	726.088	12.477	3.319	4.984.553	18.624
2038	73.584	10.611	836.216	14.161	3.745	5.527.403	22.015
2039	51.766	6.533	539.361	10.279	3.091	3.650.641	14.229
2040	41.990	5.709	439.549	8.253	2.438	2.891.676	11.740

Quelle: (Ramboll)

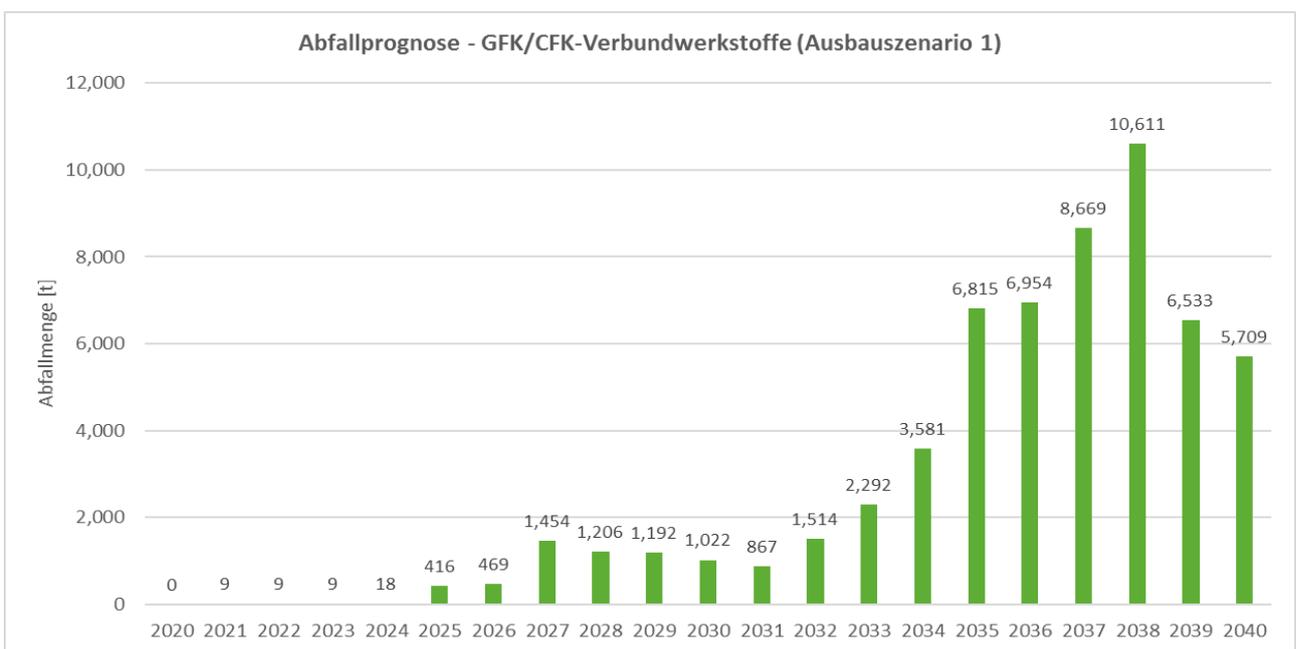
In den nachfolgenden Diagrammen werden die Mengenverläufe der einzelnen Stoffströme, zur besseren Übersichtlichkeit, einzeln dargestellt.

Abbildung 19: Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus GFK (SZENARIO 1)



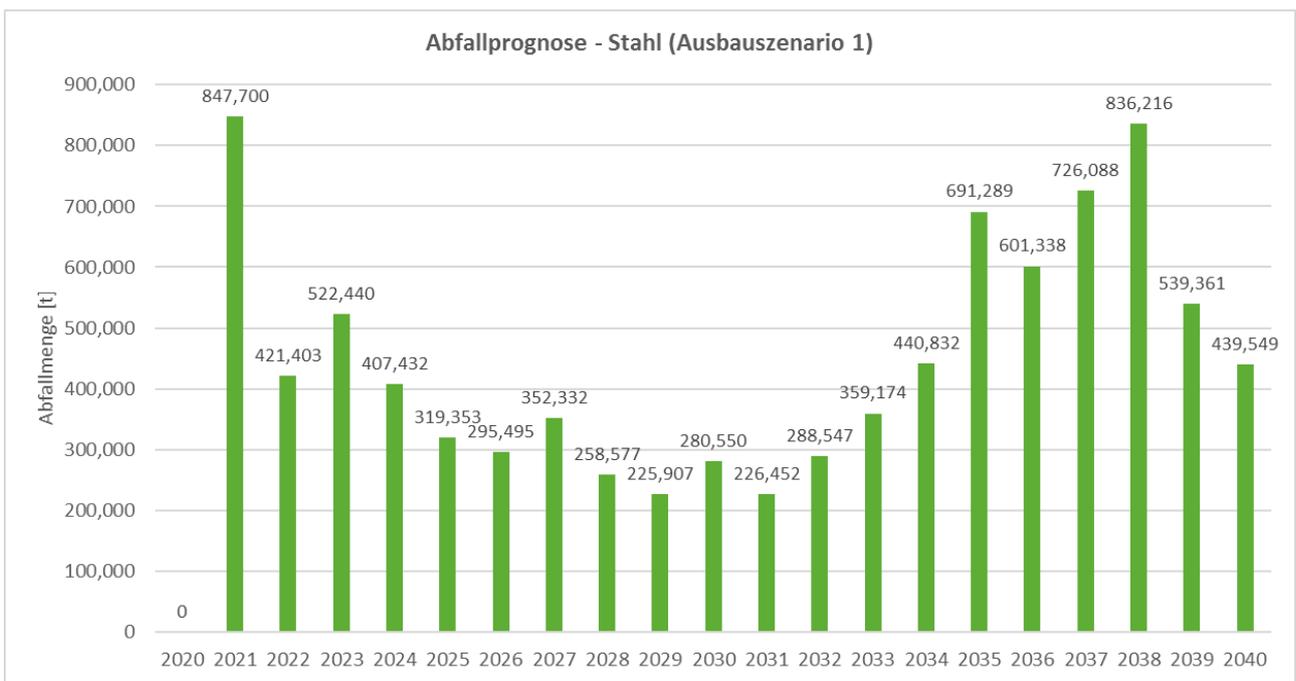
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 20: Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus CFK/GFK (SZENARIO 1)



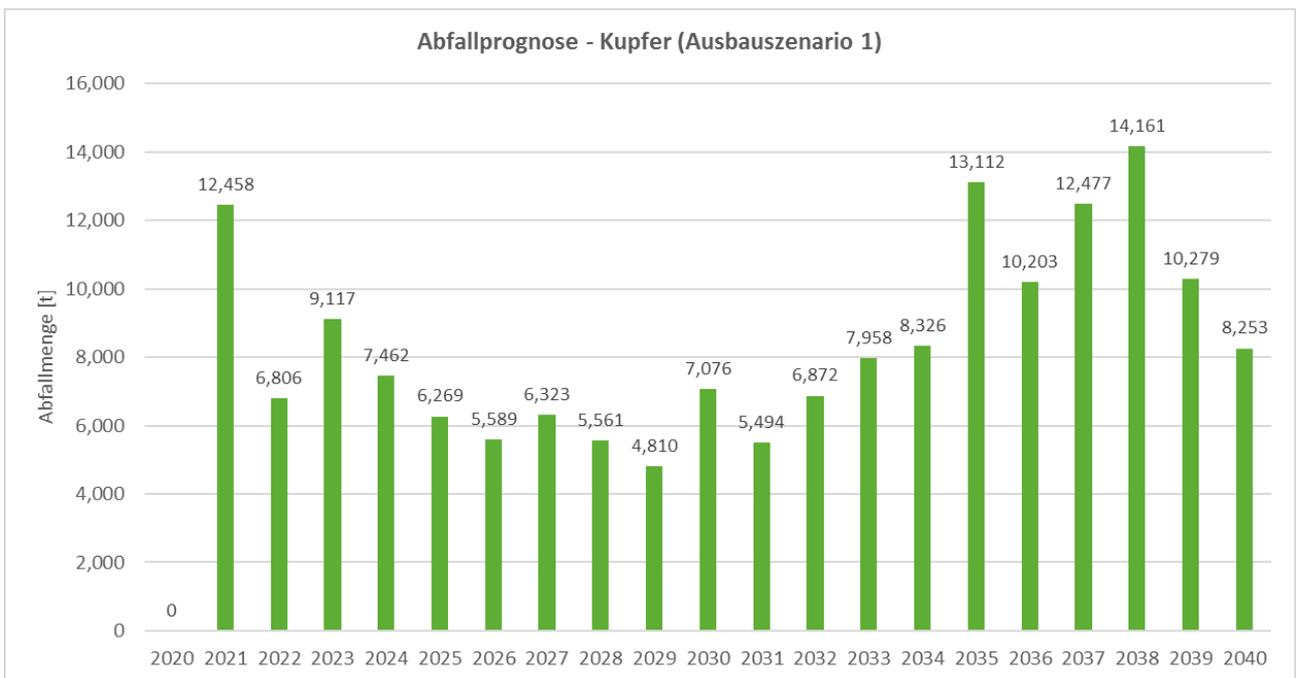
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 21: Abfallprognose – Stahl (SZENARIO 1)



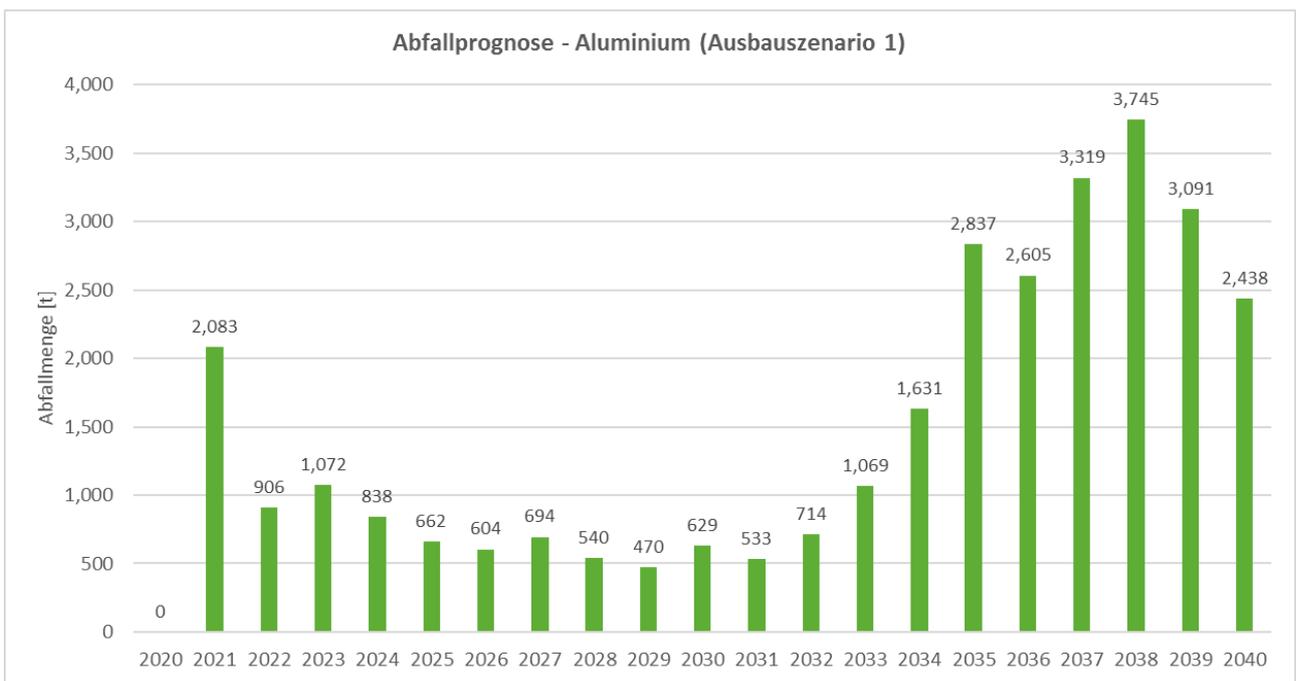
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 22: Abfallprognose – Kupfer (SZENARIO 1)



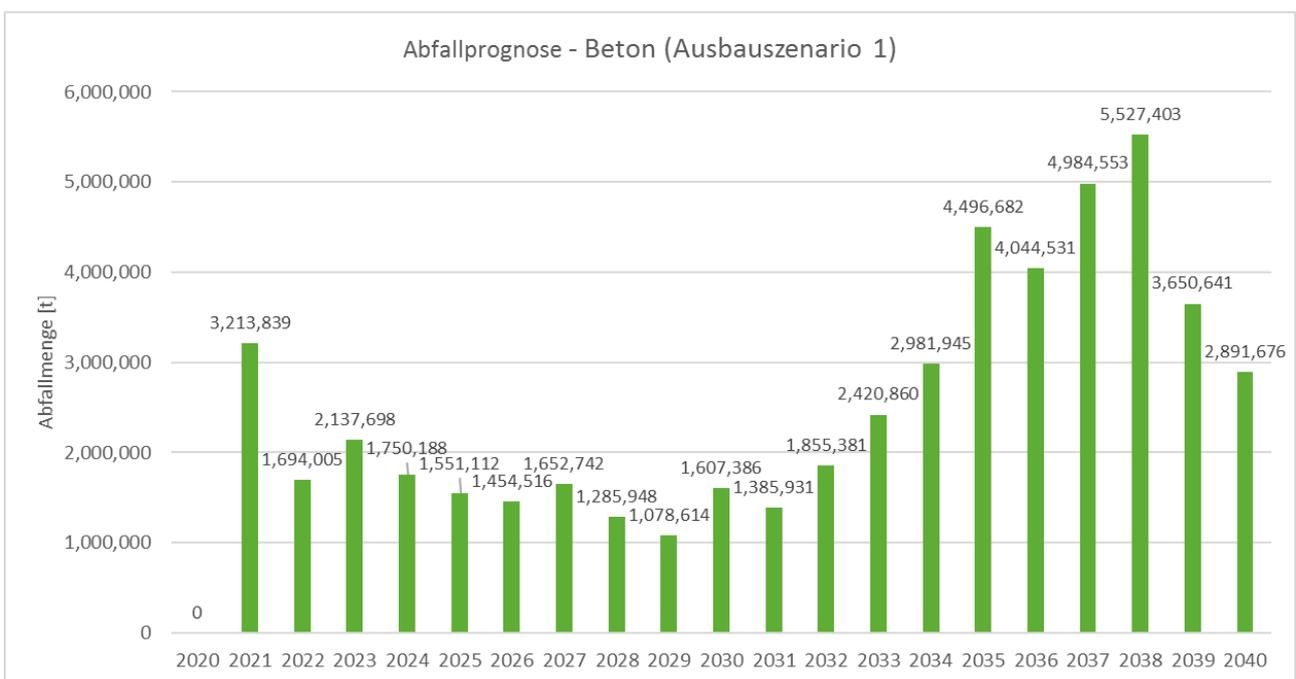
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 23: Abfallprognose – Aluminium (SZENARIO 1)



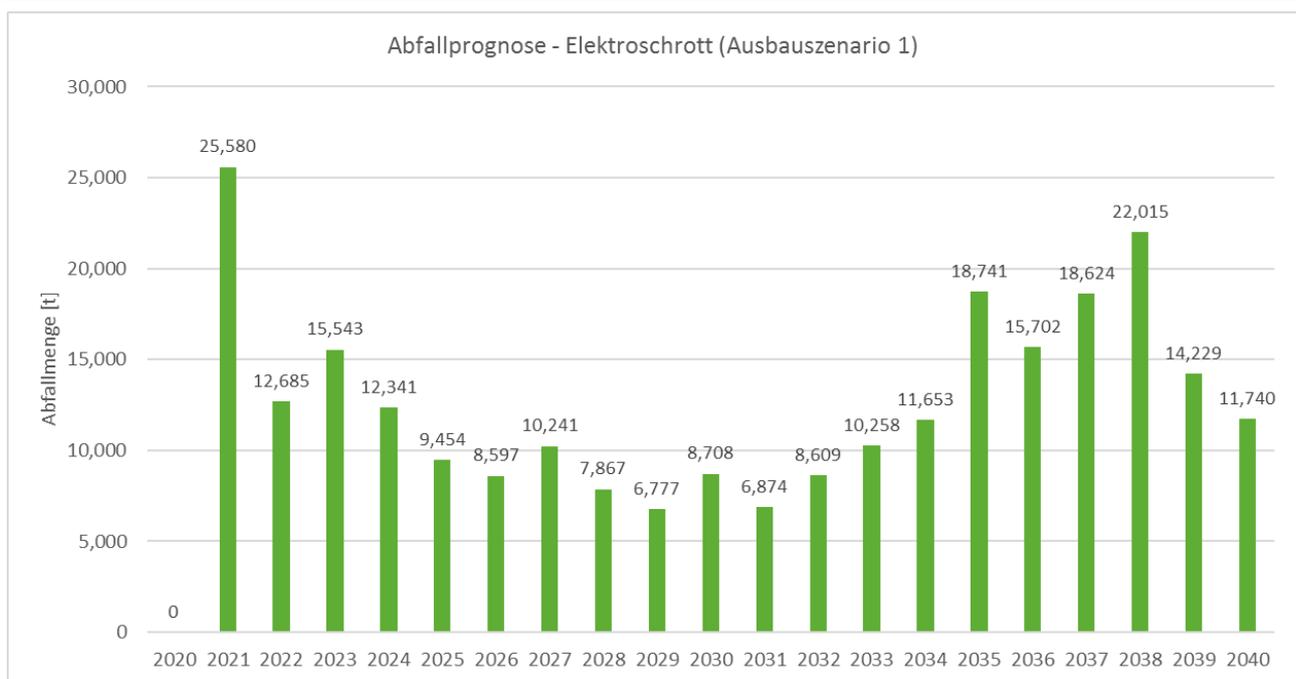
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 24: Abfallprognose – Beton (SZENARIO 1)



Quelle: (Ramboll)

Abbildung 25: Abfallprognose – Elektroschrott (SZENARIO 1)



Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend lässt sich für alle Stoffe, mit Ausnahme der Verbundwerkstoffe, die auch CFK enthalten können, ein sehr ähnlicher Verlauf der zu erwartenden Abfallmengen feststellen.

So kann für das Jahr 2021 ein erstes Maximum festgestellt werden, welches etwa bis 2030 stetig abnimmt. Nachfolgend steigen die zu erwartenden Abfallmengen bis 2017 deutlich an und verringern sich (aufgrund der Ansätze zu den Zubau-Raten und der Lebensdauer) in den beiden Nachfolgejahren erneut.

Für Verbundwerkstoffe, die CFK enthalten, werden zunächst sehr moderate Abfallmengen bis etwa 2024 erwartet. Ab 2025 sind relevante Mengen an CFK-haltigen Abfällen zu erwarten, welche in den Folgejahren stetig ansteigen und im Jahr 2038 einen Maximalwert erreichen. In den beiden Folgejahren sinken die zu erwartenden CFK-haltigen Abfälle dagegen wieder leicht ab, was auf die Ansätze zum zukünftigen Anlagenausbau zurückzuführen ist. Insbesondere aufgrund der beschriebenen Problemstellungen bei der Findung eines geeigneten Ansatzes für den Metarialeinsatz je WEA-Cluster für CFK-haltige Verbundwerkstoffe ist die Abfallprognose für diese Stoffgruppe mit erhöhten Unsicherheiten behaftet.

Für Beton und Aluminium, sowie abgeschwächt auch für Verbundwerkstoffe auf der Basis von GFK, lässt sich zudem feststellen, dass die maximalen Abfallmengen im Jahr 2038 deutlich größer als die Materialmengen aus dem Jahr 2021 sind. Bezüglich des Betons lässt sich diese zeitliche Mengenentwicklung zudem sehr gut auf die steigenden Fundamentvolumina und den vermehrten Einsatz von Hybridtürmen zurückführen.

Abschließend kann zudem festgestellt werden, dass bezogen auf die reinen Abfallmassen insbesondere Beton (ca. 83,4%) gefolgt vom Stahl (ca. 14,7%) vorherrschen. Die aus Sicht einer hochwertigen Verwertung als eher problematisch einzustufenden Verbundwerkstoffe machen hingegen nur rund 1,1 m-% (nur GFK, kein CFK) zzgl. 0,1 m-% (GFK und CFK) der gesamten Abfallmasse aus. Sonstige metallische Abfälle wie Kupfer, Aluminium und Elektroschrott liegen zusammen bei ca. 0,7% der gesamten Abfallmasse und stellen somit den kleinsten Anteil dar.

3.3.1.2 Szenario 2: Marktentwicklung bei Erhalt der derzeitigen Gesamtleistung (Stand 2018)

Bei Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Eingangsgrößen folgen für das Ausbauszenario 2 folgende jährlich zu erwartenden Abfallmengen:

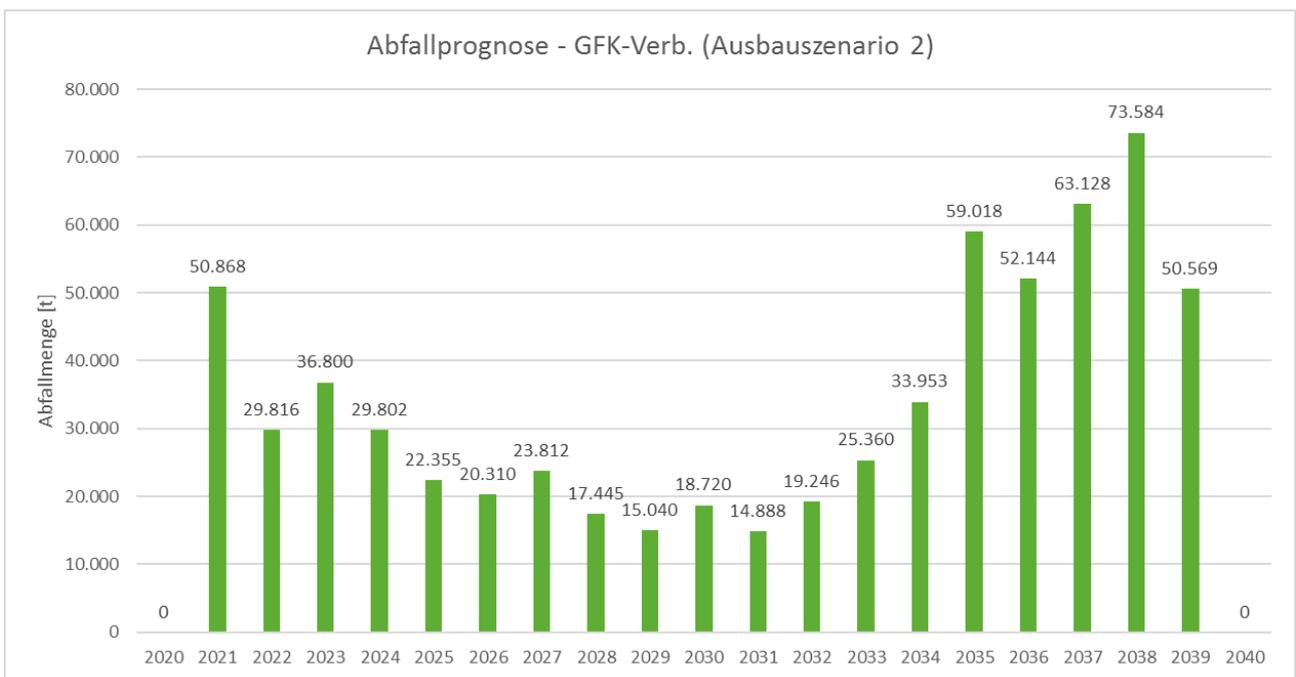
Tabelle 15: Abfallprognose für das SZENARIO 2

Jahr	Verbundwerkstoffe (GFK) t	Verbundwerkstoffe (GFK/CFK) t	Stahl t	Kupfer t	Aluminium t	Beton t	Elektroschrott t
2020	0	0	0	0	0	0	0
2021	50.868	9	847.700	12.458	2.083	3.213.839	25.580
2022	29.816	9	421.403	6.806	906	1.694.005	12.685
2023	36.800	9	522.440	9.117	1.072	2.137.698	15.543
2024	29.802	18	407.432	7.462	838	1.750.188	12.341
2025	22.355	416	319.353	6.269	662	1.551.112	9.454
2026	20.310	469	295.495	5.589	604	1.454.516	8.597
2027	23.812	1.454	352.332	6.323	694	1.652.742	10.241
2028	17.445	1.206	258.577	5.561	540	1.285.948	7.867
2029	15.040	1.192	225.907	4.810	470	1.078.614	6.777
2030	18.720	1.022	280.550	7.076	629	1.607.386	8.708
2031	14.888	867	226.452	5.494	533	1.385.931	6.874
2032	19.246	1.514	288.547	6.872	714	1.855.381	8.609
2033	25.360	2.292	359.174	7.958	1.069	2.420.860	10.258
2034	33.953	3.581	440.832	8.326	1.631	2.981.945	11.653
2035	59.018	6.815	691.289	13.112	2.837	4.496.682	18.741
2036	52.144	6.954	601.338	10.203	2.605	4.044.531	15.702
2037	63.128	8.669	726.088	12.477	3.319	4.984.553	18.624
2038	73.584	10.611	836.216	14.161	3.745	5.527.403	22.015
2039	50.569	6.629	534.963	9.750	2.912	3.609.422	13.881
2040	0	0	0	0	0	0	0

Quelle: (Ramboll)

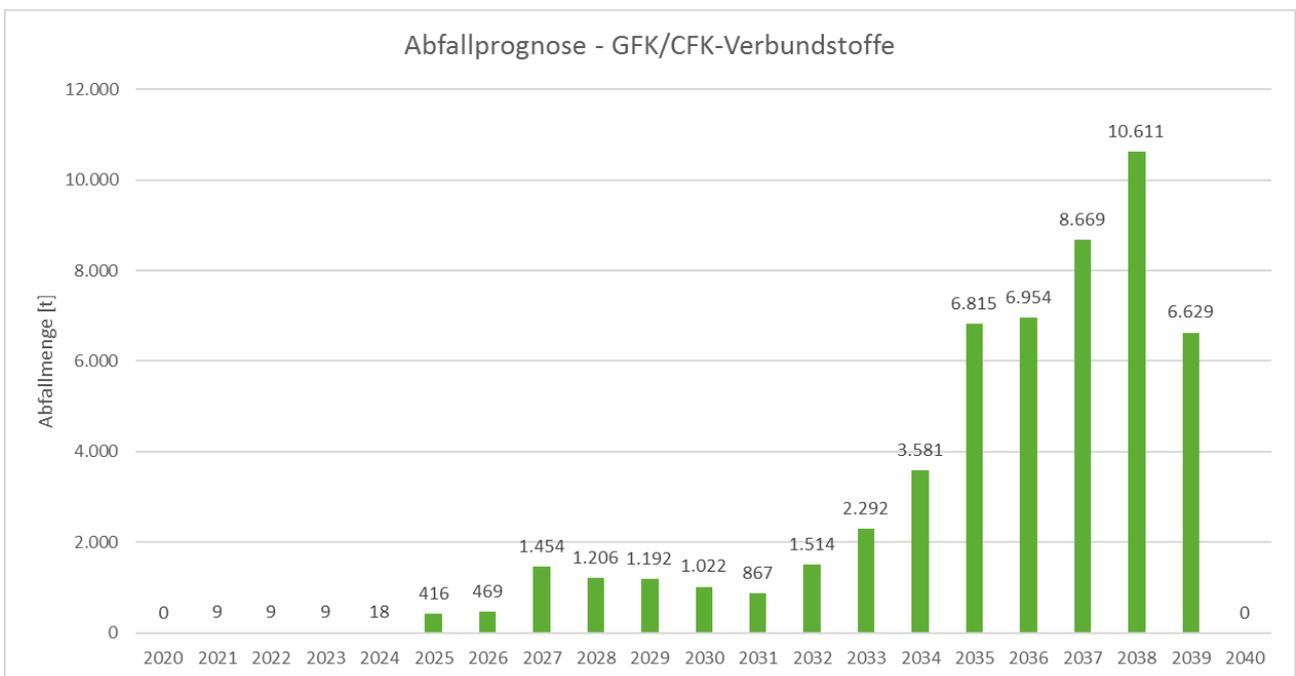
In den nachfolgenden Diagrammen werden die Mengenverläufe der einzelnen Stoffströme der Übersichtlichkeit wegen einzeln dargestellt.

Abbildung 26: Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus GFK (SZENARIO 2)



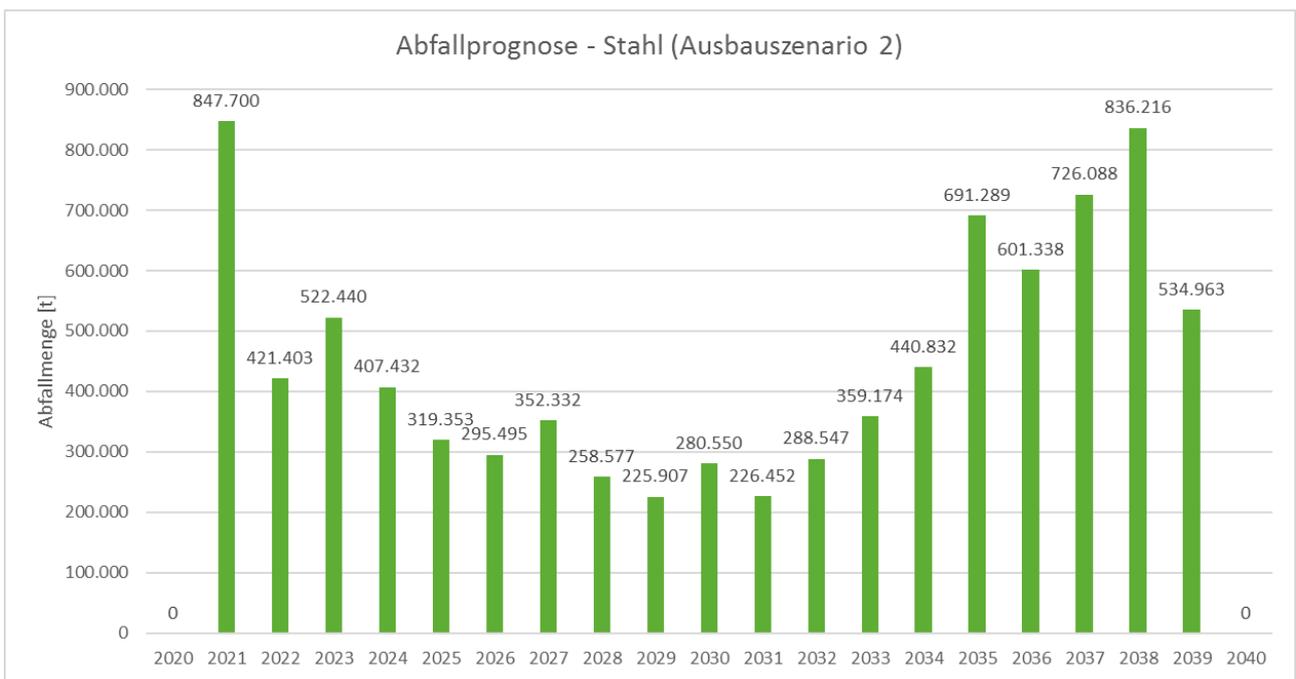
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 27: Abfallprognose – Verbundwerkstoffe aus CFK/GFK (SZENARIO 2)



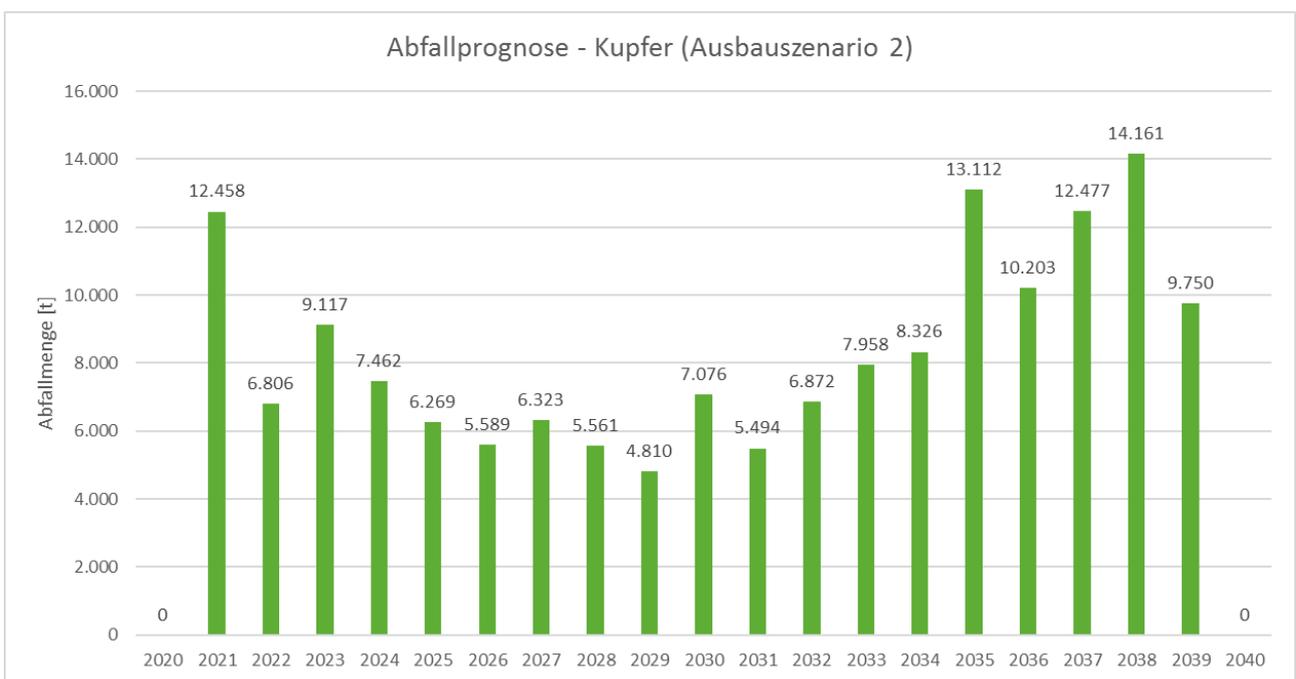
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 28: Abfallprognose – Stahl (SZENARIO 2)



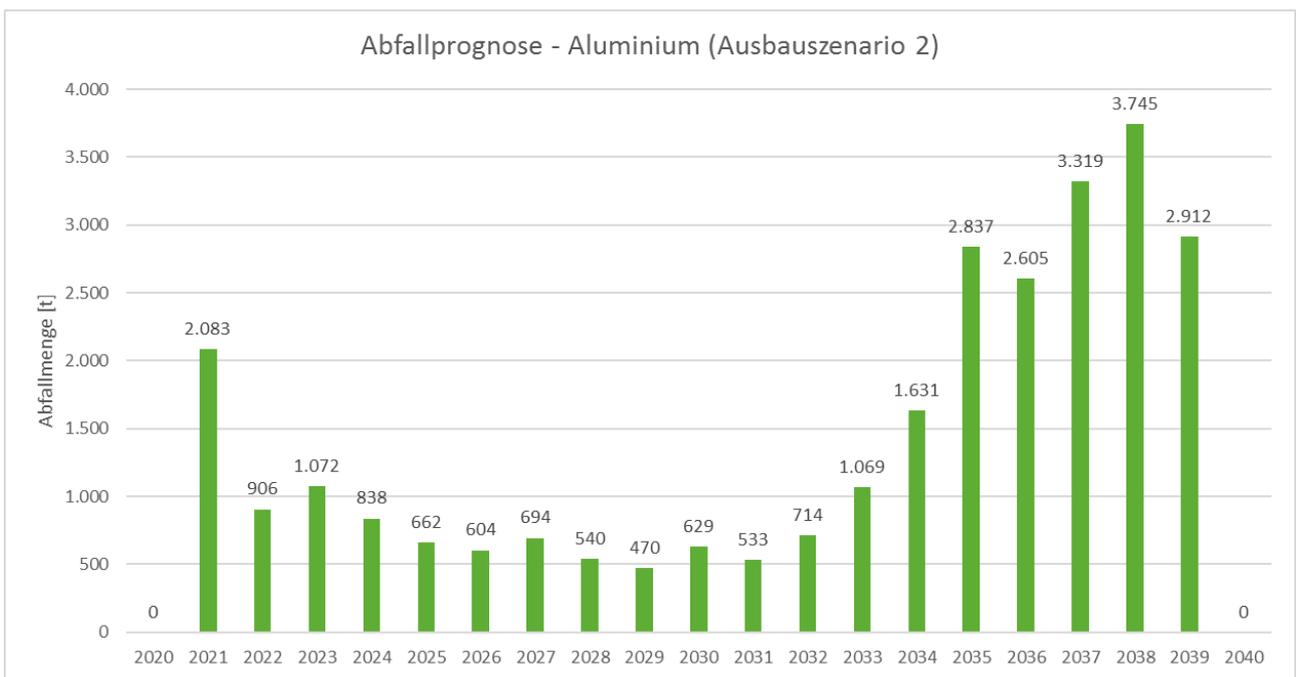
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 29: Abfallprognose – Kupfer (SZENARIO 2)



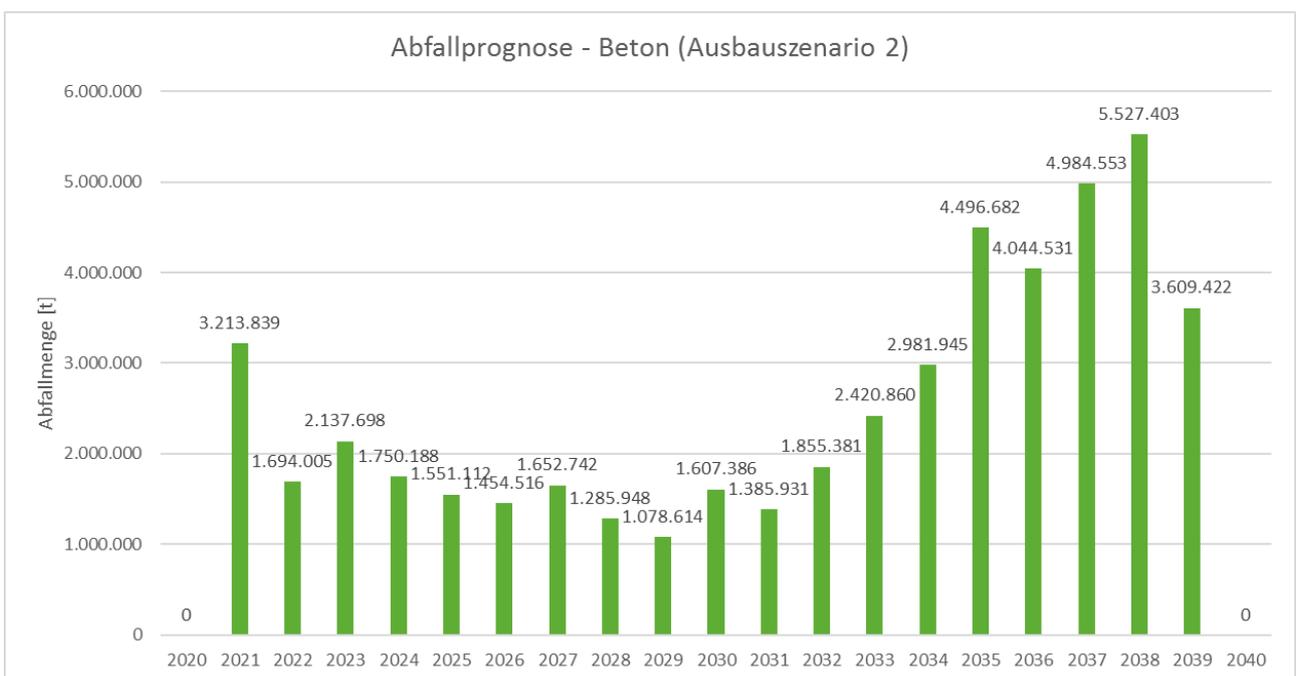
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 30: Abfallprognose – Aluminium (SZENARIO 2)



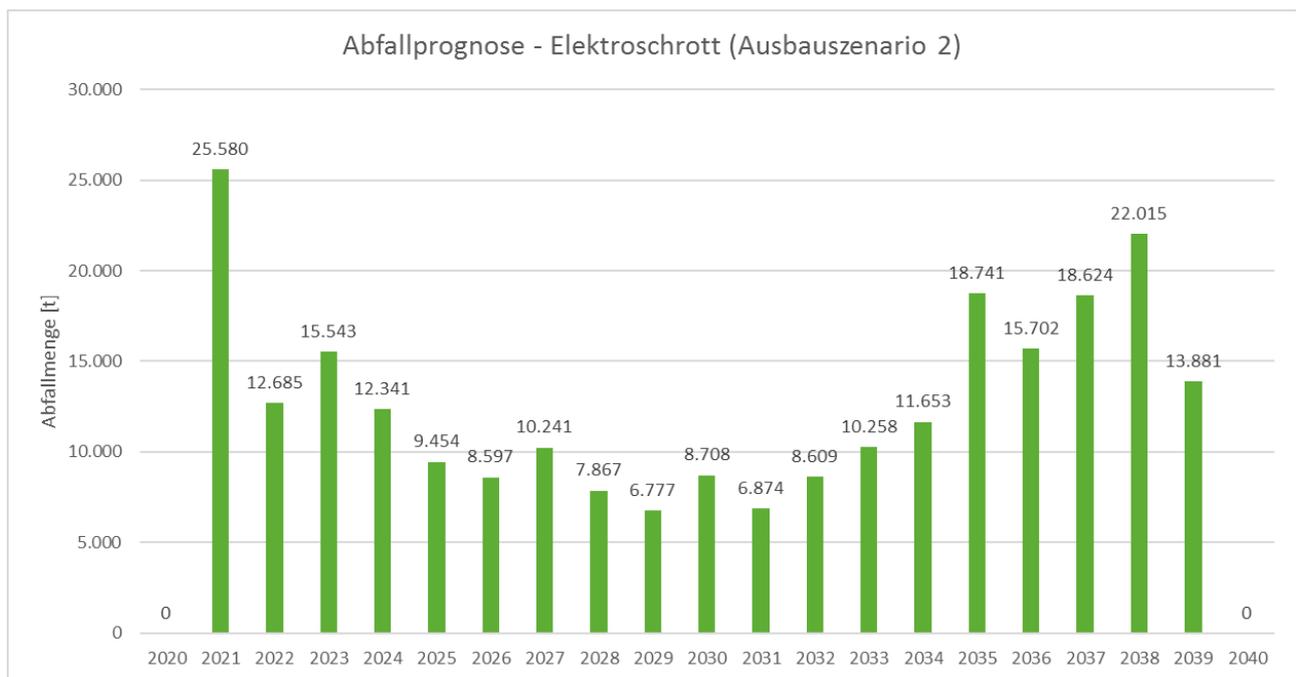
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 31: Abfallprognose – Beton (SZENARIO 2)



Quelle: (Ramboll)

Abbildung 32: Abfallprognose – Elektroschrott (SZENARIO 2)



Quelle: (Ramboll)

Gegenüber dem Ausbauszenario 1 ergeben sich für das SZENARIO 2 lediglich Abweichungen in den letzten beiden Jahren der Betrachtung.

3.3.1.3 Abfallprognose für Seltene Erden / Magnete

In den vorstehenden Abfallprognosen wurden Seltene Erden, wie sie in permanentmagnetisch erregten Generatoren eingesetzt werden, nicht gesondert berücksichtigt. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass Seltene Erden gegenüber den anderen eingesetzten Materialien nur eine mengenmäßig stark untergeordnete Rolle einnehmen. Nichtsdestoweniger handelt es sich bei Seltenen Erden um aus recyclingtechnischer Sicht höchst interessante Materialien, da derzeit in Deutschland keine hochwertigen Recyclingverfahren zur Verfügung stehen. Dieses aufbereitungstechnische Entwicklungspotential könnte auch vor dem Hintergrund der hohen Materialkosten für Seltene Erden und der mit der Gewinnung verbundenen ökologischen Auswirkungen in den Produktionsländern in Asien interessant sein.

Bei der Abschätzung von Abfällen von Seltenen Erden aus WEA ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass Seltene Erden bzw. Magnete nur in wenigen bestimmten Generatorkonzepten eingesetzt werden. So finden sich Magnete ausschließlich bei eigenerregten Direct-Drive Synchrongeneratoren (nachfolgend als „DD-PMSG“ bezeichnet), wie sie bspw. bei den neueren WEA-Modellen des Herstellers Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A., oder Vensys Energy AG eingesetzt werden, sowie bei Getriebe-WEA mit einem eigenerregten Synchrongenerator (nachfolgend als „PMSG“ bezeichnet). Das PMSG-Konzept wurde und wird von unterschiedlichen Herstellern, wie bspw. Vestas Wind Systems A/S, angewandt. Aufgrund einer starken Preisentwicklung für Seltene Erden, haben einige Hersteller für WEA der aktuellen und neuesten Generation jedoch wieder von dem „PMSG“ Konzept Abstand genommen und verwenden keine Magnete mehr in ihren Generatoren (Anm.: Vestas Wind Systems A/S nutzt jedoch Magnete zur Befestigung von Turmeinbauteilen, was nach eigenen Aussagen zu einer Reduzierung der Turm-Stahlmassen führt). Erschwerend kommt für eine Abfallprognose von Magneten / Seltenen Erden hinzu, dass z. T. auch innerhalb von gleichen WEA-Generationen das Generatorkonzept geändert wurde. So sind bspw. einzelne WEA des Herstellers Vestas Wind Systems A/S als „Grid-Streamer“ (mit „PMSG“) und als Variante ohne magnetisch-erregten Generatoren

verfügbar. Diese Unterteilung lässt sich auf unserer Datengrundlage, der „WP-Deutschland“ Datenbank, nicht nachbilden.

Ersatzweise kann jedoch auf eine Veröffentlichung des Fraunhofer IEE, zurückgegriffen werden. So können über die Homepage¹³ zum Forschungsvorhaben „Windmonitor“ die Nennleistungsanteile (bezogen auf die Neuerrichtungen) für verschiedenen Anlagenkonzepte ausgewertet werden. Für die Jahre 2020 bis 2030 werden die Nennleistungsanteile der Neuerrichtungen wie folgt für beide Generatorkonzepte abgeschätzt:

➤ **DD-PMSG**

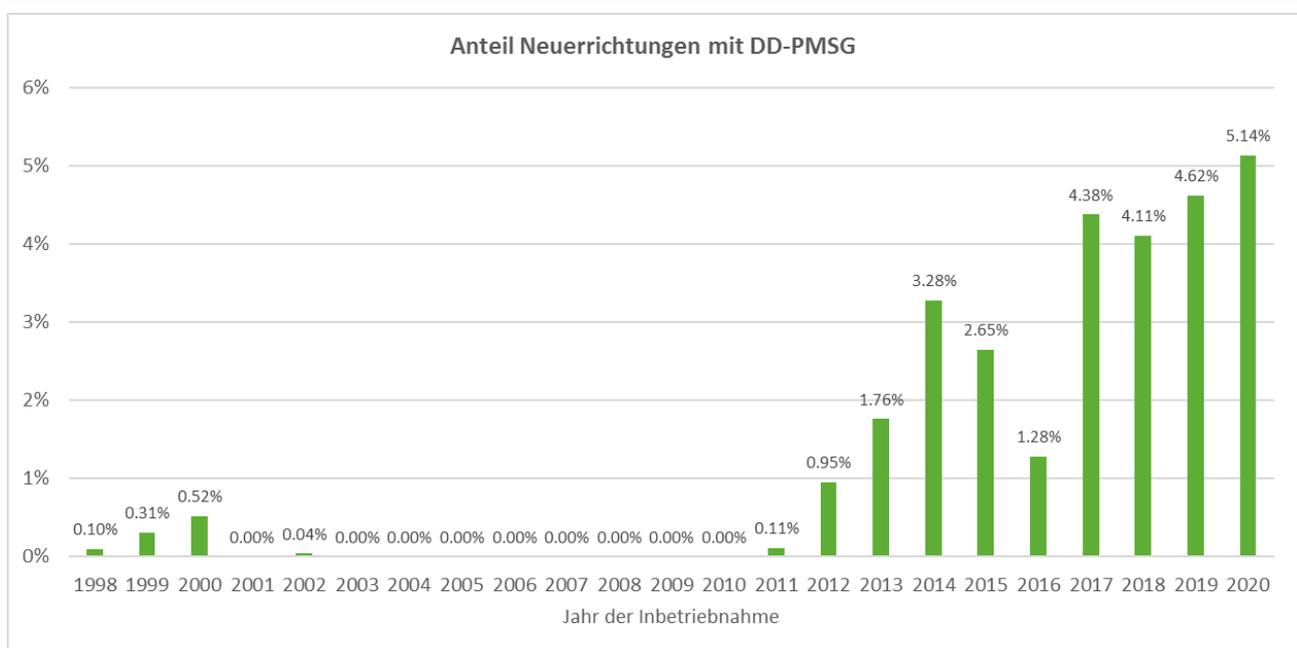
Für das „DD-PMSG“ Konzept erwarten wir eine Fortführung des linearen (leicht ansteigenden) Trends seit dem Aufkommen der Technologie im Jahr 2011 bis 2017.

➤ **PMSG**

Für das „PMSG“ Konzept erwarten wir für 2018 einen sehr ähnlichen Anteil wie bereits im Jahr 2017. Nachfolgend gehen wir in 2019 und 2020 von einem Rückgang der Marktanteile (bezogen auf die neu installierten Kapazitäten) auf zunächst 6 % (in 2019) und 4 % (in 2020) aus. Diesen Ansatz stützen wir maßgeblich auf die Entscheidung einiger Hersteller von dem Konzept Abstand zu nehmen, sodass das PMSG-Konzept in WEA-Typen der nächsten Generation deutlich seltener Anwendung findet.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die Nennleistungsanteile (bezogen auf die Neuinstallationen) für beide Generatorkonzepte dargestellt.

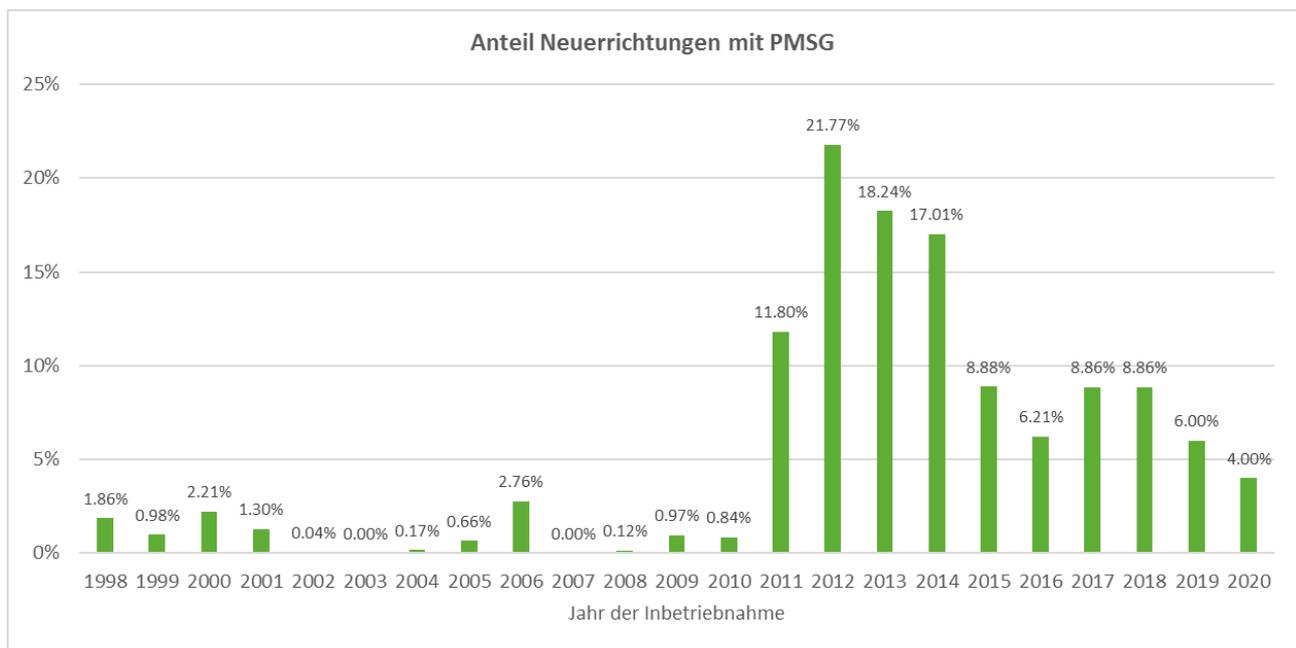
Abbildung 33: Prozentualer Anteil des “DD-PMSG” Generatorkonzepts bezogen auf die neu in Betrieb genommenen Kapazitäten gemäß Fraunhofer IEE (eigene Prognose für 2018 bis 2020)



Quelle: (Ramboll)

¹³ [http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3 Onshore/2 technik/3 antriebskonzepte/](http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/2_technik/3_antriebskonzepte/)

Abbildung 34: Prozentualer Anteil des „PMSG“ Generatorkonzepts bezogen auf die neu in Betrieb genommenen Kapazitäten gemäß Fraunhofer IEE (eigene Prognose für 2018 bis 2020)



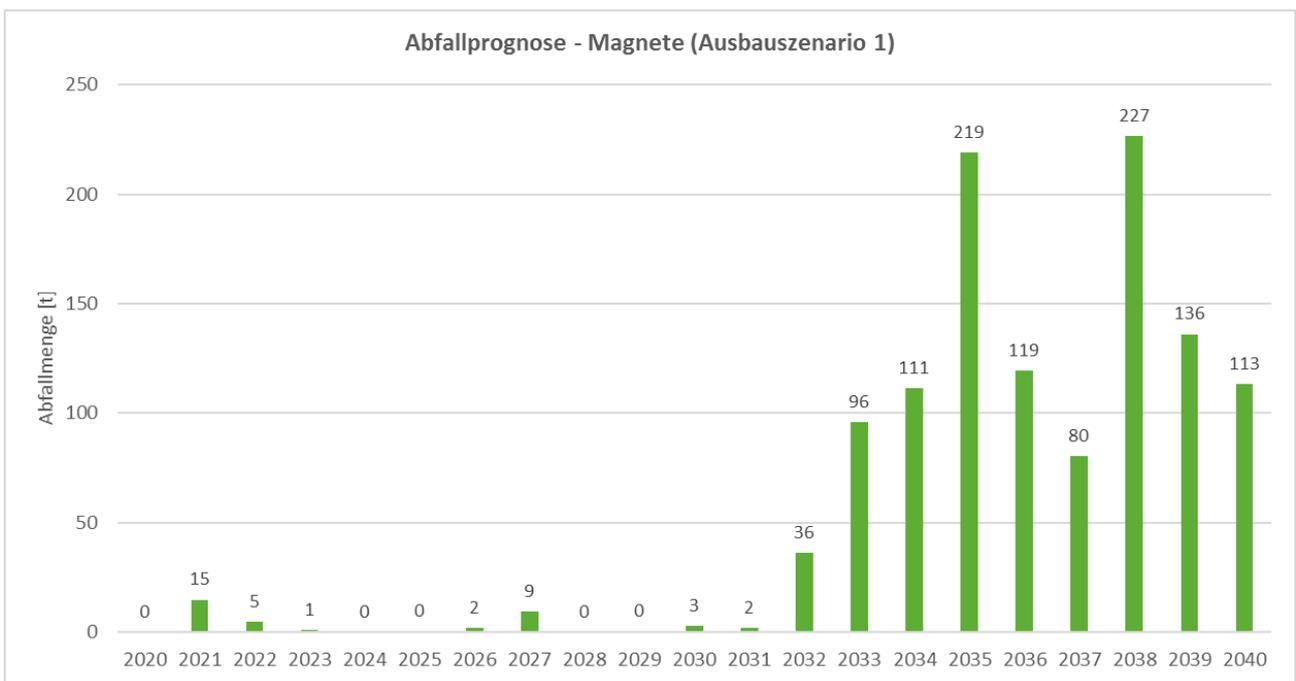
Quelle: (Ramboll)

In Kombination mit den historischen Zubauleistungen aus der „WP-Deutschland“ Datenbank und den beiden Ausbauprognose aus Kapitel 3.2 lassen sich aus den vorstehenden Leistungs-Anteilen die jährlich in Betrieb genommenen Installationsleistungen für die beiden Konzepte „DD-PMSG“ und „PMSG“ ermitteln.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Ansatzes zum spezifischen Einsatz von Magneten in Generatoren von 679,75 kg/MW für „DD-PMSG“ Anlagen aus (Pehlken 2012), sowie eines aus (LCA V80-2.0, LCA V90-2.0, LCA V90-3.0, LCA V112-3.0) gemittelten Ansatzes von 150 kg/MW für „PMSG“, der zudem auch in (DERA 2016) bestätigt wird, können die Magnetmengen der Neuinstallationen je Kalenderjahr abgeschätzt werden.

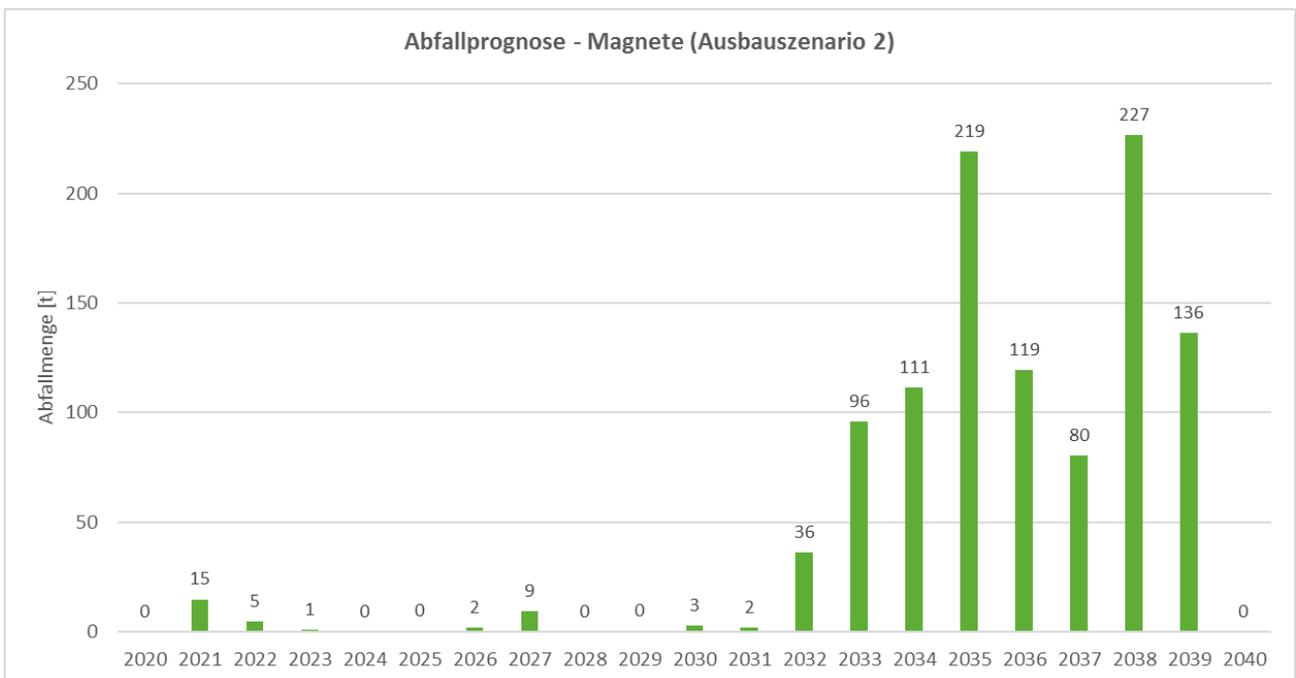
Unter Beachtung des jeweiligen Rückbauzeitpunktes bzw. der angenommenen Länge der Betriebsphase je WEA können die resultierenden Abfallströme für SEE-haltige Magnete wie folgt abgeschätzt werden:

Abbildung 35: Abfallprognose für SEE-haltige Magnete - SZENARIO 1



Quelle: (Ramboll)

Abbildung 36: Abfallprognose für SEE-haltige Magnete - SZENARIO 2



Quelle: (Ramboll)

3.3.2 Abfälle aus der Betriebsphase

Neben den Abfällen, welche beim Rückbau der WEA am Ende des Lebenszyklus (siehe vorheriges Kapitel) anfallen, können auch während des Betriebs bspw. aus Wartungs- oder Instandsetzungsarbeiten Abfälle entstehen. Diesbezüglich besteht eine Wartung üblicherweise aus der Abarbeitung von planmäßigen Aufgaben und Kontrollen der Funktionstüchtigkeit einzelner Komponenten (dies schließt insbesondere auch die Rotorblätter mit ein) und eine Instandsetzung aus

einer nicht vorweg planbaren Tätigkeit, die das Ziel verfolgt, defekte bzw. beschädigte Komponenten wieder in den ordnungsgemäßen Zustand zu überführen.

Hierbei kann grundsätzlich unterscheiden werden zwischen Betriebsmitteln, welche regelmäßig ausgetauscht werden müssen, und gelegentlich auszutauschenden Bauteilen.

Aufgrund von hohen Unsicherheiten bzgl. der Findung eines geeigneten Ansatzes zur Abschätzung solcher Abfallmengen, erfolgt in diesem Kapitel keine gesonderte Bilanzierung der möglichen Abfälle aus der Betriebsphase. Stattdessen werden die möglicherweise resultierenden Abfälle qualitativ beschrieben. Weiterhin erfolgte eine spezifische Befragung von insgesamt zwei Serviceunternehmen und einem WEA-Hersteller, aus der zumindest eine Indikation für die Abfallmengen gewonnen werden konnte, welche ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt wird.

Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass die Abfallmengen aus der Betriebsphase, denen aus der Rückbauphase, stark untergeordnet sind bzw. mengenmäßig erheblich geringer ausfallen.

3.3.2.1 Abfallmengen aus der regelmäßigen Wartung

Bezüglich der Betriebsmittel gibt es in der BImSchG-Antragsdokumentation üblicherweise auch Bilanzierungen für üblichen Abfallmengen. Diese umfassen in der Regel insbesondere Betriebsflüssigkeiten, aber auch andere Verbrauchsgüter wie bspw. Tücher. Insgesamt sind solche Bilanzierungen naturgemäß verallgemeinernd, da bspw. ein Getriebe-Ölwechsel bedarfsgerecht in der Regel auf der Grundlage von Analysen von Ölproben ausgeführt wird. Der Einsatz von Verbrauchs- und Betriebsmitteln hängt somit immer auch von den Beobachtungen und Ergebnissen einer Wartung ab, sodass auch die realen Material- und Abfallmengen aus der Wartung schwanken. Mit Bezug auf die Größenordnung und Materialmengen, welche während des Rückbaus anfallen, sind Abfallmengen aus der Wartung in jedem Fall vernachlässigbar.

Da die Wartung weiterhin häufig vom WEA Hersteller ausgeführt wird, der in der Regel auch für die fachgerechte Entsorgung zuständig ist, sind diese Abfallmengen zudem ggf. auch in speziellen Abfallbilanzen der Hersteller enthalten.

3.3.2.2 Abfallmengen aus Instandsetzungsmaßnahmen

Mit Bezug zu Abfällen aus Instandsetzungen (insbesondere an Großkomponenten) ist grundsätzlich neben der Kenntnis von konkreten Schadenshäufigkeiten, auch zu berücksichtigen, dass insbesondere ausgebaute größere Komponenten in den meisten Fällen nicht entsorgt, sondern wiederaufgearbeitet und anschließend in anderen Anlagen wiedereingesetzt werden können.

Rotorblätter

Für die Rotorblätter einer WEA, welche aus Sicht des Recyclings eine hohe Relevanz einnehmen, wurde im Zuge der Projektbearbeitung eine entsprechende Anfrage an ein Wartungsunternehmen gestellt, welches für den Bereich der Rotorblattinstandsetzung eine spezielle Fachabteilung unterhält. Ergebnis dieser Anfrage war die subjektive Einschätzung des befragten Experten, dass lediglich ein Bruchteil von Schäden (im Promillebereich) an Rotorblättern zu einer endgültigen Entsorgung führt. Überschlägig wurde bei einem geschätzten WEA-Bestand von 25.000 WEA bzw. 75.000 Rotorblättern ausgeführt, dass für ca. 10 dieser Blätter (pro Kalenderjahr) ein tatsächlich irreparabler Totalschaden vorliegt. Dies führt zu einer Schadensquote von 0,13 ‰ pro Jahr bzw. 2,67 ‰, wenn von einem Betriebszeitraum je WEA von 20 Jahren ausgegangen wird. Die Voraussetzung ist selbstverständlich, dass regelmäßig Wartungen und nötige Reparaturen durchgeführt werden.

Hierzu wurde ergänzend auch die Frage gestellt, wie häufig aufgrund des Schadens an einem einzelnen Blatt tatsächlich der gesamte Rotorblattsatz getauscht (bzw. entsorgt) werden muss, da kein passendes Blatt mit einem ähnlichen Gewicht gefunden wird. Hierzu wurde von dem angefragten

Experten zwar grundsätzlich angemerkt, dass dieser Fall eintreten kann, aus seiner Sicht jedoch ebenfalls eher selten ist. So lassen sich unterschiedliche Blattgewichte bis zu einem gewissen Grad gut ausgleichen, vollständig von der Hand zu weisen ist das beschriebene Problem jedoch nicht.

Zudem wurde auch erläutert, dass bei der Reparatur eines Rotorblattes lokal sehr geringe Abfallmengen an Rotorblattmaterial anfallen.

Zusammenfassend und auf Grundlage der vorstehenden Überlegungen halten wir einen Ansatz von jährlich 0,15 ‰ des Rotorblattgewichtes (aller in Betrieb befindlichen WEA) geeignet, um die zusätzlichen Abfallmengen an Rotorblattmaterialien aus der Betriebsphase abzuschätzen. Ob dieser Ansatz jedoch auch für neue Rotorblattgenerationen mit hohen CFK-Anteilen gilt, die teilweise als weniger gut reparabel beschrieben werden, kann derzeit nicht beantwortet werden.

Sonstige Komponenten

Für andere Komponenten ist die Einschätzung ähnlich. So werden insbesondere die größeren Komponenten aus dem Antriebsstrang in der Regel regelmäßig gewartet und müssen folglich zum überwiegenden Teil nicht entsorgt werden. Hierbei handelt es sich zudem um werthaltige Materialien (hauptsächlich Metalle) für die bereits gute Recyclingverfahren verfügbar sind und die einen positiven Marktwert haben.

Weiterhin machen die Komponenten, die üblicherweise während des Betriebs einer WEA durch ein Schaden ausfallen können, mengenmäßig nur einen geringen Anteil aus. Die mengenmäßig relevantesten Komponenten, insbesondere die Tragstrukturen (z. B. Turm, Fundament, Maschinenträger) sind im Normalfall nicht von größeren Schäden betroffen (Anm.: Das Vorkommen solcher Schäden würde in der Regel zu einem wirtschaftlichen Totalschaden führen). Die geringen Versicherungsprämien, die auch den Totalausfall einer WEA (bspw. aufgrund Ereignisse höherer Gewalt) absichern sind zudem ein Indikator für eine insgesamt sehr geringe Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses. Dies deckt sich im Übrigen auch mit unserer subjektiven Einschätzung.

Um diese subjektive Bewertung auch durch die Aussagen eines Experten zu validieren, wurde ein ergänzendes Interview mit einem Wartungsunternehmen durchgeführt. Hierbei wurde zunächst intensiv über Getriebeschäden besprochen, wobei am Beispiel einer 1,5 MW-Anlage argumentiert wurde. Grundsätzlich können die Gründe für Getriebeschäden sehr vielfältig sein. Je nach spezifischem Schaden, Zugänglichkeit und Machbarkeit wird üblicherweise zunächst bewertet, ob das Getriebe innerhalb der Gondel repariert werden kann. Hierbei fallen üblicherweise geringe Stahl-Abfallmengen (etwa in der Größenordnung von 150 kg, grundsätzlich jedoch schadensspezifisch) an. Falls eine Reparatur in der Gondel nicht möglich ist, muss das Getriebe mittels Krans entnommen und zu einem Fachbetrieb (häufig auch zum Getriebe-Hersteller) gebracht werden. Bei dem Fachbetrieb wird das Getriebe dann vollständig zerlegt und jedes Bauteil einzeln begutachtet. Schadhafte Bauteile werden nachfolgend ersetzt und fallen als Abfall an. Eine Quantifizierung dieser Abfallmengen war auf der Grundlage der Expertenbefragung nicht möglich.

Eine Abhängigkeit des tatsächlichen Fehlers zu resultierenden Abfallmenge ist auch bei Generatoren zu berücksichtigen. So sind in Generatoren oft Lagerschäden ein Problem, was zu Stahlabfällen führt. Eine andere große Schadensgruppenart bei Generatoren sind elektrische Kurzschlüsse, die häufig zu einem Austausch der Kupferwicklungen führen, wodurch entsprechend Kupfer-Abfälle anfallen. Auch hier war eine konkrete Einschätzung bezgl. der Materialmengen aus dem Generator nicht möglich.

Aus anderen kleineren Komponenten resultieren bei Schäden überwiegend metallische Abfallströme.

Subjektiv geschätzt gab der Experte zudem grob die Einschätzung ab, dass er bezogen auf einen Betrieb von 20 Jahren für eine 1,5 MW-WEA eine Abfallmenge (exkl. Rotorblätter) von 1,3 bis 2,6 t erwarten würde. Bezogen auf die Nennleistung einer WEA ergibt sich damit eine spezifische zusätzliche jährliche Abfallmenge von ca. 43 – 87 kg/MW. Diese Abfallmenge setzt sich überwiegend aus Metallen, hauptsächlich aus Stahl und auf Kupfer zusammen.

Analog zu Abfällen während der Wartungstätigkeit gilt auch für die Instandsetzung, dass für einen Großteil der WEA Verträge mit den WEA-Herstellern abgeschlossen sind, die üblicherweise auch die Entsorgung von ausgebauten Komponenten beinhalten. Abfallmengen aus ausgebauten und irreparablen Großkomponenten sind somit ggf. auch in den herstellereigenen Abfallbilanzen enthalten.

3.4 Prognose über Erlöse und Kosten anknüpfend an Status quo und Abfallprognose

Innerhalb dieses Kapitels werden auf Grundlage der zuvor erläuterten Parameter Schätzung der Rückbaukosten angestellt. Hierzu wurde ein Berechnungs-Tool auf Grundlage der Software MS-Excel erstellt, welches in Anlage bezüglich der Funktionen und Ansätze (Berücksichtigung von Vorbereitungsarbeiten, Demontage der WEA inkl. Turm, Demontage der Fundamente, Entsorgung der Materialien) erläutert wird.

Nachfolgend werden die mittleren Rückbaukosten für die einzelnen WEA- und Turm-Cluster berechnet. Hierbei wurden die Rückbaukosten jeweils für beide Clusterkategorien bestimmt, sodass die Gesamtkosten für den Rückbau einer WEA aus dem Cluster X bei Berücksichtigung des Turm-Clusters Y auf der Grundlage einer Matrix, die alle möglichen Kombinationen beinhaltet, erfolgt.

Da die tatsächlich verfügbaren Rücklagen für den Rückbau von WEA nicht recherchiert werden können (siehe Kapitel 2.2.3) wird ersatzweise ein Vergleich der Rückbaukosten mit den Ansätzen des Bundesverwaltungsgerichts bzw. mit den Regelungen des Landes Hessen zur Höhe der Rückbaubürgschaft verglichen.

3.4.1 Abschätzung der gebildeten Sicherheitsleistungen (Rückstellungen) für den Rückbau

Nach § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB soll die Baugenehmigungsbehörde unter den dort genannten Voraussetzungen „*durch Baulast oder in anderer Weise*“ die Einhaltung der Rückbauverpflichtung sicherstellen (siehe insofern ausführlich Kapitel 2). Dabei gehen wir als Ergebnis der Behördenbefragung davon aus, dass von Behörden auch bei Anlagen, die im Geltungsbereich eines Bebauungsplans (und damit außerhalb des direkten Anwendungsbereichs von § 35 BauGB) errichtet werden, grundsätzlich Sicherheiten zum Rückbau analog zu § 35 Abs. 5 BauGB eingefordert werden. Diese Annahme ist jedoch als optimistisch zu bewerten.

Die Einzelheiten für die Sicherstellung durch *Baulast* ergeben sich – soweit vorhanden – aus den jeweiligen Landesbauordnungen. Die Sicherstellung *auf andere Weise* kann eine Reihe verschiedener Gestaltungsmöglichkeiten umfassen, wie Nebenbestimmungen, privatrechtliche Vereinbarung, Eintragung einer Grunddienstbarkeit (1090 BGB), öffentlich-rechtlicher Vertrag (VGH Mannheim Urt. V. 31.03.2015 - 3 S 2016/14, BauR 2015, 1365). Welche Art der Leistung gewählt, steht grundsätzlich im Ermessen der zuständigen Behörde.

Ebenso ist es Ermessenssache der Behörden, wie die Höhe der zu erbringenden Sicherheit dabei berechnet wird. Die entsprechende Genehmigungspraxis der jeweiligen Bundesländer, teilweise auf der Basis von landesweiten Erlassen, geht hier weit auseinander. Beispielhaft:

- Teilweise wird zur Berechnung auf die Nabenhöhe der Anlage abgestellt. So bestimmt der (Hessen Erlass 2013) folgende Formel zur Berechnung:

$$\text{Nabenhöhe der Windenergieanlage (m)} \times 1000 = \text{Betrag der Sicherheitsleistung (€)}$$

- Eine andere Methode der Berechnung ist es, auf die installierte elektrische Leistung abzustellen. So wurden Kosten für den vollständigen Rückbau einer Windenergieanlage in Sachsen-Anhalt im Fall,

der der Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwGE 144, 342) zugrunde lag, auf der Basis von Hinweisen des Landesministeriums für Bau und Verkehr wie folgt kalkuliert

30 000 € pro Megawatt installierte elektrische Leistung

Hierzu bemerkte das BVerwG (a.a.O., Rdnr. 34):

Die Höhe der geforderten Sicherheit ist nicht unverhältnismäßig (...). Bundesrecht erlaubt eine Pauschalierung der Kosten. (...) [Der Betrag von zurzeit ca. 30 000 € pro Megawatt installierte elektrische Leistung] entspricht - wie das Oberverwaltungsgericht festgestellt hat - den von der Bundesregierung anlässlich der Beantwortung einer Kleinen Anfrage referierten Angaben des Bundesverbandes Windenergie, wonach die Kosten des Rückbaus von Windenergieanlagen zwischen 30 000 € bei kleinen Anlagen und 60 000 € bei Anlagen mit einer Größe von 2 Megawatt liegen (BTDrucks 15/1417 S. 2).

- Ein weiterer Ansatz ist es, auf die Herstellungs- beziehungsweise Investitionssumme abzustellen und davon einen pauschalen prozentualen Anteil als Rückbaukosten zu Grunde zu legen, in NRW etwa wird im Regelfall von einem Abschlag von 6,5 % ausgegangen (NRW Erlass 2015) wird.

Diese Herangehensweise kann teilweise dahingehend geöffnet werden, dass Einzelnachweise durch entsprechende Kostenvoranschläge oder Stellungnahmen des Herstellers erbracht werden (einschließlich einer möglichen Individualvereinbarung zwischen Hersteller und Betreiber, dass der Hersteller die Verantwortung für den Rückbau übernimmt), sofern dies für den Antragsteller günstiger ist.

Sehr unterschiedlich gehandhabt wird in der Praxis der Inflationsausgleich, dessen Berücksichtigung einerseits naheliegt, weil die Kosten des Rückbaus zu Gunsten der Behörden für einen Zeitpunkt abgesichert werden soll, der weit in der Zukunft liegt, dessen Bezifferung aber besondere prognostische Herausforderungen bereitet. Maslaton (2015) berichtet von Fällen, in denen sich die zu sichernden Kosten durch Veranschlagung eines Inflationsausgleichs von ursprünglich veranschlagten Rückbaukosten in Höhe von 40.000 € auf 70.000 € erhöht hätten.

Angesichts der sehr uneinheitlichen Verwaltungspraxis und der verschiedenen Sicherheitsleistungen und der verschiedenen angewandten Methoden der Berechnung haben wir uns im Rahmen der Kostenprognose dazu entschlossen, die beiden oben unter 1) HESSEN und 2) BVERWG, dargelegten Berechnungsmethoden pauschal anzuwenden, um hierbei eine Aussage über die Größenordnung der bestehenden Sicherheiten treffen zu können.

3.4.2 Kosten und Rückstellungen je Anlage zum Prognosezeitpunkt

Zur Prognose der Rückbau- und Entsorgungskosten werden jedem WEA- bzw. Turm-Cluster exklusiv Kosten zugeordnet (vgl. Tabelle 16). Kosten und Erlöse aus Rückbau bzw. Entsorgung werden in der Prognose saldiert, wobei Erlöse lediglich aus der Entsorgung von Metallen, gemäß deren absoluten Mengen in den jeweiligen Clustern (WEA und Turm), entstehen können (vgl. Abschnitte 3.1.1.2 und 3.1.1.3).

Tabelle 16: Entsorgungskosten und -erlöse der WEA- und Turm-Cluster

		CFK- Verb.	GFK- Verb.	Stahl	Beweh- rungs- stahl	Kupfer	Alumin- ium	Beton	Elektro- schrott	Flüssig- keit	SUM ENT- SORGU- NG
		€	€	€	€	€	€	€	€	€	€
WEA	Gear_01	0	3.234	-5.240	0	-1.491	-75	0	400	340	-2.833
	Gear_02	0	6.545	-10.626	0	-2.802	-141	0	630	510	-5.885

	CFK- Verb.	GFK- Verb.	Stahl	Beweh- rungs- stahl	Kupfer	Alumin- ium	Beton	Elektro- schrott	Flüssig- keit	SUM ENT- SORGU- NG
Gear_03	0	8.447	-14.128	0	-3.738	-189	0	750	590	-8.268
Gear_04	3.504	8.882	-15.728	0	-4.206	-212	0	940	730	-6.091
Gear_05	7.320	13.874	-23.524	0	-6.028	-304	0	1.090	840	-6.733
Gear_06	10.656	15.753	-25.400	0	-6.515	-329	0	1.430	1.080	-3.324
DD_01	0	8.255	-13.233	0	-1.763	-174	0	750	375	-5.790
DD_02	0	16.394	-20.416	0	-2.496	-246	0	1.310	750	-4.704
DD_03	0	1.997	-4.547	0	-4.800	-67	0	400	150	-6.867
DD_04	0	8.526	-17.385	0	- 18.400	-231	0	1.050	575	- 25.865
DD_05	0	23.280	-35.328	0	- 24.000	-3.473	0	1.310	750	- 37.461
DD_06	0	30.720	-47.541	0	- 33.600	-4.766	0	1.770	1.050	- 52.367
KWEA	0	1.241	-2.287	0	-680	-34	0	250	230	-1.280
Gitter_0 1	0	0	-4.660	0	0	0	2.858	0	0	-1.802
Gitter_0 2	0	0	-48.157	0	0	0	18.203	0	0	- 29.955
Hybrid_0 1	0	0	-20.314	- 10.127	0	-360	19.418	0	0	- 11.382
Hybrid_0 2	0	0	-30.476	- 13.771	0	-450	29.360	0	0	- 15.337
Hybrid_0 3	0	0	-45.818	- 16.418	0	-810	41.774	0	0	- 21.273
Stahl_01	0	0	-6.942	0	0	-180	2.860	0	0	-4.262
Stahl_02	0	0	-26.462	0	0	-270	5.839	0	0	- 20.893
Stahl_03	0	0	-44.490	0	0	-270	10.676	0	0	- 34.084
Stahl_04	0	0	-73.728	0	0	-450	17.687	0	0	- 56.491
Stahl_05	0	0	- 118.709	0	0	-810	33.756	0	0	- 85.762

Quelle: (Ramboll)

Während jedoch Entsorgungskosten bzw. -erlöse eindeutig den jeweilig verursachenden Clustern zugeordnet werden können, beziehen sich Rückbaukosten stets auf eine WEA- / Turm-Cluster Kombination. Zur Vereinfachung werden die Kosten der Vorbereitung des Rückbaus exklusive den WEA zugeordnet, da hier erfahrungsgemäß der größere Arbeitsaufwand anfällt (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Kosten für die Vorbereitung des Rückbaus von WEA- und Turm-Cluster

		Baustellen- einrichtung	Personal	SUM VOR-BEREITUNG
		€	€	€
WE A	Gear_01	2.500	5.200	7.700

		Baustellen- einrichtung	Personal	SUM VOR-BEREITUNG
	Gear_02	2.500	5.200	7.700
	Gear_03	2.500	5.200	7.700
	Gear_04	2.500	5.200	7.700
	Gear_05	2.500	5.200	7.700
	Gear_06	2.500	5.200	7.700
	DD_01	2.500	5.200	7.700
	DD_02	2.500	5.200	7.700
	DD_03	2.500	5.200	7.700
	DD_04	2.500	5.200	7.700
	DD_05	2.500	5.200	7.700
	DD_06	2.500	5.200	7.700
	KWEA	2.500	5.200	7.700
	TURM Cluster	Gitter_01		
Gitter_02				-
Hybrid_01				-
Hybrid_02				-
Hybrid_03				-
Stahl_01				-
Stahl_02				-
Stahl_03				-
Stahl_04				-
Stahl_05				-

Quelle: (Ramboll)

Die eigentlichen Rückbaukosten werden in der Prognose dagegen mit Ausnahme der direkt zuordenbaren Transportkosten den Turm-Clustern zugeordnet, da diese, wie z.B. Krankkosten (Anm.: Da die resultierenden Krankkosten auch von der Anzahl der rückzubauenden WEA eines Windparks abhängen, wurde je Cluster eine theoretische, mittlere Windparkgröße ermittelt und für die Krankkosten angewandt), maßgeblich von Höhe und Gewicht der Türme beeinflusst werden. Auch die Rückbau- und Entsorgungskosten der Fundamente sind in der Prognose exklusiv den Turm- Clustern zugeordnet (vgl. Tabelle 16). Da der Kostenbeitrag der Fundamente anders als die Krankkosten nicht von der Nabenhöhe, sondern der Gesamthöhe einer WEA abhängen, wurde zu deren Abschätzung der Mittelwert der Gesamthöhe innerhalb eines Turm-Clusters verwendet.

Tabelle 18: Rückbaukosten der WEA- und Turm-Cluster

	Abtransport (WEA oder Turm)	Aufnahme und Verladen Fundamente	Personal	Verrichtung Fundament	An-/Abfahrt Kran	Umsetzen Kran	Arbeitszeit Kran	Nebenkosten Kran	Verschlingung Kran	Sprengung Beton	Auffüllen Fundament Grube	SUM RÜCK- BAU
	€	€	€	€	€	€	€	€	€	€	€	€

WEA Cluster	Gear_01	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
	Gear_02	607	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	607
	Gear_03	802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	802
	Gear_04	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	900
	Gear_05	1.376	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.376
	Gear_06	1.527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.527
	DD_01	749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	749
	DD_02	1.232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.232
	DD_03	262	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	262
	DD_04	1.020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.020
	DD_05	2.156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.156
	DD_06	2.897	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.897
KWEA	128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	128	
TURM Cluster	Gitter_01	2.628	1.393	7.800	3.901	4.500	4.500	4.950	3.750	885	0	1.114	35.421
	Gitter_02	17.519	8.871	15.600	24.839	25.000	18.750	19.500	6.000	3.463	0	7.097	146.639
	Hybrid_01	17.803	6.118	10.400	17.131	12.000	9.000	9.000	6.000	1.800	30.000	4.895	124.147
	Hybrid_02	26.841	9.760	15.600	27.327	37.500	37.500	19.500	6.000	5.025	30.000	7.808	222.861
	Hybrid_03	38.160	14.935	20.800	41.819	37.500	37.500	26.000	6.000	5.350	30.000	11.948	270.013
	Stahl_01	2.728	1.394	7.800	3.903	3.000	2.250	4.950	3.750	698	0	1.115	31.587
	Stahl_02	6.090	2.845	10.400	7.967	5.333	4.000	9.000	3.750	1.104	0	2.276	52.767
	Stahl_03	10.968	5.203	10.400	14.568	17.000	17.000	9.000	6.000	2.450	0	4.162	96.752
	Stahl_04	18.172	8.620	15.600	24.136	37.500	37.500	19.500	6.000	5.025	0	6.896	178.948
	Stahl_05	33.746	16.451	20.800	46.064	37.500	37.500	26.000	6.000	5.350	0	13.161	242.572

Quelle: (Ramboll)

Die Ermittlung der Rückbau- und Entsorgungskosten erfolgt dann für jede vorkommende WEA-/Turm-Cluster Kombination durch Addition der exklusiv den WEA bzw. den Turm Clustern zugerechneten Kosten- bzw. Erlösbestandteilen (vgl. Tabelle 19 und Tabelle 20). Der gewählte Ansatz liefert für jede Kombination bzw. jede Anlage aus einem Cluster einen Schätzwert der tatsächlichen anfallenden Rückbau- und Entsorgungskosten zum Prognosezeitpunkt (2018).

Den ermittelten Rückbau- und Entsorgungskosten werden die nach den Modellen aus Hessen bzw. dem BVerwG ermittelten Sicherheitsleistungen bzw. Rückstellungen gegenübergestellt. Ähnlich der Kostenabbildung werden auch die Rückstellungen entweder exklusiv den WEA-Clustern oder den

Turm-Clustern zugeordnet. Da die Rückstellungen nach dem Modell aus Hessen auf Grundlage der Nabenhöhe einer Anlage berechnet werden und diese annähernd der Höhe ihres jeweiligen Turms entspricht, sind diese Rückstellungen den Turm Clustern zugeordnet. In dem Modell des BVerwG wird dagegen die Leistung einer Anlage als Berechnungsgrundlage verwendet, die von dem gewählten Anlagentyp bestimmt wird. Die Rückstellungen nach diesem Modell sind den WEA-Clustern zugeordnet. Im Gegensatz zu den Rückbau- und Entsorgungskosten sind die nach den Modellen berechneten Rückstellungen nicht zu addieren, sondern gelten stets einzeln für eine WEA-/ Turm-Cluster Kombination. Der Vergleich beider Modelle erlaubt Indikationen für eventuell bestehende Finanzierungslücken. Diese sind immer dann zu unterstellen, wenn die prognostizierten Rückbau- und Entsorgungskosten (inklusive saldierten Erlösen) die Rückstellungen nach einem dieser beiden Modelle übersteigen.

Anzumerken ist, dass der Betrachtungsgegenstand dieser Auswertung, jeweils eine durch die Cluster Kombination angenäherte Anlage zum Prognosezeitpunkt darstellt. Eine Betrachtung des Gesamtbestands im Zeitverlauf der Prognose liefert Abschnitt 3.4.3.

Ein Vergleich der Anteile, die WEA und Türme zu den gesamten Rückbau- und Entsorgungskosten beitragen, zeigt, dass auf WEA stets der geringe Kostenanteil entfällt (vgl. Tabelle 19 und Tabelle 20). Ein Grund für den geringen Anteil der WEA an den entstehenden Kosten liegt in dem gewählten Ansatz, da die Rückbaukosten der Kombinationen sowie die Rückbau- und Entsorgungskosten der Fundamente fast vollständig den Turm-Clustern zugeordnet werden. Zusätzlich enthalten die WEA einen hohen Bestandteil an Metallen, deren Erlöse die entstehenden Kosten, beispielsweise aus der Entsorgung der GFK- bzw. teilweise auch CFK-haltigen Rotorblätter kompensiert bzw. bei den Clustern DD_04 bis DD_06 sogar überkompensieren (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 19: Rückbau- / Entsorgungskosten gegen Rückstellungen nach Modell Hessen und BVerwG (TURM Cluster Gitter und Hybrid) ¹⁴

			Gitter_01	Gitter_02	Hybrid_01	Hybrid_02	Hybrid_03
KOSTEN			33.619,16 €	116.684,53 €	112.764,38 €	207.524,22 €	248.739,99 €
RS HESSEN			32.100,00 €	119.119,05 €	98.932,06 €	119.213,28 €	140.413,67 €
RS BVerG			- €	- €	- €	- €	- €
Gear_01	KOSTEN	5.167,14 €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	19.643,91 €	- €	- €	- €	- €	- €
Gear_02	KOSTEN	2.422,14 €	36.041,29 €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	32.100,00 €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	37.245,83 €	37.245,83 €	- €	- €	- €	- €
Gear_03	KOSTEN	234,04 €	- €	116.918,57 €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	119.119,05 €	- €	- €	- €
	RS BVerG	50.766,24 €	- €	50.766,24 €	- €	- €	- €
Gear_04	KOSTEN	2.509,26 €	- €	119.193,79 €	- €	210.033,48 €	251.249,25 €
	RS HESSEN	- €	- €	119.119,05 €	- €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	66.493,33 €	- €	66.493,33 €	- €	66.493,33 €	66.493,33 €
Gear_05	KOSTEN	2.343,64 €	- €	- €	- €	209.867,86 €	251.083,63 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	87.241,08 €	- €	- €	- €	87.241,08 €	87.241,08 €
Gear_06	KOSTEN	5.903,11 €	- €	- €	- €	213.427,33 €	254.643,10 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	99.561,35 €	- €	- €	- €	99.561,35 €	99.561,35 €
DD_01	KOSTEN	2.659,28 €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	53.901,64 €	- €	- €	- €	- €	- €
DD_02	KOSTEN	4.228,15 €	- €	- €	- €	- €	252.968,14 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	- €	140.413,67 €
	RS BVerG	85.104,84 €	- €	- €	- €	- €	85.104,84 €
DD_03	KOSTEN	1.094,45 €	- €	- €	113.858,83 €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	98.932,06 €	- €	- €
	RS BVerG	19.209,71 €	- €	- €	19.209,71 €	- €	- €
DD_04	KOSTEN	17.145,35 €	- €	- €	95.619,03 €	190.378,87 €	231.594,64 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	98.932,06 €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	61.373,50 €	- €	- €	61.373,50 €	61.373,50 €	61.373,50 €
DD_05	KOSTEN	27.604,73 €	- €	- €	85.159,64 €	179.919,49 €	221.135,26 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	98.932,06 €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	86.964,27 €	- €	- €	86.964,27 €	86.964,27 €	86.964,27 €
DD_06	KOSTEN	41.769,93 €	- €	- €	70.994,44 €	165.754,29 €	206.970,06 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	98.932,06 €	119.213,28 €	140.413,67 €
	RS BVerG	165.870,97 €	- €	- €	165.870,97 €	165.870,97 €	165.870,97 €
KWEA	KOSTEN	6.547,64 €	40.166,79 €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	32.100,00 €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	5.640,52 €	5.640,52 €	- €	- €	- €	- €

Quelle: (Ramboll)

14 Rote Hervorhebung bei Kostenüberhang gegenüber beiden Modellen, gelbe Hervorhebung bei Kostenüberhang gegen einem der beiden Modelle

Tabelle 20: Rückbau- / Entsorgungskosten gegen Rückstellungen nach Modell Hessen und BVerwG (TURM Cluster Stahl)¹⁵

			Stahl_01	Stahl_02	Stahl_03	Stahl_04	Stahl_05
KOSTEN			27.325,45 €	31.873,50 €	62.667,65 €	122.457,06 €	156.809,25 €
RS HESSEN			34.552,09 €	62.765,14 €	88.082,24 €	110.879,36 €	140.232,61 €
RS BVerG			- €	- €	- €	- €	- €
Gear_01	KOSTEN	5.167,14 €	32.492,58 €	37.040,63 €	67.834,78 €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	34.552,09 €	62.765,14 €	88.082,24 €	- €	- €
	RS BVerG	19.643,91 €	19.643,91 €	19.643,91 €	19.643,91 €	- €	- €
Gear_02	KOSTEN	2.422,14 €	- €	34.295,63 €	65.089,78 €	124.879,19 €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	62.765,14 €	88.082,24 €	110.879,36 €	- €
	RS BVerG	37.245,83 €	- €	37.245,83 €	37.245,83 €	37.245,83 €	- €
Gear_03	KOSTEN	234,04 €	- €	32.107,53 €	62.901,68 €	122.691,09 €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	62.765,14 €	88.082,24 €	110.879,36 €	- €
	RS BVerG	50.766,24 €	- €	50.766,24 €	50.766,24 €	50.766,24 €	- €
Gear_04	KOSTEN	2.509,26 €	- €	34.382,76 €	65.176,91 €	124.966,32 €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	62.765,14 €	88.082,24 €	110.879,36 €	- €
	RS BVerG	66.493,33 €	- €	66.493,33 €	66.493,33 €	66.493,33 €	- €
Gear_05	KOSTEN	2.343,64 €	- €	- €	65.011,29 €	124.800,70 €	159.152,89 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	88.082,24 €	110.879,36 €	140.232,61 €
	RS BVerG	87.241,08 €	- €	- €	87.241,08 €	87.241,08 €	87.241,08 €
Gear_06	KOSTEN	5.903,11 €	- €	- €	68.570,76 €	128.360,17 €	162.712,36 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	88.082,24 €	110.879,36 €	140.232,61 €
	RS BVerG	99.561,35 €	- €	- €	99.561,35 €	99.561,35 €	99.561,35 €
DD_01	KOSTEN	2.659,28 €	- €	34.532,77 €	65.326,92 €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	62.765,14 €	88.082,24 €	- €	- €
	RS BVerG	53.901,64 €	- €	53.901,64 €	53.901,64 €	- €	- €
DD_02	KOSTEN	4.228,15 €	- €	- €	66.895,80 €	126.685,21 €	161.037,40 €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	88.082,24 €	110.879,36 €	140.232,61 €
	RS BVerG	85.104,84 €	- €	- €	85.104,84 €	85.104,84 €	85.104,84 €
DD_03	KOSTEN	1.094,45 €	28.419,90 €	32.967,95 €	63.762,10 €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	34.552,09 €	62.765,14 €	88.082,24 €	- €	- €
	RS BVerG	19.209,71 €	19.209,71 €	19.209,71 €	19.209,71 €	- €	- €
DD_04	KOSTEN	17.145,35 €	- €	14.728,15 €	45.522,30 €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	62.765,14 €	88.082,24 €	- €	- €
	RS BVerG	61.373,50 €	- €	61.373,50 €	61.373,50 €	- €	- €
DD_05	KOSTEN	27.604,73 €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	86.964,27 €	- €	- €	- €	- €	- €
DD_06	KOSTEN	41.769,93 €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	- €	- €	- €	- €	- €
	RS BVerG	165.870,97 €	- €	- €	- €	- €	- €
KWEA	KOSTEN	6.547,64 €	33.873,08 €	38.421,13 €	- €	- €	- €
	RS HESSEN	- €	34.552,09 €	62.765,14 €	- €	- €	- €
	RS BVerG	5.640,52 €	5.640,52 €	5.640,52 €	- €	- €	- €

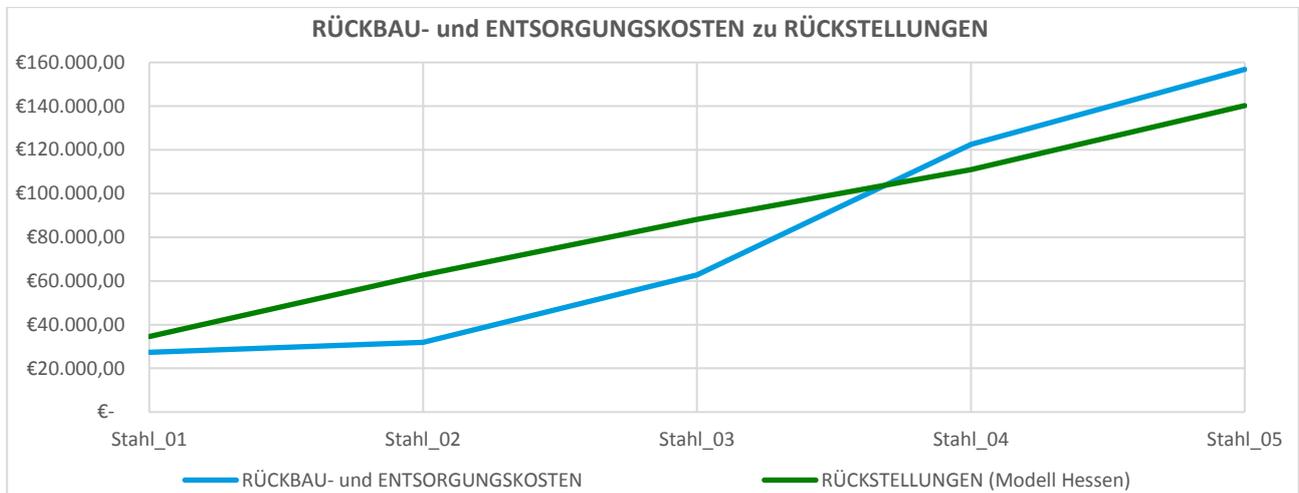
Quelle: (Ramboll)

Bei den Turm-Clustern ist festzuhalten, dass insbesondere die Rückbaukosten getrieben durch die erforderlichen Kräne sowie die abzutransportierenden Massen mit größeren Nabenhöhen ab 105 bis 110m stark ansteigen. Dieser Anstieg ist insbesondere bei den Clustern Stahl_04 und Stahl_05 sowie Hybrid_02 und Hybrid_03 wirksam (vgl. Tabelle 18), so dass die prognostizierten Rückbau- und Entsorgungskosten dieser Turm-Cluster, die den Türmen zugeordneten Rückstellungen des Modells HESSEN übersteigen. Die Rückstellungen steigen gleichförmig linear mit der Turmhöhe, die Kosten entwickeln sich überproportional. Während bei kleineren Stahltürmen diese Rückstellungen die

¹⁵ Rote Hervorhebung bei Kostenüberhang gegenüber beiden Modellen, gelbe Hervorhebung bei Kostenüberhang gegen einem der beiden Modelle

Rückbau- und Entsorgungskosten in sämtlichen vorkommenden WEA-/ Turm-Cluster Kombinationen mindestens decken (vgl. Tabelle 20) bestehen für Stahltürme der Cluster Stahl_04 und Stahl_05 potentiell Finanzierungslücken (vgl. Abbildung 37).

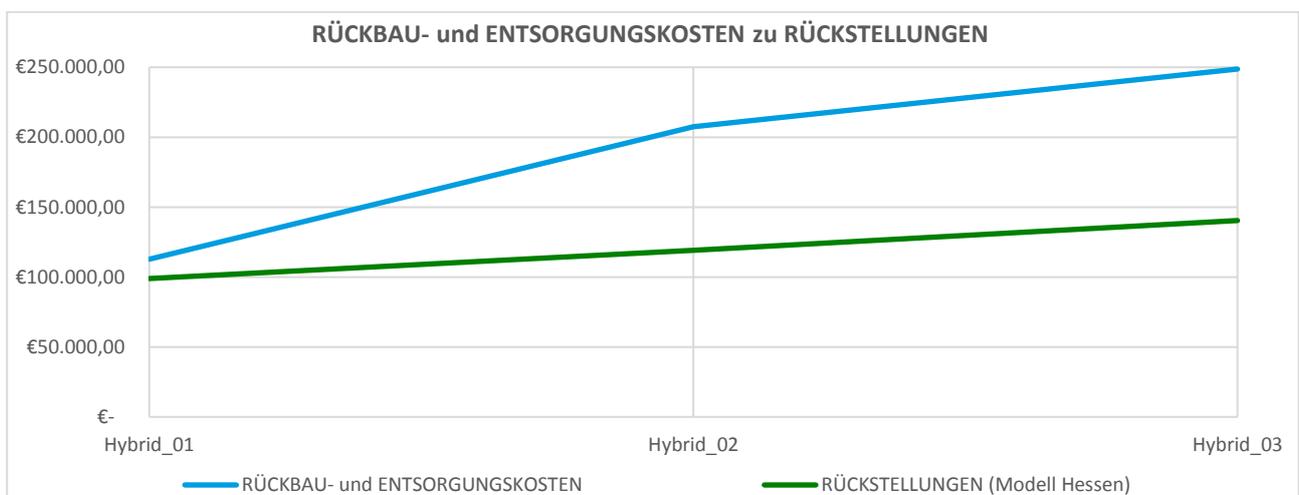
Abbildung 37: Vergleich von Rückbau- und Entsorgungskosten gegenüber Rückstellungen Stahl-Turm-Cluster



Quelle: (Ramboll)

Bei Hybrid-Türme wird dieser höhenabhängige Effekt durch zusätzliche Rückbaukosten (Sprengung) sowie geringere Erlöse aus der Entsorgung auf Grund ihrer geringeren Stahlanteile prinzipiell verstärkt, so dass die Rückbau- und Entsorgungskosten die Rückstellungen nach dem Modell Hessen bereits für kleiner Türme mit Nabenhöhen unter 110m leicht übersteigen. Durch den höhenabhängigen Anstieg der Rückbaukosten besteht bei größeren Türmen (Hybrid_02 und Hybrid_03) eine deutlich Finanzierungslücke (vgl. Abbildung 38), die auch durch den Erlösüberhang der Entsorgungskosten einiger WEA bzw. die höheren Rückstellungen nach dem Modell BVerwG (WEA Cluster DD_06) nicht mehr ausgeglichen werden kann (vgl. Tabelle 19).

Abbildung 38: Vergleich von Rückbau- und Entsorgungskosten gegenüber Rückstellungen Hybrid-Turm-Cluster



Quelle: (Ramboll)

3.4.3 Kosten und Rückstellung im Zeitverlauf

Ergänzend zu der Identifikation eventuell bestehender Finanzierungslücken bei einzelnen WEA- / Turm-Cluster-Kombinationen wird im Folgenden die Finanzierung des Rückbaus des Gesamtbestandes inklusive der nach den Marktprognosen bis einschließlich 2020 zu erwartenden Neuinstallationen gemäß den beiden Szenarien der Marktprognose analysiert (vgl. Abschnitt 3.2).

Aus IST-DATEN und Marktprognose werden Anzahl und kumulierte Leistung der ab 2021 jährlich zurückzubauenden Anlagen je Szenario für sämtliche WEA- und Turm-Cluster übernommen. Anzumerken ist, dass auf Grund der angenommenen Lebenszeit der Anlagen von 20 Jahren und einem Rückbau im 21. Jahr die unterschiedlichen Marktentwicklungen der Szenarien ab 2018 im Rückbau erst für 2039 und 2040 sichtbar werden. Auf Grundlagen der pro Cluster zurückgebauten WEA bzw. Türme werden Abfallmengen sowie Rückbau- und Entsorgungskosten (inklusive saldierter Erlöse) errechnet und zu Jahreswerten verdichtet. Für die in die Analyse der Rückbaukosten eingehenden ersten drei Jahre der Marktprognose werden für beide Szenarien ergänzend zu den WEA-Clustern als Betrachtungsgegenstand der Prognose in beiden Szenarien die Anteile der jeweiligen Turm-Cluster ermittelt. Da die in den ersten Jahren ausschließlich bereits in den IST-Daten vorkommende WEA-Cluster prognoserelevant sind, werden die Anteile der WEA- / Turm-Cluster Kombinationen und damit die Anzahl der zugebauten Türme pro WEA-Cluster aus den IST-Daten fortgeschrieben (vgl. Tabelle 21). So wird beispielsweise für die Analyse der Rückbau- und Entsorgungskosten unterstellt, dass 79,8% oder aufgerundet 318 WEA der in 2018 insgesamt zugebauten 398 WEA des Clusters DD_05 auf einem Turm des Clusters Hybrid_03 errichtet werden.

Tabelle 21: Anteil WEA-/ Turm-Cluster Kombinationen am Bestand (Ende 2017) ¹⁶

		Gitter_01	Gitter_02	Hybrid_01	Hybrid_02	Hybrid_03	Stahl_01	Stahl_02	Stahl_03	Stahl_04	Stahl_05	SUM
Gear_01	ABSOLUT	0	0	0	0	0	97	1777	589	0	0	2463
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,35%	6,48%	2,15%	0,00%	0,00%	9,0%
Gear_02	ABSOLUT	3	0	0	0	0	0	1588	317	10	0	1918
	ANTEIL	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,80%	1,16%	0,04%	0,00%	7,0%
Gear_03	ABSOLUT	0	66	0	0	0	0	991	2992	154	0	4203
	ANTEIL	0,00%	0,24%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	3,62%	10,92%	0,56%	0,00%	15,3%
Gear_04	ABSOLUT	0	18	0	94	59	0	3	1037	1444	0	2655
	ANTEIL	0,00%	0,07%	0,00%	0,34%	0,22%	0,00%	0,01%	3,78%	5,27%	0,00%	9,7%
Gear_05	ABSOLUT	0	0	0	61	1146	0	0	622	418	696	2943
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,22%	4,18%	0,00%	0,00%	2,27%	1,53%	2,54%	10,7%
Gear_06	ABSOLUT	0	0	0	131	101	0	0	5	34	381	652
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,48%	0,37%	0,00%	0,00%	0,02%	0,12%	1,39%	2,4%
DD_01	ABSOLUT	0	0	0	0	0	0	15	46	0	0	61
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,17%	0,00%	0,00%	0,2%
DD_02	ABSOLUT	0	0	0	0	51	0	0	82	23	30	186
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,19%	0,00%	0,00%	0,30%	0,08%	0,11%	0,7%
DD_03	ABSOLUT	0	0	32	0	0	73	1751	1079	0	0	2935
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,12%	0,00%	0,00%	0,27%	6,39%	3,94%	0,00%	0,00%	10,7%
DD_04	ABSOLUT	0	0	2915	534	967	0	1950	132	0	0	6498
	ANTEIL	0,00%	0,00%	10,64%	1,95%	3,53%	0,00%	7,12%	0,48%	0,00%	0,00%	23,7%
DD_05	ABSOLUT	0	0	368	13	1508	0	0	0	0	0	1889
	ANTEIL	0,00%	0,00%	1,34%	0,05%	5,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,9%
DD_06	ABSOLUT	0	0	1	17	75	0	0	0	0	0	93
	ANTEIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	0,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,3%
KWEA	ABSOLUT	17	0	0	0	0	741	129	0	0	0	887
	ANTEIL	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,70%	0,47%	0,00%	0,00%	0,00%	3,2%
SUM	ABSOLUT	20	84	3316	851	3907	911	8204	6909	2093	1107	27402
	ANTEIL TURM	0,1%	0,3%	12,1%	3,1%	14,3%	3,3%	29,9%	25,2%	7,6%	4,0%	1

Quelle: (Ramboll)

Für Kosten bzw. Erlöse wird eine Inflationsrate von 2% p.a. unterstellt, wobei 2018 das Basisjahr darstellt. Rückstellungen unterliegen in der Prognose keiner Inflation bzw. Verzinsung, da es sich bei diesen oftmals um nicht verzinsten Bankbürgschaften handelt. Zur Identifikation möglicher Finanzierungslücken sind den jährlichen Kosten die erwarteten Summen der Rückstellungen nach den

¹⁶ Anteile der TURM Cluster werden innerhalb der WEA Cluster relativ zum jeweiligen Cluster ausgewiesen

Modellen aus HESSEN bzw. vom BVerwG gegenübergestellt (vgl. Tabelle 22 bzw. Abbildung 39 für SZENARIO 1 und Tabelle 23 bzw. Abbildung 40 für SZENARIO 2).

Tabelle 22: Jahresweise kumulierte Abfallmengen, Kosten und Rückstellungen aus Anlagenbestand Deutschland (SZENARIO 1)¹⁷

PERIODE		RÜCKBAU		ABFALLMENGEN								KOSTEN		RÜCKSTELLUNGEN		
ANFANG	ENDE	Leistung	Anzahl	CFK-Verb.	GFK-Verb.	Stahl	Bewehrung	Kupfer	Aluminium	Beton	Elektroschr	Flüssigk.	INFLATION	SUMME GSAMT	SUMME Hessen	Summe BVerwG
		t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	m3	FAKTOR	€	€	€
01.01.2018	31.12.2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0000	-	-	-
01.01.2019	31.12.2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0200	-	-	-
01.01.2020	31.12.2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0404	-	-	-
01.01.2021	31.12.2021	3.952	5.333	9	50.868	842.941	4.760	12.458	2.083	3.213.839	25.580	1.786	1,0612	206.114.933	325.610.222	132.549.981
01.01.2022	31.12.2022	2.441	1.910	9	29.816	411.916	9.487	6.806	906	1.694.005	12.685	891	1,0824	102.378.636	143.506.662	75.832.952
01.01.2023	31.12.2023	3.027	2.185	9	36.800	510.200	12.239	9.117	1.072	2.137.698	15.543	1.059	1,1041	130.222.148	173.428.207	94.993.798
01.01.2024	31.12.2024	2.510	1.628	18	29.802	394.198	13.234	7.462	838	1.750.188	12.341	845	1,1262	109.437.135	133.653.391	76.710.135
01.01.2025	31.12.2025	1.942	1.151	416	22.355	302.444	16.909	6.269	662	1.551.112	9.454	632	1,1487	102.100.968	103.723.861	59.214.884
01.01.2026	31.12.2026	1.782	1.043	469	20.310	279.954	15.541	5.589	604	1.454.516	8.597	577	1,1717	101.015.652	94.774.769	54.118.963
01.01.2027	31.12.2027	2.197	1.195	1.454	23.812	337.216	15.117	6.323	694	1.652.742	10.241	693	1,1951	117.442.308	109.956.707	65.658.003
01.01.2028	31.12.2028	1.643	882	1.206	17.445	244.130	14.448	5.561	540	1.285.948	7.867	510	1,2190	91.912.769	81.493.392	49.690.126
01.01.2029	31.12.2029	1.430	733	1.192	15.040	215.273	10.634	4.810	470	1.078.614	6.777	439	1,2434	78.418.819	68.600.035	43.100.825
01.01.2030	31.12.2030	1.813	950	1.022	18.720	258.065	22.485	7.076	629	1.607.386	8.708	535	1,2682	113.867.960	91.612.244	53.923.239
01.01.2031	31.12.2031	1.485	752	867	14.888	205.520	20.932	5.494	533	1.385.931	6.874	424	1,2936	101.264.558	74.889.254	42.870.966
01.01.2032	31.12.2032	1.951	887	1.514	19.246	260.115	28.432	6.872	714	1.855.381	8.609	536	1,3195	139.018.299	92.808.881	54.430.686
01.01.2033	31.12.2033	2.443	1.010	2.292	25.360	321.139	38.035	7.958	1.069	2.420.860	10.258	654	1,3459	187.372.156	111.925.448	67.594.782
01.01.2034	31.12.2034	2.820	1.108	3.581	33.953	396.283	44.549	8.326	1.631	2.981.945	11.653	763	1,3728	236.768.199	129.020.244	79.853.754
01.01.2035	31.12.2035	4.525	1.704	6.815	59.018	625.739	65.550	13.112	2.837	4.496.682	18.741	1.239	1,4002	362.120.555	195.847.068	131.391.491
01.01.2036	31.12.2036	3.795	1.404	6.954	52.144	540.990	60.348	10.203	2.605	4.044.531	15.702	1.064	1,4282	336.873.838	168.859.125	112.555.367
01.01.2037	31.12.2037	4.455	1.577	8.669	63.128	651.852	74.237	12.477	3.319	4.984.553	18.624	1.261	1,4568	420.847.978	197.705.277	132.773.966
01.01.2038	31.12.2038	5.255	1.787	10.611	73.584	757.357	78.859	14.161	3.745	5.527.403	22.015	1.490	1,4859	478.093.522	222.616.076	157.163.410
01.01.2039	31.12.2039	3.322	1.053	6.533	51.766	484.902	54.459	10.279	3.091	3.650.641	14.229	954	1,5157	323.629.238	138.805.208	103.941.812
01.01.2040	31.12.2040	2.803	836	5.709	41.990	398.074	41.475	8.253	2.438	2.891.676	11.740	797	1,5460	261.790.763	110.501.804	90.506.007

Quelle: (Ramboll)

Tabelle 23: Jahresweise kumulierte Abfallmengen, Kosten und Rückstellungen aus Anlagenbestand Deutschland (SZENARIO 2)¹⁷

PERIODE		RÜCKBAU		ABFALLMENGEN								KOSTEN		RÜCKSTELLUNGEN		
ANFANG	ENDE	Leistung	Anzahl	CFK-Verb.	GFK-Verb.	Stahl	Bewehrung	Kupfer	Aluminium	Beton	Elektroschr	Flüssigk.	INFLATION	SUMME GSAMT	SUMME Hessen	Summe BVerwG
		t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	m3	FAKTOR	€	€	€
01.01.2018	31.12.2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0000	-	-	-
01.01.2019	31.12.2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0200	-	-	-
01.01.2020	31.12.2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0404	-	-	-
01.01.2021	31.12.2021	3.952	5.333	9	50.868	842.941	4.760	12.458	2.083	3.213.839	25.580	1.786	1,0612	206.114.933	325.610.222	132.549.981
01.01.2022	31.12.2022	2.441	1.910	9	29.816	411.916	9.487	6.806	906	1.694.005	12.685	891	1,0824	102.378.636	143.506.662	75.832.952
01.01.2023	31.12.2023	3.027	2.185	9	36.800	510.200	12.239	9.117	1.072	2.137.698	15.543	1.059	1,1041	130.222.148	173.428.207	94.993.798
01.01.2024	31.12.2024	2.510	1.628	18	29.802	394.198	13.234	7.462	838	1.750.188	12.341	845	1,1262	109.437.135	133.653.391	76.710.135
01.01.2025	31.12.2025	1.942	1.151	416	22.355	302.444	16.909	6.269	662	1.551.112	9.454	632	1,1487	102.100.968	103.723.861	59.214.884
01.01.2026	31.12.2026	1.782	1.043	469	20.310	279.954	15.541	5.589	604	1.454.516	8.597	577	1,1717	101.015.652	94.774.769	54.118.963
01.01.2027	31.12.2027	2.197	1.195	1.454	23.812	337.216	15.117	6.323	694	1.652.742	10.241	693	1,1951	117.442.308	109.956.707	65.658.003
01.01.2028	31.12.2028	1.643	882	1.206	17.445	244.130	14.448	5.561	540	1.285.948	7.867	510	1,2190	91.912.769	81.493.392	49.690.126
01.01.2029	31.12.2029	1.430	733	1.192	15.040	215.273	10.634	4.810	470	1.078.614	6.777	439	1,2434	78.418.819	68.600.035	43.100.825
01.01.2030	31.12.2030	1.813	950	1.022	18.720	258.065	22.485	7.076	629	1.607.386	8.708	535	1,2682	113.867.960	91.612.244	53.923.239
01.01.2031	31.12.2031	1.485	752	867	14.888	205.520	20.932	5.494	533	1.385.931	6.874	424	1,2936	101.264.558	74.889.254	42.870.966
01.01.2032	31.12.2032	1.951	887	1.514	19.246	260.115	28.432	6.872	714	1.855.381	8.609	536	1,3195	139.018.299	92.808.881	54.430.686
01.01.2033	31.12.2033	2.443	1.010	2.292	25.360	321.139	38.035	7.958	1.069	2.420.860	10.258	654	1,3459	187.372.156	111.925.448	67.594.782
01.01.2034	31.12.2034	2.820	1.108	3.581	33.953	396.283	44.549	8.326	1.631	2.981.945	11.653	763	1,3728	236.768.199	129.020.244	79.853.754
01.01.2035	31.12.2035	4.525	1.704	6.815	59.018	625.739	65.550	13.112	2.837	4.496.682	18.741	1.239	1,4002	362.120.555	195.847.068	131.391.491
01.01.2036	31.12.2036	3.795	1.404	6.954	52.144	540.990	60.348	10.203	2.605	4.044.531	15.702	1.064	1,4282	336.873.838	168.859.125	112.555.367
01.01.2037	31.12.2037	4.455	1.577	8.669	63.128	651.852	74.237	12.477	3.319	4.984.553	18.624	1.261	1,4568	420.847.978	197.705.277	132.773.966
01.01.2038	31.12.2038	5.255	1.787	10.611	73.584	757.357	78.859	14.161	3.745	5.527.403	22.015	1.490	1,4859	478.093.522	222.616.076	157.163.410
01.01.2039	31.12.2039	3.324	1.067	6.629	50.569	481.390	53.573	9.750	2.912	3.609.422	13.881	943	1,5157	320.746.837	138.937.778	104.431.155
01.01.2040	31.12.2040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5460	-	-	-

Quelle: (Ramboll)

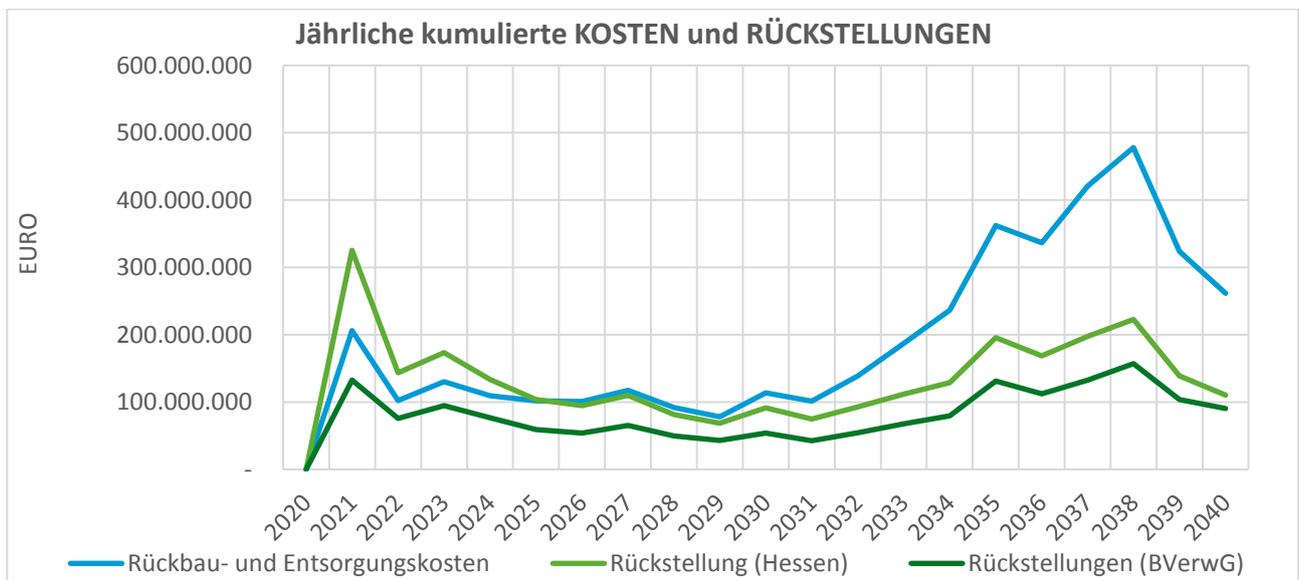
In 2021, dem ersten Jahr des erwarteten Rückbaus von EEG Anlagen, werden gemessen an ihrer Anzahl die meisten Anlagen im Prognosezeitraum zurückgebaut werden, da hier neben den in 2000 errichteten WEA, einmalig auch alle 2000 rückwirkend ins EEG aufgenommenen Anlagen sowie viele WEA aus dem Cluster KWEA zum Rückbau anstehen. Dieser Einmaleffekt zeigt sich, im Vergleich zu folgenden Jahren, an deutlich erhöhten kumulierten Rückbau- und Entsorgungskosten sowie an den ebenfalls erhöhten Rückstellungen nach dem Modell Hessen (vgl. Abbildung 39 und Abbildung 40).

In den folgenden Jahren bis 2031 schwanken die erwarteten Rückbaukosten um einen Wert von ca. 100 Mio. Euro. Ab 2031 ist bis 2038 ein starker Anstieg der Rückbau- und Entsorgungskosten zu erwarten, der insbesondere durch die ab 2011 errichteten und ab 2031 zum Rückbau anstehenden

¹⁷ Rote Hervorhebung bei Kostenüberhang gegenüber beiden Modellen, gelbe Hervorhebung bei Kostenüberhang einem der beiden Modelle

höheren Türme der Turm-Cluster (Stahl_04, Stahl_05, Hybrid_02 und Hybrid_03) getrieben wird (vgl. Abschnitt 3.4.2). In 2039 und 2040, den einzigen von den Szenarien der Marktprognose beeinflussten Jahren, fallen die Rückbau- und Entsorgungskosten in beiden Szenarien korrespondierend mit den in beiden Szenarien ab 2018 rückläufigen Zubau stark ab. Da in SZENARIO 2 im Jahr 2019 rechnerisch der Zubau bei 0 Anlagen liegt, entstehen in diesem Szenario 2040 keine Rückbau- und Entsorgungskosten.

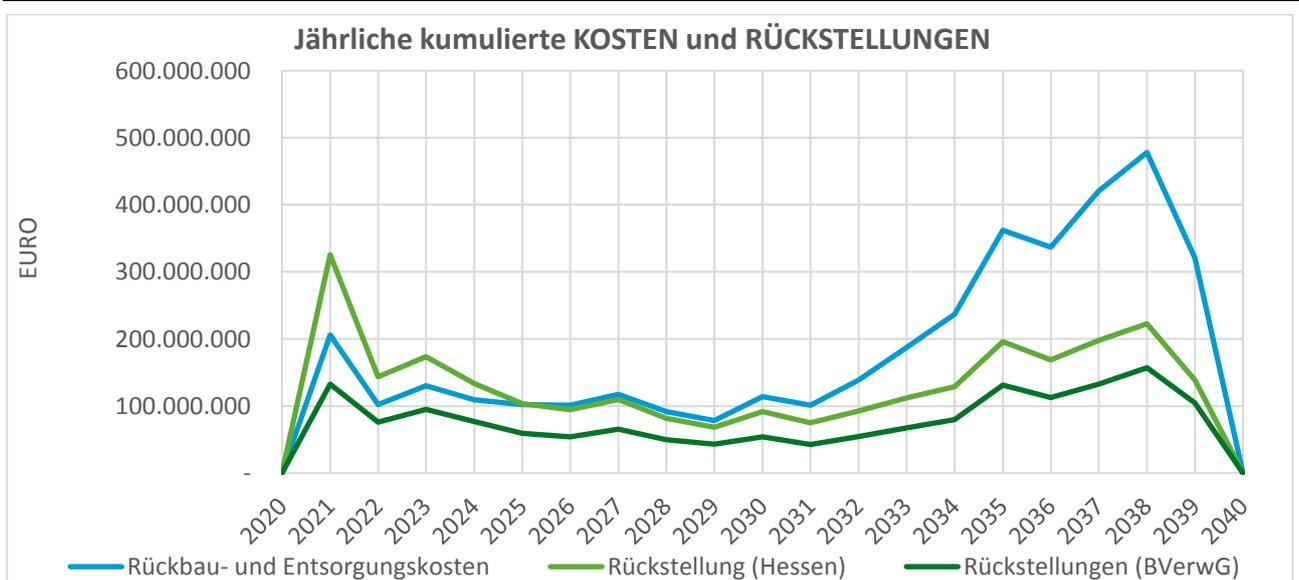
Abbildung 39: Jährlicher Vergleich Rückbau- und Entsorgungskosten zu Rückstellungen (SZENARIO 1)



Quelle: (Ramboll)

Ein Vergleich der Rückbau- und Entsorgungskosten mit den nach den unterschiedlichen Modellen abgeschätzten Rückstellungen zeigt, dass sollten die tatsächlichen Rückstellungen eher nach dem Modell HESSEN gebildet worden sein, diese insbesondere in den ersten Jahren des Rückbaus bis 2025 keine Finanzierungslücke entstehen lassen. Ab Einsetzen des höhenabhängigen starken Anstiegens der Rückbaukosten ab 2031 sind die Rückstellungen nach dem Modell HESSEN systematisch zu gering, so dass Finanzierungslücken drohen.

Abbildung 40: Jährlicher Vergleich Rückbau- und Entsorgungskosten zu Rückstellungen (SZENARIO 2)



Quelle: (Ramboll)

Sollten die Rückstellungen tatsächlich eher nach dem Modell des BVerwG dimensioniert sein, d.h. mit einem Betrag von 30.000 € je installiertem MW, sind über den gesamten Prognosezeitraum Finanzierungslücken zu erwarten. In beiden Szenarien zeigen die Entwicklungen der Rückstellungen nach dem Modell des BVerwG einen ähnlichen Verlauf über den Prognosezeitraum, jedoch auf einem insgesamt niedrigeren Niveau. Entsprechend steigt auch nach diesem Modell der Betrag der jährlichen Finanzierungslücke spätestens ab 2031 stark an. Ein Maximum ist 2038 mit einer Lücke von ca. 321 Mio. Euro in beiden Szenarien zu erwarten.

Zu dem Vergleich von Kosten und Rückstellungen ist zusätzlich anzumerken, dass die jährliche Summe der Rückstellungen nach beiden Modellen in der Realität nicht vollständig für den Rückbau bzw. die Entsorgung von Anlagen zur Verfügung steht. Da die Rückstellungen von den einzelnen Eigentümern bzw. Betreibergesellschaften der Anlagen im Bestand gehalten werden, sind diese exklusiv für Rückbau und Entsorgung einer Anlage bzw. eines Windparks reserviert. Eventuell nach erfolgtem Rückbau noch bestehende Überschüsse werden an die Eigentümer ausgeschüttet und stehen nicht zur Deckung von Finanzierungslücken beim Rückbau anderer Anlagen bzw. Windparks zur Verfügung.

Insgesamt sind beim Vergleich der prognostizierten Rückbau- und Entsorgungskosten mit beiden Modellen zur Berechnung der Rückstellungen erhebliche Finanzierungslücken zu erwarten, wobei die Berechnung nach dem Modell HESSEN die optimistischere der beiden Abschätzungen darstellt. Der zeitliche Verlauf der Höhe dieser Finanzierungslücken lässt sich grob in drei Phasen einteilen. In der ersten Phase 2021 bis 2025 übersteigen die Rückstellungen nach dem Modell HESSEN die erwarteten Kosten, die Rückstellungen nach dem Modell des BVerwG liegen bereits unter den Kostenprognosen. Da tatsächlich nicht die gesamte Summe der Rückstellungen zur Verfügung steht und die Berechnungen nach dem Modell des BVerwG bereits Finanzierungslücken anzeigen, ist schon in diesem Zeitraum mit einer leichten Unterfinanzierung von Rückbau und Entsorgung zu rechnen. In der zweiten Phase von 2026 bis 2030 liegen die kumulierten Rückstellungen nach beiden Modellen unter dem jeweiligen Finanzierungsbedarf. Das Auftreten von Finanzierungslücken ist in diesem Zeitraum wahrscheinlich. Diese werde in ihrem Betrag über denen der ersten Phase liegen. In der dritten Phase ab 2031 steigen die erwarteten Rückbau- und Entsorgungskosten stark und im Vergleich zu den Rückstellungen nach beiden Modellen überproportional an. Daher ist in diesen Jahren und unter gegenwärtiger Regulierung sicher mit teilweise erheblichen Finanzierungslücken jeweils >100 Mio. Euro (insbesondere zwischen 2034 bis 2038) zu rechnen.

4 Anforderungen an den Rückbau

Mit direktem Bezug auf die Ergebnisse der vorrausgegangenen Kapitel sollen technische Anforderungen definiert werden, die einen umweltverträglichen Rückbau von WEA an Land und eine hochwertige Entsorgung von Altanlagen begünstigen. In diesem Unterkapitel werden hierzu insbesondere Anforderungen für den Rückbauprozess definiert, wohingegen technische Anforderungen an die Entsorgung im nachfolgenden Kapitel erläutert werden.

4.1 Notwendigkeit von Standards für den Rückbauprozess

4.1.1 Aspekte zur Ausgestaltung eines Standards zum Rückbau

Als das wohl größte Problem des Rückbauprozesses einer WEA kann festgestellt werden, dass einheitliche verbindliche Standards, die Anforderungen an den Rückbau einer WEA hinreichend genau definieren, bisher nicht existieren. Somit lässt sich derzeit kaum feststellen, ob die Umsetzung eines konkreten Rückbauvorhabens zulässig und im Sinne der Umweltverträglichkeit geeignet ist. Dies stellt alle Beteiligten vor Probleme.

Um die technischen Anforderungen des Rückbaus von WEA an Land an die jeweiligen Randbedingungen zu spezifizieren, sollten folgende Aspekte explizit berücksichtigt und folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Klärung des Rückbauumfangs, insbesondere bezüglich des Rückbaus von Fundamenten und der Nebeneinrichtungen, wie Kabelsysteme, Stellflächen oder Zuwegung.
- Klärung der Zulässigkeit der derzeit verfügbaren Rückbaumethoden (Kran, Sprengung, Umziehen) für die jeweiligen Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, der Vermeidung von Flurschäden, sicherheitstechnischer Überlegungen und einem angemessenen Kosten-/Nutzen-Verhältnis.
- Anforderungen bezüglich Sicherheits- und Arbeitssicherheits-Aspekte (insbesondere, aber nicht ausschließlich auf Seiten der Rückbaufirmen) unter anderem vorzuweisende Ausbildungs-/Fortbildungsnachweise (z.B. Höhenttraining, Schaltberechtigung) oder Prüfplaketten (z.B. für Arbeitsmittel).
- Schaffung eines Standards bezüglich der vom Betreiber eines Windparks bereitzuhaltenden Dokumente/Daten (Mengen, Massen, Zeichnungen etc.) - bzw. der entsprechenden Daten, die vom Hersteller bei dem Anlagenverkauf verbindlich zur Verfügung zu stellen sind - welche für den Rückbauprozess benötigt werden.
- Anforderungen bzgl. der Verarbeitung/Zerlegung von Komponenten vor Ort – insbesondere Senkung von (GFK-/CFK-) Stäuben durch geeignete technische Maßnahmen (z.B. Einhausung oder Nassabscheidung).
- Schaffung von (bundesweit) einheitlichen Regelungen zum Rückbau von WEA, zur Qualität der Aufbereitung, sowie zum Umgang und der weiteren Verwendung von Recyclingmaterialien bzw. Sekundärrohstoffen inkl. der Definition einer sinnvollen Recyclingtiefe. Aufgrund des hohen Anteils betrifft dies insbesondere auch den Umgang mit Betonschotter und der Schaffung von einheitlichen Anforderungen zur Nutzung von RC-Beton als Füllstoff, sowie gegebenenfalls als Baumaterial.

4.1.2 Empfehlungen zur Schaffung eines Standards zum Rückbau einer WEA

Aufgrund unserer bisherigen Ergebnisse aus dem Projekt sehen wir folgende Empfehlungen als geeigneten Ausgangspunkt, respektive als erste Diskussionsgrundlage für geeignete Standards an:

- Der Rückbau eines Windparks sollte vollständig erfolgen. So sollten die Fundamente vollständig entfernt werden und nicht mehr genutzte Nebenanlagen wie Zuwegung, Kranstellflächen und Kabel sollten ebenfalls vollständig zurückgebaut werden.

Die o. g. generelle Forderung möchten wir jedoch wie folgt einschränken:

- Bei Pfahlgründungen halten wir den Rückbau von in das Erdreich eingebrachten Pfählen mit Blick auf das Kosten-/Nutzen-Verhältnis für grundsätzlich nicht sinnvoll. Je nach vorliegenden Randbedingungen kann nach sorgfältiger Einzelfallprüfung jedoch von vorstehender Regelung abgewichen werden.
- Analog verhält es sich mit Baugrundverbesserungsmaßnahmen (z.B. Rüttelstopfsäulen), deren Rückbau wir ebenfalls im Regelfall als nicht notwendig erachten. Auch hier sollte jedoch nach erfolgter Einzelfallprüfung auch eine Abweichung von vorstehender Regel möglich sein, wenn besondere Bedingungen vorherrschen, die den vollständigen Rückbau der Baugrundverbesserungsmaßnahme rechtfertigen.
- Weiterhin sollte in Ausnahmefällen von einem Rückbau der Nebenanlagen abgesehen werden, wenn diese einer anderen Nutzungsart dauerhaft Vorteile bringen oder beispielsweise bei einem Repowering weiterhin genutzt werden können. Dies betrifft insbesondere die Zuwegung, welche beispielsweise in landwirtschaftlich genutzten Gebieten durchaus auch langfristige Vorteile haben kann.
- Beim Kabelrückbau ist zwischen der standortbezogenen, parkinternen Verkabelung und der externen Kabeltrasse zur Verbindung des Windparks mit dem Netzanschlusspunkt zu unterscheiden. Die auf die WEA eines Windparks bezogenen Kabel sind vollständig zurückzubauen, was mit einem überschaubaren Aufwand in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht machbar erscheint. Inwieweit auch die externe Kabeltrasse zurückzubauen ist, ist im Einzelfall nach den jeweils vorliegenden Randbedingungen unter ökologischen, ökonomischen und auch rechtlichen Gesichtspunkten zu prüfen und abzuwägen. Unter Beachtung einer möglichen zukünftigen Nutzung der Grundstücke durch Folgegenerationen sprechen jedoch erhebliche Gründe für einen vollständigen Rückbau der externen Kabeltrasse.
- Der Rückbau des WEA-Rotors und der Gondel sollte primär mithilfe eines Krans erfolgen, da nur so ein sicheres Absenken des Rotors unter Vermeidung möglicher Flurschäden durch Absplitterungen oder Betriebsflüssigkeiten verhindert werden kann. Lediglich in Ausnahmefällen; beispielsweise, wenn der Zugang zur Gondel nicht mehr sicher erfolgen kann (z.B. nach einem Feuerschaden) sollten auch andere Rückbaumethoden zugelassen werden.
- Sprengungen von Betonelementen (Turm und Fundament) sollten analog zur gegenwärtigen Praxis weiterhin zulässig sein, wenn entsprechende Berechnungen und Nachweise bezüglich der zu erwartenden Auswirkungen auf benachbarte Anlagen und Einrichtungen keine Verhinderungsgründe ausweisen.

- Da der Rückbau einer Windenergieanlage ähnliche Herausforderungen bietet wie der Aufbau, sollten an Mitarbeiter von Rückbauunternehmen dieselben Anforderungen bezüglich Ausbildung und Fortbildung gestellt werden, wie an Mitarbeiter von Aufbauunternehmen bzw. den Mitarbeitern von Unternehmen, die die Wartung und Instandhaltung von WEA durchführen. Hierbei sind einschlägige Regelungen, wie bspw. die der Berufsgenossenschaften explizit zu berücksichtigen. Zudem sollten nur geprüfte Hilfsmittel (Kräne etc.) verwendet werden.
- Weiterhin wird zu Beginn der Rückbauarbeiten mindestens eine schaltberechtigte Person¹⁸ benötigt, welche die WEA vom Netz trennt (und die Kabel zudem auch physikalisch trennt). Falls bei der ausführenden Rückbaufirma eine Person mit entsprechender Berechtigung nicht vorhanden sein sollte, kann hierzu auch eine Person von einer Drittfirma hinzugezogen werden. Relevant ist in diesem Zusammenhang lediglich das die WEA von einer qualifizierten Person stromlos gesetzt wird und ein nachfolgendes sicheres Arbeiten ermöglicht wird.
- Die Verantwortlichkeiten vor Ort sowie eine verantwortliche Person auf der Baustelle¹⁹ ist im Vorfeld zu benennen. Diese Person soll gegenüber allen Beteiligten auf der Baustelle weisungsbefugt sein und die Oberbauleitung innehaben. Zur Überwachung der sicherheitstechnischen Regularien sollte zudem eine externe und unabhängige Person (z. B. der Bauaufsichtsbehörde) zur Überwachung eingesetzt werden, die bei erheblichen Verstößen zur Schließung der Baustelle befugt ist.
- Zur hinreichend genauen Planung von Rückbaumaßnahmen sollten Betreiber von Windenergieanlagen verpflichtet sein, die wesentlichen Mengen und Massen sowie die Materialzusammensetzung ihrer WEA hinreichend genau zu kennen und zu dokumentieren. Dies gilt insbesondere für die „kritischen“ Abfallströme (vgl. Ergebnisse aus dem vorherigen Arbeitspaket AP 1). Hinweis: Dass die Betreiber diese Kenntnis haben setzt jedoch auch voraus, dass die Hersteller der WEA verpflichtet werden, die entsprechenden Informationen dem jeweils aktuellen Betreiber und bei Weiterveräußerung auch dem neuen Betreiber zur Verfügung zu stellen.

Einen Teil der erforderlichen Informationen sollten Betreiber von Windparks frühzeitig (beim ursprünglichen Kauf der Anlage) von den WEA-Herstellern einholen. Nur so lässt sich der zielgerichtete Rückbau und die spätere ordnungsgemäße Entsorgung planen, was sowohl bzgl. des Budgets als auch einer möglichst sinnvollen Verwertung der Materialien Vorteile bietet.

Da aufgrund der langen Betriebsphasen einer WEA nicht sichergestellt werden kann, dass der WEA-Hersteller die notwendigen Informationen zum Rückbauzeitpunkt bereitstellen kann, sollten die Informationen zwingend vom Betreiber zur Verfügung gestellt (siehe Hinweis oben) werden können. Hierzu sollten Verpflichtungen eingeführt werden, die nachfolgenden Informationen zu dokumentieren und, falls erforderlich, zu aktualisieren:

- WEA-Typ, Nennleistung, Rotordurchmesser, Nabenhöhe

¹⁸ Die Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel DGUV Vorschrift 3 (früher BGV A3) verlangt in §3(1): "Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass elektrische Anlagen und Betriebsmittel nur von einer Elektrofachkraft oder unter Leitung und Aufsicht einer Elektrofachkraft den elektrotechnischen Regeln entsprechend errichtet, geändert und instandgehalten werden." Einschlägige Vorgaben enthalten auch die Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) von 2002.

¹⁹ Alle Arbeiten müssen unter der Leitung und Aufsicht einer für den Auftragnehmer vor Ort vertretungsberechtigten und verantwortlichen Person nebst einem Vertreter durchgeführt werden.

- Gewicht je Rotorblatt, Zusammensetzung des Rotorblattes (reines GFK oder GFK/CFK)
 - Lokale Verteilung von CFK innerhalb der Rotorblätter
 - Gewicht der Nabe
 - Gewicht der Gondel, Generatortyp
 - Betriebsmittel, Schmiermittel, Getriebeöle mit Hinweis zur Trockenlegung,
 - Ggf. Hinweis auf Industriemagnete und ihre Art (z.B. SEE)
 - Gewicht des Turms, Turmbauart, Anteil Stahl und Beton, Segmentierung
 - Gewicht des Fundaments, Fundamenttyp, Fundamentzeichnungen
 - Zeichnung der Kranstellflächen und Zuwegung (inkl. Aufbau)
 - Zeichnung der Kabeltrasse (inkl. Kabeltypen, Querschnitte)
 - Art und Menge der Betriebsflüssigkeiten
- Mit Bezug auf die Zerlegung von Komponenten vor Ort, mit dem Ziel, einen einfachen Transport (ohne Sondertransporte) zu ermöglichen, ist insbesondere im Bereich der Zerlegung von Rotorblättern ein Standard zu definieren, der auf die Senkung von GFK-/CFK-Staubemissionen abzielt. So sollte während des Sägens von Rotorblättern durch geeignete Maßnahmen (Einhausung, Nassabscheidung) eine Minimierung der Emissionen angestrebt werden. Hierbei muss nicht zwangsläufig ein konkretes Verfahren vorgeschrieben werden. Es muss jedoch klar erkennbar sein, dass der Staubeintrag in die Umgebung sowie Gefährdung der ausführenden Personen gegenüber einem Zerkleinerungsprozess ohne gesonderte Vorkehrungen deutlich gesenkt wird.

Die Zerkleinerung von Rotorblattmaterial mittels eines Baggers („Zerknuspern“) ist kritisch zu hinterfragen. Sobald andere Verfahren zum Zerkleinern der Rotorblätter verfügbar sind, wie beispielsweise die Nutzung von Sprengschnüren bei Nutzung geeigneter Einhausungen, sollten diese gesondert bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit bewertet werden.

- Zur Zerlegung anderer Komponenten bspw. der Gondel müssen aus unserer Sicht kaum gesonderten Anforderungen gestellt werden, da hier aufgrund der Anforderung eines möglichst kostengünstigen Rückbaus bereits ausreichend Anreize für ein ausgewogenes Verhältnis aus geringen Transportkosten und hoher Recyclingfähigkeit der überwiegend metallischen Materialien vorherrscht. Entgegen vorstehendem Satz ist jedoch grundsätzlich festzuhalten, dass bei der Zerlegung von Komponenten grundsätzlich geringe Mengen an Betriebsflüssigkeiten freigesetzt werden können, die entsprechend aufzufangen sind.

Lediglich im Bereich des Recyclings von Seltenen Erden/Permanentmagneten könnten gegebenenfalls Standards definiert werden, um eine höhere Recyclingquote zu ermöglichen. Gemäß unseren Ergebnissen aus Kapitel 3.3.1.3 ist der zu erwartende Bedarf diesbezüglich in den kommenden Jahren jedoch noch nicht sehr groß und geeignete Recyclingverfahren von Seltenen Erden noch nicht in einem hinreichend weit entwickelten Stadium.

- Aufgrund des hohen Anteils an Betonschutt, der beim Rückbau von WEA anfällt, sollte zudem eine bundesweit einheitliche Regelung zum Umgang mit dieser Abfallgruppe gefunden werden. So sollte Betonschutt, sobald die Umweltverträglichkeit per Laborprobe nachgewiesen wurde, pauschal als Füllmaterial verwendet werden dürfen. Die gegenwärtige Handhabung, nach dem in einigen Regionen hohe Entsorgungskosten für Betonschutt anfallen, da eine weitere Verwendung des Materials ausgeschlossen wird, erscheint nicht sinnvoll. Zudem findet hier eine lokal sehr starke Ungleichbehandlung diverser WEA-Betreiber statt, die nicht sinnvoll erscheint.

Langfristig ist zudem zu prüfen, ob der Betonschutt, nach entsprechender Bearbeitung, auch als Beimischung für neue Bauvorhaben genutzt werden kann und die somit benötigten Betonmengen, über das gesamte Baugewerbe bilanziert, reduziert werden können.

Gegebenenfalls könnte hierbei auch zwischen Turm- und Fundamentbeton unterschieden werden. Die Getrennthaltung sollte während des Rückbaus nicht allzu schwierig sein und könnte die weitere Verwertung als RC-Beton erleichtern.

4.2 Stärkere Einbindung von Behörden

Neben der Schaffung von geeigneten Anforderungen an den Rückbau von WEA, sehen wir auch in der Überwachung dieser Bestimmungen eine hohe Relevanz. Hierbei bietet sich bspw. eine stärkere Einbindung der örtlichen Behörden als Überwachungsorgan beim Rückbau von WEA an. Überlegungen zu den Einzelheiten, wie eine solche stärkere Einbindung der Behörden erfolgen könnte, werden in Kapitel 7 behandelt.

Zudem sollten zum Nachweis der fachgerechten Entsorgung entsprechende Dokumente vom ehemaligen Betreiber der WEA vorgelegt werden. Gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 4 werden gegenwärtig von einigen Behörden bereits Entsorgungsnachweise (inkl. Wiegescheine) gefordert. Dieses, aus unserer Sicht grundsätzlich sinnvolle Vorgehen, hat sich jedoch noch nicht vollständig etabliert und scheint nur partiell angewandt zu werden.

Weiterhin könnten auch Dokumentationsstandards für den Fall eines möglichen Weiterverkaufs von ganzen WEA oder WEA-Komponenten eingeführt werden, die Behördenvertreter in die Lage versetzen, zumindest grundlegend nachzuprüfen, ob es sich tatsächlich um eine zulässige Weiternutzung der WEA oder der Komponenten handelt und nicht etwa um eine Ausweichreaktion mit dem Ziel Entsorgungskosten einzusparen („Müllexport“ bspw. für Materialien deren Deponierung in Deutschland nicht zulässig ist).

4.3 Weitere Ziele für den nachhaltigen Rückbau einer WEA

4.3.1 Nutzung von Synergien im Rahmen von Onshore-Maßnahmen

Neben der Einführung von Standards und verstärkter Überwachung dieser durch die zuständigen Behörden, bietet auch die verstärkte Nutzung von Synergien große Vorteile.

So können insbesondere die Betonschuttabfälle aus rückgebauten Windparks als Schotter in benachbarten neuen Windparks, die zeitgleich errichtet werden, genutzt werden. Ein solches Vorgehen spart sowohl auf Seiten des Betreibers des rückgebauten Windparks, als auch beim Betreiber des neuen Windparks Kosten und bietet zudem auch für die Umwelt Vorteile, da Transportaufwendungen und somit Emissionen reduziert werden.

Weiterhin sind auch Kooperationen verschiedener Betreiber von gleichzeitig rückzubauenden Windparks denkbar, wobei hier insbesondere auf eine Reduzierung der Rüstkosten für den Kran abgezielt wird. Einschränkend muss diesbezüglich jedoch festgehalten werden, dass derartige

Synergien nur genutzt werden können, wenn WEA mit ähnlichen Dimensionen, in räumlicher Nähe und zu einem sehr ähnlichen Zeitpunkt rückgebaut werden sollen.

Es kann erwartet werden, dass die Nutzung solcher Synergien, ohne die Schaffung zusätzlicher Anreize aufgrund von Kostenvorteilen, sich von selbst ergeben. Als Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch in jedem Fall notwendig, dass eine gewisse Transparenz der notwendigen Informationen vorherrscht und diverse Betreiber in die Lage versetzt werden, derartige Kooperationen überhaupt einzugehen. In diesem Zusammenhang ist die Einführung des Marktstammdatenregisters, welches als Informationsquelle genutzt werden kann, ein erster richtiger Schritt. Sobald der Weiterbetrieb von WEA, d.h. ein standortspezifischer Betrieb über die ursprünglich in der Typenprüfung ausgewiesene Betriebsdauer hinweg, häufiger vorkommt, wäre zudem eine Ergänzung des Marktstammdatenregisters hilfreich, aus der der Ablauf der Standsicherheit hervorgeht. Diese Angabe könnte zudem auch von den zuständigen Behörden genutzt werden, um einfach nachzuprüfen, ob ggf. WEA außerhalb des Zeitraums, für den die Standsicherheit sicher nachgewiesen wurde, betrieben werden.

5 Anforderungen an die Entsorgung

5.1 Verwertungsanforderungen

Kapitel 7.1 gibt eine Übersicht über die geltenden Verwertungsanforderungen, aufgeschlüsselt nach den anfallenden Stoffgruppen. Dabei wird zunächst der grundsätzliche rechtliche Rahmen vorgestellt. Anschließend werden die spezifischen Verwertungsanforderungen für WEA relevante Stoffgruppen vorgestellt.

5.1.1 Rahmen der Verwertungsanforderungen

Die Verantwortlichkeit für die Entsorgung von Abfallströmen ist im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt; nach § 7 Abs. 2 sind die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung von Abfällen hat nach § 7 Abs. 3 ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen. Die zu wählende Verwertungsmaßnahme ist nach § 8 Abs. 1 diejenige Maßnahme, die den Schutz von Mensch und Umwelt unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 festgelegten Kriterien am besten gewährleistet. Ist eine Verwertung nicht möglich, sind die Erzeuger und Besitzer von Abfällen grundsätzlich nach § 15 Abs. 1 verpflichtet, diese zu beseitigen. Die Beseitigung hat nach § 15 Abs. 2 so zu erfolgen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Für Bau- und Abbruchabfälle gilt nach Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV), dass bestimmte dort genannte Fraktionen getrennt gehalten und nach Maßgabe des § 8 KrWG vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen sind.

Die gesetzlichen Pflichten der Erzeuger und Besitzer von Abfällen bei der Entsorgung wurden in Kapitel 2.1.3 bereits dargestellt. Zusätzlich können sich aus

- weiteren untergesetzlichen Regelwerken,
- Verwaltungsvorschriften,
- Leitlinien (etwa solchen der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), die einen bundeseinheitlichen Vollzug des Abfallrechtes anstreben sowie Lösungen für Vollzugprobleme entwickeln soll (z.B. LAGA M20)),
- Normen (z.B. DIN 4226-100 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel) oder auch
- sonstigen privatrechtlich vereinbarten Standards (wie im Fall von Metallen)

Anforderungen an die Entsorgung ergeben. Diese beeinflussen das Verhalten der Marktteilnehmer (Abfallerzeuger/-besitzer, Abbruchunternehmer, Entsorger) und sind im Folgenden dargestellt.

5.1.2 Getrennthaltung

Durch Getrennthaltung von Abfallstoffen soll eine höhere Sortenreinheit des Ausgangsmaterials gewährleistet werden, um mehr Materialien einer Verwertung zuzuführen. Die Getrennthaltung der anfallenden Stoffgruppen ist im KrWG, der GewAbfV und in den jeweiligen stoffgruppenspezifischen Gesetzen/ Verordnungen wie z.B. der AltöIV, dem BattG sowie dem ElektroG, verankert. Jede Abfallfraktion, die in der GewAbfV benannt wird, besitzt eine Abfallschlüsselnummer, die in der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) aufgelistet und auch auf europäischer Ebene durch die Europäische Abfallliste nach 2000/532/EC harmonisiert ist. Bau- und Abbruchabfälle sind dem Kapitel 17 der AVV zugeordnet. Nach § 8 Abs. 1 GewAbfV gilt eine Getrennthaltung der Bau und Abbruchabfälle für folgenden Stoffgruppen: Glas (17 02 02), Kunststoff (17 02 03), Metalle einschließlich Legierungen (17 04 01 bis 17 04 07 und 17 04 11), Holz (17 02 01), Dämmmaterial (17

06 04), Bitumengemische (17 03 02), Baustoffe auf Gipsbasis (17 08 02), Beton (17 01 01), Ziegel (17 01 02) sowie Fliesen und Keramik (17 01 03).

5.1.3 Verwertungsanforderungen an WEA-relevante Baugruppen (Zusammenfassung)

Für alle Stoffgruppen einer WEA existieren generell die Anforderungen des KrWG. Weitergehende spezifische Anforderungen zu den Stoffgruppen sind nachfolgend in Tabelle 24 zusammengeführt.

Tabelle 24: Anforderungen für die Entsorgung von Komponenten aus WEA

Stahl	Deutsche Stahlschrottsortenliste Europäische Stahlschrottsortenliste
Aluminium	Usancen und Klassifikationen des Verband Deutscher Metallhändler
Kupfer	Usancen und Klassifikationen des Verband Deutscher Metallhändler
Beton & Schotter	Gewährleistung von vergleichbaren Qualitätsanforderungen u.a.: DIN 4226-100 <i>Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen</i> DIN EN 206 <i>Beton</i> DIN 1045-2 <i>Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton</i> TL: LAGA M20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen Noch nicht beschlossen: Mantelverordnung: Deponieverordnung (DepV)
Betriebsflüssigkeiten	Altölv
SF ₆	ChemKlimaschutzV Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase Richtlinien für die Prüfung und Aufbereitung von Schwefelhexafluorid (SF ₆) nach Entnahme aus elektrischen Betriebsmitteln und Spezifikation für dessen Wiederverwendung (DIN EN 60480) Selbstverpflichtung der Hersteller und Betreiber elektrischer Betriebsmittel
Batterien & Akkumulatoren	§ 5 BattG: Rücknahmepflicht § 14 BattG: Verwertung und Beseitigung
Verbundwerkstoffe GFK & CFK	Keine Anforderungen identifiziert.
SEE	Keine Anforderungen identifiziert.
Elektroschrott	Wir gehen davon aus, dass die in WEA verbauten Elektro- und Elektronikgeräte vom Anwendungsbereich des ElektroG ausgenommen sind. Eine Erstbehandlung und Entfernung von gefährlichen Stoffen aus Altgeräten wie es in Anhang 4 (zu § 20) des ElektroG gefordert ist, wird unseres Wissens nicht durchgeführt. Eine Entfernung von gefährlichen Stoffen findet dennoch statt, da bei einem WEA Rückbau als erstes Betriebs- und Schmierflüssigkeiten sowie SF ₆ entnommen werden.

Quelle: (Ramboll)

5.1.4 Einzelne Stoffströme

5.1.4.1 Gefährliche Abfälle

Nach § 48 des KrWG unterliegt die Entsorgung und Überwachung von gefährlichen Abfällen²⁰ besonderen Anforderungen. Im Grundsatz sind gefährliche Abfälle nachweispflichtig, nicht gefährliche Abfälle nur in Ausnahmefällen. Gefährliche Abfälle treten bei WEA hauptsächlich in Form von Betriebsflüssigkeiten, Schmierstoffen und als Isoliergas (SF₆) auf. Für gefährliche Abfallstoffe gilt nach § 9 Abs. 2 KrWG generell ein Vermischungs- und Verdünnungsverbot.

Betriebs- und Schmiermittel

Betriebsflüssigkeiten oder Schmierstoffe werden in WEA in den Baugruppen Generator, Umrichter, Getriebe, Hydrauliksystem, Rotorlager, sowie im Transformator eingesetzt.

Soweit nicht als absolute Einträge in der AVV als gefährlich eingestuft (wie Altöle), können Alt-Betriebsflüssigkeiten je nach ihren Eigenschaften (etwa Wassergefährdungsklasse und Gesundheitsschädlichkeit) als gefährliche Abfälle einzustufen sein und unterliegen dann den Vorgaben über die Bewirtschaftung gefährlicher Abfälle. Diese sind in der GefStoffV sowie in der AltöIV zu finden.

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, können bei WEA mit Getriebe zwischen 212 und 483 l an Ölen und Fetten anfallen. Bei getriebelosen WEA lediglich 28 bis 81 l. Die Bauteile, bei denen Betriebsflüssigkeiten verwendet werden, werden bei planmäßigen Wartungen auf Dichtigkeit untersucht. Bei Bedarf werden Ölproben genommen und auf die Qualität hin geprüft. Bei Überschreitung der maximalen Betriebsdauer wird das Öl gewechselt. Bei einem Rückbau einer WEA werden die Betriebsflüssigkeiten aufgrund ihrer Schädlichkeit als erstes entfernt. Betriebsflüssigkeiten und Schmierstoffe, die ihre maximale Betriebsdauer erreicht haben, nicht mehr verwendet werden sollen oder die bedingt durch einen Rückbau angefallen sind, müssen gemäß der AltöIV getrennt von anderen Altölen gelagert und befördert werden. Es besteht ein grundsätzliches Vermischungsverbot für Altöle.

SF₆

SF₆ wird in WEA in den gasisolierten Schaltanlagen eingesetzt.

Wie bereits beschrieben, gibt Artikel 8 der Verordnung über fluorierte Treibhausgase (EU) Nr.517/2014 vor, dass die Rückgewinnung von SF₆ durch zertifiziertes Personal erfolgen muss, um dessen Recycling, Aufbereitung oder Zerstörung sicherzustellen. SF₆-Gas, das aus technischen Gründen in der elektrischen Schaltanlage nicht mehr verwendet werden soll, muss gemäß der ChemKlimaschutzV von Herstellern und Vertreibern zurückgenommen werden (verordnete Rücknahme von Abfall). Diese können die Rücknahme durch von Ihnen bestimmte Dritte sicherstellen. Nähere Informationen beinhaltet DIN EN 60480: Richtlinien für die Prüfung und Aufbereitung von Schwefelhexafluorid (SF₆) nach Entnahme aus elektrischen Betriebsmitteln und Spezifikation für dessen Wiederverwendung. Weiterhin besteht die Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland.²¹

5.1.4.2 Mineralische Abfälle

Die Wiederverwendung von mineralischen Abfällen ist derzeit nicht bundeseinheitlich geregelt. Um einen einheitlichen Vollzug anzustreben, wurde im Auftrag der Umweltministerkonferenz die LAGA

²⁰ Gefährliche Abfälle sind Abfälle die nach Art, Beschaffenheit oder Menge in besonderem Maß eine Gefahr für die Gesundheit oder die Umwelt darstellen, explosiv oder brennbar sind oder Erreger übertragbarer Krankheiten enthalten bzw. hervorbringen können. Für gefährliche Abfälle existieren spezielle Entsorgungswege und -verfahren. Alle Abfallarten, die im EAV (Europäische Abfallverzeichnis) als gefährlich eingestuft sind, werden durch einen Stern (*) hinter der Abfallschlüsselnummer gekennzeichnet.

²¹ https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/sv_sf6_bf.pdf

M20 erarbeitet, um übergreifend Verwertungsgrundsätze und Anforderungen für den Einbau von mineralischen Bauabfällen zu definieren.

Einen bundesweiten rechtverbindlichen Rahmen für den Umgang mit mineralischen Abfällen soll zukünftig die Mantelverordnung bilden; diese ist aber Stand März 2019 noch nicht verabschiedet (Stand der Diskussion: Veröffentlichung des Referentenentwurfs Februar 2017).

Altbeton

Die Verwertungsmöglichkeiten von Baustoffen hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dabei spielen bautechnische und umweltrelevante Eigenschaften sowie die stoffliche Zusammensetzung eine Rolle. Entsprechend den Regelwerken für Primärbaustoffe müssen RC-Baustoffe bestimmte bautechnische Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen werden im Rahmen der Güteüberwachung fortlaufend geprüft, insbesondere die Eigenschaften Korngrößenverteilung, stoffliche Zusammensetzung, Frostbeständigkeit, Kornform, Bruchflächigkeit, Störstoffanteil sowie Widerstand gegen Schlag (Zertrümmerung).

Zur Herstellung von Recyclingbeton (RC-Beton) werden Primärbaustoffe wie z.B. Naturstein oder Kies durch rezyklierte Gesteinskörnungen substituiert, die zuvor als Baustoffe eingesetzt waren. Dabei wird die Qualität des RC-Betons maßgeblich von der eingesetzten Gesteinskörnung definiert. Zur Gewährleistung dieser Qualität sind für RC-Beton die gleichen Anforderungen an die Produktion (bautechnische Qualität) und den Einbau (Art und Weise) einzuhalten. Entsprechend sind in der *DIN 4226-100 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel*, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen chemische und mechanische Eigenschaften definiert. Je nach Anwendungsbereich sind weitere Anforderungen in der *DIN EN 206 Beton* und der *DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton* festgelegt. Recycling-Baustoffe werden nach Qualitäten u.a. nach „umweltverträglichen“ sowie „bedingt umweltverträglichen“ RC-Baustoffen unterschieden. Während bei umweltverträglichen Baustoffen keine umweltrelevanten Sicherheitsmaßnahmen zu beachten sind, verlangt der Anwendungsbereich für bedingt umweltverträgliche RC-Baustoffe den Einsatz unter besonderen Vorkehrungen, wie z. B. die Verwendung von Bindemitteln, Einbau von Dichtungsfolien oder dem kontrollierten Ableiten von Sickerwasser. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit von mineralischen Abfällen ist länderspezifisch in der LAGA M20 festgelegt. Dort wird unter Berücksichtigung der analysierten Feststoff- und Eluatwerte den Einbauklasse (Z0 bis Z2) des mineralischen Abfalls bestimmt.

Schotter

Schotter zählt ebenfalls wie die RC-Baustoffe zu den Gesteinskörnungen. Daher sind alle entsprechenden DIN-Vorschriften, technischen Lieferbedingungen und zusätzlichen technischen Vertragsbedingung, die sowohl bau- als auch umwelttechnische Anforderungen definieren, gleichermaßen relevant.

5.1.4.3 Metallische und metallhaltige Abfälle

Aufgrund der guten Recyclingeigenschaften, des deutlich verringerten Energiebedarfs gegenüber Primärrohstoffen und der Preiswürdigkeit stellt sich das Metallrecycling im Gegensatz zu vielen anderen Stoffströmen als lukrativer Wirtschaftsbereich dar, der im Gegensatz z. B zu mineralischen Abfällen ohne gesetzliche produktbezogene Qualitäts- sowie Quotenvorgaben auskommt.

Für die Stahl- und NE-Schrotte sind innerhalb der Branche daher eigenständige Spezifikationen und Lieferbedingungen definiert, die unter rechtlichen Aspekten als Handelsbrauch („übliche Handelsregelungen“ d.h. „Usancen“) einzuordnen sind. In ihnen haben Experten niedergeschrieben, was im Metallhandel handelsüblich ist. Die ältesten bekannten Usancen des Metallhandels stammen aus der Weimarer Republik, sie wurden immer wieder aktualisiert und der gängigen Praxis angepasst.

Übliche Handelsregelungen umfassen dabei Art und Weise der Bestellung, der Qualitätsbestimmung sowie der Preisvereinbarung. Die Klassifizierung, d.h. die Qualitätseinordnung des jeweiligen

Schrottes, erfolgt dabei nach chemischen und physikalischen Parametern und wird durch die Anforderungen des (zumeist) schmelzmetallurgischen Prozesses bestimmt.

Generell sind die Klassifizierungen der Schrottgemische technikorientiert, d.h. auf die Wirkungsgrade der im Regelfall schmelzmetallurgischen Prozesse sowie auf die technischen Beschickungsgrenzen („Chargierbarkeit“) des Ofensystems ausgerichtet. Im optimalen Falle können Metalle wieder qualitativ gleichwertig recycelt werden, sofern sortenreines Material (bzgl. chemischer Zusammensetzung, insbesondere Legierungsbestandteile) und weitgehend ohne Fremdstoffe bereitgestellt wird. Abweichungen hiervon führen zu Qualitätseinbußen, die im Ergebnis zu niedrigeren Produkterlösen führen. Eine weitgehend sortenreine Separierung entweder bereits bei der Erfassung oder beim Metallhändler ist daher auch aus wirtschaftlichen Gründen grundsätzlich anzustreben. Getrennte Entsorgungswege von Metallen sind aufgrund von schmelzmetallurgischen Inkompatibilitäten zunächst in die Routen Stahl, sowie Al und Cu einschließlich sonstige Buntmetalle anzustreben, qualitative Unterschiede der Metallströme innerhalb der Metallrouten können zumindest teilweise durch getrennte Erfassung sowie durch analytische, stoffspezifische Zuordnung bei Verarbeitungsbetrieben sowie durch Mischen kompensiert werden. Der Umfang, in dem Metallströme gleichwertig recycelt werden können, wird dabei auch von der technischen Ausstattung des schrottverarbeitenden Betriebs beeinflusst.

Stahlschrott

Für den Handel mit Schrotten auf einheitlicher Basis existiert z. B. für unlegierte Stahlschrotte die Deutsche Stahlschrottsortenliste (1993). Auf europäischer Ebene wird hierzu die Europäische Stahlschrottsortenliste (1995) angewendet, die weitgehend der Deutschen Liste entspricht.

Chemische Schrottanforderungen, durch die die Effizienz des schmelzmetallurgischen Sekundärrohstoffes beeinflusst wird, sind

- Abbrand (d.h. Verluste durch Oxidation, Feuchte, Farbe, organische Fremdstoffe)
- Organische Fremdstoffe (Verursachung von ggfs. Emissionsproblemen bei thermischer Umwandlung)
- Legierungsbestandteile (z.B. Cu, Zn, Sb, As), die Einfluss auf die Stahlgüte besitzen und nicht trennbar
- Zink (verdampft beim metallurgischen Prozess und wird als Zinkoxid im Filterstaub niedergeschlagen)

Die physikalischen Schrottanforderungen werden i.W. durch die *Chargierfähigkeit* sowie durch das *Prozessverhalten* im metallurgischen Prozess definiert. Parameter sind z. B. die Abmessungen (z.B. 1,5 m x 0,5 m x 0,5 m), das schwerste Teil (Einfluss auf Schmelzzeit) sowie die Schüttdichte, die Einfluss auf die Prozessführung des Bachbetriebes sowie auf resultierende Oxidationsverluste hat.

Einzuhaltende Qualitätsvorgaben sind hierzu in der EU-Schrottsortenliste hinterlegt. Die mit dem Buchstaben „E“ benannten Sortennummern definieren qualitative Vorgaben, zulässige Abmessungen, Schüttgewicht und Schuttanteil.

NE- Metallschrotte

Analog zum Stahlschrott existieren auch für NE-Metalle spezifische Klassifikationen als auch geltende Handelsregelungen, die in der vom VDM (Verband Deutscher Metallhändler) herausgegebenen NE-Sortenliste hinterlegt sind. Die Klassifizierungen für NE-Metallschrott beschreiben die in der Branche üblichen Qualitäten. Die aktuelle Fassung wurde vom VDM 1988 herausgegeben und mit der Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. und der Vereinigung Deutscher Schmelzhütten e.V. abgestimmt.

Die Klassifizierungen für NE-Metall-Granulate wurden im Jahr 2000 von der Qualitätsgemeinschaft Kabelzerleger im VDM veröffentlicht (Munz 2012).

Die Klassifizierungen geben keine Auskunft darüber, ob es sich bei der beschriebenen Qualität um ein Produkt oder um Abfall handelt. Diese Einordnung ist allein auf Grund der geltenden Gesetze (z.B. dem Kreislaufwirtschaftsgesetz oder der EU-Verordnung Nr. 333/2011 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott ... nicht mehr als Abfall anzusehen sind) zu treffen. Allerdings können die Klassifizierungen u.U. eine „Vorgabe der Industrie“ im Sinne des Anhangs II Ziffer 1.1 der o.g. EU-Verordnung sein (Munz 2012).

Analog zu Stahlschrotten existieren bei NE-Metallen physikalische und chemische Qualitätsparameter, nach denen die Sorteneinteilung und damit auch die Preiswürdigkeit bestimmt wird. Kriterien wie „Ofen“- und „Tiegelrecht“ sind nach Abmessungen sowie maximalen Massen definiert. Weitere Vorgaben sind der maximale Anteil an feinen Körnungen („Kleinstückigkeit“ und „Feines“); darüber hinaus existieren Maximalwerte für Fremdbestandteile (Radioaktive Materialien sind ausgeschlossen), wie auch für Beschichtungen durch Überzüge und metallische Anhaftungen. Die Klassifizierung erfolgt alphabetisch für die Gruppe von NE-Metallen, beginnend von Aluminium (A), über Kupfer (K) bis zu Zinn (S). Dem jeweiligen Buchstaben ist eine Zahl nachgeordnet, die mit steigender Nummer eine abnehmende Qualität darstellt.

Aluminiumschrott

Aluminium (Al) wird in WEA im Gondelgehäuse, im Generator sowie im Transformator verbaut.

Al ist ein unedles Metall mit hoher Sauerstoffaffinität, weshalb besondere Aufmerksamkeit auf die Vorbereitung vor dem eigentlichen Schmelzprozess zu legen ist. Für ein hochwertiges Recycling sind daher sowohl Fremdstoffe als auch Anhaftungen und Beschichtungen möglichst vollständig abzuscheiden. Darüber hinaus bestimmt die Legierungsart des Aluminiums den Recyclingweg. Aluminium aus Recyclingquellen ist fast immer eine Mischung aus Guss- und Knetlegierungen, die aufgrund ihrer Zusammensetzung ein unterschiedliches schmelzmetallurgisches Verhalten aufweisen. Gussaluminium ist hochlegiert und weist gegenüber dem niedrig legierten Knetaluminium u.a. einen deutlich höheren Si-Gehalt auf (bis zu 20 % gegenüber max. 1 % Si und Fe). Weitere Unterschiede können in den verarbeiteten Legierungselementen liegen, so darf z.B. in Knetlegierungen kein Nickel verarbeitet sein. Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen kann zwar eine Knet- in eine Gusslegierung, nicht aber eine Guss- in eine Knetlegierung metallurgisch umgewandelt werden.

Die Schrottklassifizierung nach dem Katalog der VDM umfasst gegenwärtig 22 Al-Schrottsorten.

Kupferschrott

Die günstigen metallurgischen Eigenschaften des Kupfers sowie der hohe Metallpreis des Kupfers ermöglichen auch die wirtschaftliche Nutzung von Abfällen mit geringem Kupfergehalt. Die metallischen Legierungszusätze spielen aufgrund der geringen Sauerstoffaffinität von Kupfer im Schmelzprozess grundsätzlich eine untergeordnete Rolle. Die Kupferklassifizierung nach VDM umfasst ca. 30 verschiedene Schrottsorten.

Elektroschrott

Für Geräte außerhalb des Anwendungsbereichs des ElektroG sind laut § 2 Abs. 3 die allgemeinen Verwertungs- und Beseitigungspflichten des KrWG anzuwenden. Grundsätzlich können neben den in § 2 Abs 2 Nr. 6 definierten Elektronikschrotten andere Elektronikschrotte anfallen, diese spielen allerdings nur eine verschwindend geringe Rolle. Die Interviewpartner der Entsorgungs- und Rückbauunternehmen bestätigten, dass der bei WEA anfallende Elektronikschrott größtenteils nicht unter das ElektroG fällt. Elektronikschrotte nehmen aufgrund der hohen Metallgehalte die prozesstechnische Route der metallischen Abfälle.

Seltene Erdmetalle (SEE)

SEE werden im KrWG nicht explizit behandelt und es existiert für diese Stoffgruppe keine eigene Abfallschlüsselnummer. In WEA sind SEE ausschließlich in Permanentmagneten vorhanden. Diese werden zusammen mit dem Elektronikschrott erfasst, teilweise gesammelt und spezialisierten Verwertern für Elektronikschrott zugeführt oder als Mischschrotte der metallurgischen Route verwertet.

5.1.4.4 Batterien und Akkumulatoren

Batterien und Akkumulatoren werden in WEA eingesetzt, um im Fall eines Stromausfalls eine Notversorgung der WEA zu gewährleisten. Der Umgang mit anfallenden Altbatterien ist im Batteriesgesetz (BattG) festgelegt. Ziel des BattG ist es, die Emission von Schadstoffen in andere Abfälle und in die Umwelt zu minimieren. Hersteller, Händler und Importeure sind nach § 5 BattG dazu verpflichtet, Altbatterien unentgeltlich zurückzunehmen und nach § 14 BattG zu verwerten. Altbatterien im Sinne des Gesetzes sind alle Batterien, unabhängig von Form, Größe, Masse, Zusammensetzung oder Verwendung. Die unterschiedlichen Arten von Batterien sind in der AVV im Kapitel 16 und 20 zu finden. In WEA finden Industriebatterien (vgl. § 2 Abs. 5 BattG) Anwendung. Nach dem Ende der Nutzungsphase kann die Sammlung der Industriebatterien laut § 11 Abs. 4 BattG durch die Vertreiber und über gewerbliche Altbatterieentsorger erfolgen. Diese nutzen die von den Herstellern einzurichtende kostenfreie Rückgabemöglichkeit gegenüber den Vertreibern und Behandlungseinrichtungen für Elektro-Altgeräten. Die nach dem Gesetz Verpflichteten können gemäß § 19 BattG Dritte mit der Erfüllung ihrer Pflichten beauftragen. Aktuell gibt es am Markt mehrere Rücknahmesysteme von Altbatterien, die sich auf die Sammlung der Altbatterien mit teilweise hohem Gefahrenpotential spezialisiert haben und im Auftrag mehrerer Hersteller Altbatterien sammeln und der stofflichen Verwertung zuführen.

5.1.4.5 Verbundwerkstoffe

Für Verbundwerkstoffe (CFK & GFK), SEE sowie Bau- und Abbruchabfälle existieren keine spezifischen Abfallschlüsselnummern. Eine getrennte Erfassung der Verbundwerkstoffmenge in CFK und GFK ist aktuell rechtlich nicht gefordert. Dennoch kann aufgrund von technischen Anforderungen eine Trennung erfolgen. Betrachtet man den Aufbereitungsprozess zur stofflich energetischen Verwertung von GFK in Zementwerken (siehe Abschnitt 5.2.1.5), muss CFK als Störstoff abgetrennt werden. Erfolgt diese Trennung nicht, können die Stoffgruppen GFK und CFK aufgrund ihres Kunststoffanteils den Kunststoffen (17 02 03) zugeordnet werden. Eine belastbare statistische Darstellung der anfallenden Abfallmengen ist somit nicht möglich. Verbundwerkstoffe GFK und CFK sind aktuell grundsätzlich als nicht gefährliche Abfälle eingestuft. Erst durch eine Behandlung können Stäube oder lungengängige Partikel entstehen. Eine Konkretisierung und Ergänzung der allgemein geltenden Anforderungen des KrWG in Bezug auf Getrennthaltung oder Umgang, wie es z.B. im BattG oder in der AltöIV dargestellt ist, gibt es für Verbundwerkstoffe nicht.

5.2 Technologischer Status

Für Metalle und Baustoffe haben sich seit langer Zeit Recyclingverfahren etabliert. Entsprechende Materialien, die beim Rückbau von WEA anfallen, richten sich aufgrund Ihrer im Verhältnis zu vorhandenen Mengenströmen geringen Anfallmengen an den Möglichkeiten und Grenzen vorhandener Recyclingwege aus.

Ebenso sind Aufbereitungs- und Entsorgungswege für die laut Abfallrecht als gefährlich eingestuften Stoffgruppen wie z.B. Betriebsflüssigkeiten und SF₆, vorhanden.

Aufgrund des mengenmäßigen Anteils einer WEA und des nahezu sortenreinen Anfalls wurden in den letzten Jahren diverse Verwertungswege für GFK erschlossen. Für CFK sind bereits Verfahren (Pyrolyse) für Abfälle aus dem „post-production“ Bereich der Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie

umgesetzt, die aber noch nicht kostendeckend arbeiten und zu verschlechterten Materialeigenschaften führen.

Für die durch Rückbaumaßnahmen anfallenden Stoffgruppen einer WEA sind die entsprechenden Verwertungs- und Entsorgungswege vereinfachend in Anhang G dargestellt. Die rot gekennzeichneten Kästchen sind gefährliche Abfälle.

Nachfolgend werden die Entsorgungsverfahren für die wesentlichen Abfallströme vorgestellt. Ausführungen zu 7.2.2 sind als inhaltliche bzw. aktualisierte Ergänzungen zu den Ausführungen von Kapitel 2.2.2 zu verstehen.

5.2.1 Einzelne Stoffströme

5.2.1.1 Gefährliche Abfälle

Betriebs- und Schmiermittel

Betriebsflüssigkeiten werden im Rahmen von Vorbereitungstätigkeiten zum Rückbau selektiv erfasst.

Verwertungsanlagen für Altöle lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Anlagen zur Aufbereitung und Anlagen zur sonstigen stofflichen Verwertung. Aufbereitungsanlagen verfolgen das Ziel, aus Altölen Basisöle (Ausgangsprodukt zur Herstellung von Schmierstoffen) durch Raffinationsverfahren herzustellen, bei denen insbesondere die Abtrennung der Schadstoffe, der Oxidationsprodukte und der Zusätze erfolgt. Die sonstigen stofflichen Verwertungsverfahren sind Verfahren (Destillation, andere Raffination), die als Hauptziel die Herstellung von z. B. Fluxölen, Heizölen (sog. DIN-Öle) und Schiffsdiesel oder die energetische Verwertung haben. Im Jahr 2016 wurde von Destatis sieben Anlagen erfasst, die eine stoffliche Verwertung durchführen und eine Menge von 464.100 t Altöl umsetzten.

SF₆

Das zurückgenommene Gas wird in der Regel in Aufbereitungsanlagen zu Neugas aufbereitet. Zersetzungsprodukte, die nach der Entnahme der Gasfüllung im Gasraum verbleiben, müssen in einem speziellen Reinigungsverfahren durch eine Fachfirma unschädlich gemacht werden. Gereinigte Geräte können anschließend als nicht gefährlicher Abfall verwertet werden. Die zu entsorgenden Gase und Zersetzungsprodukte werden in der Verbrennung entsorgt.

5.2.1.2 Mineralische Abfälle

Mineralische Abfälle fallen beim Rückbau von WEA im Turm sowie im Fundament als Verbundmaterial (Stahl-Beton) sowie in bereits gebrochener Form als Gesteinskörnungen in den Kranstellflächen sowie den Zuwegungen an.

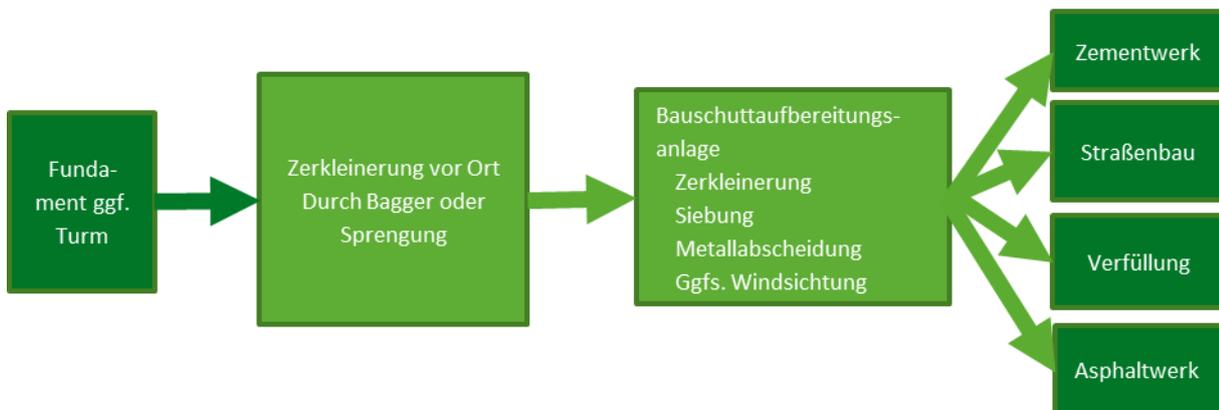
Entsorgungsketten von mineralischen Abfallströmen unterscheiden sich aufgrund ihrer deutlich niedrigeren Werthaltigkeit und der hohen Verfügbarkeit von primär gewonnenen Gesteinen strukturell deutlich von metallischen Abfallströmen. Konkurrenz besteht in starkem Maße zu primären Gesteinskörnungen, die in Deutschland in der Größenordnung von 250 Mio. t aus Lockergestein und rund 200 Mio. t jährlich aus Festgestein als Primärrohstoff gewonnen werden. Hingegen werden Gesteinskörnungen aus Sekundärrohstoffen nur zu 100 Mio. t jährlich eingesetzt. Transportkosten tragen aufgrund der insgesamt nur geringen Wertigkeit der Sekundärrohstoffe zu einem überproportionalen Kostenfaktor bei, weshalb für mineralische Abfälle nur regionale Märkte bestehen, mit entsprechenden Konsequenzen für die Struktur der Entsorgungswege: Abbruch und Transport zur Aufbereitungsanlage erfolgen i.R. durch das gleiche Unternehmen, während die Vermarktung der Sekundärrohstoffe durch den Aufbereiter vorgenommen wird. Überregionale Zentren existieren nicht bzw. ein Export von recycelten Gesteinskörnungen in das Ausland findet nicht statt. Der Markt für entsprechende Recyclingbaustoffe ist umso schwieriger, je geringer der lokale Bedarf an Baustoffen und je höher die lokale Gewinnungstätigkeit aus primären Lagerstätten ist.

Altbeton

Der Rückbau der betonhaltigen WEA-Komponenten (Turm, Fundament) erfolgt durch Bagger, Sprengung oder Abrissbirnen (nur Turm). Vor Ort wird der demontierte Betonturm durch z. B. Baggertätigkeit in seine Bestandteile aufgetrennt. Anschließend wird das Material in Recyclinganlagen behandelt (siehe Abbildung 41).

In mobilen oder stationären Bauschutt-Aufbereitungsanlagen werden durch Zerkleinerung, Siebklassierung, Metallabscheidung sowie ggfs. Windsichtung Gesteinskörnungen produziert, die als Untertragschichten im Straßenbau eingesetzt werden. Technische Ansätze wie auch vorhandene Normen lassen grundsätzlich aber eine höherwertige Verwertung dieser Abfallfraktion grundsätzlich zu, wobei deren Wirtschaftlichkeit aufgrund der geringen Werthaltigkeit zu hinterfragen ist.

Abbildung 41: Fließschema Aufbereitung Beton



Quelle: (Ramboll)

Schotter

Rückgebauter Schotter aus Bauschutt-Aufbereitungsanlagen kann prinzipiell als Schotter wiederverwendet werden. Ausnahme hierfür kann die mangelnde Umweltverträglichkeit des Schotters sein, bspw. es kann bei älteren Windparks vorkommen, dass Kranplätze mit Schotter aus Schlacken angelegt wurden. Hierzu sind projekt- bzw. bundeslandspezifische Vorgaben zu beachten.

5.2.1.3 Metallische und metallhaltige Abfälle

Metallische Anteile finden sich im Rotorblatt, im Gondelgehäuse, im Antriebsstrang, im Turm, im Fundament sowie in Batterien, Akkus, Transformatoren, in der Elektronik bzw. Elektrogeräten sowie in Verkabelungen.

Aufgrund der hohen Werthaltigkeit und guten Recyclingfähigkeit von Metallabfällen haben sich in Deutschland Verwertungsketten etabliert, die im Gegensatz zu rezyklierten Baumaterialien unabhängig von regionalen Gegebenheiten und mehrstufig strukturiert sind. Sogenannte Schrotthändler übernehmen in der Fläche dabei die Sammlung und die Vorbehandlung der anfallenden Abfallströme. In überregionalen Behandlungszentren werden durch steigende Behandlungsintensität in Shredder- oder Scherenanlagen die Stoffströme z.B. nach Metall- und Legierungskomponenten homogenisiert bzw. getrennt sowie chargier fähig gestaltet. Angestrebt wird nach vorhandenen technischen Möglichkeiten sowohl in der Fläche als auch in den Behandlungszentren eine Maximierung der Wertschöpfung durch Konfektionierung der Stoffströme in die Hauptgruppen Stahl, Aluminium und Buntmetalle, wobei wegen mangelnder metallurgischer Eignung die Buntmetallfraktionen aluminiumfrei sein sollten und keine NE-Metalle in die Stahlroute gelangen sollten.

Stahlschrott

Stahlschrott findet sich vorrangig im Arbeitsstrang der Gondel, im Turm entweder z.B. je nach Bauweise als Stahlbeton, Bewehrungsstahl, im Fundament (Stahlbeton, Bewehrungsstahl und geringe Mengen an verzinktem Stahl) sowie in der Elektronik sowie in Elektrogeräten. Großformatige Stahlbauteile werden i.R. durch Schrottscheren oder Brenner an der Anfallstelle in transportfähige Stücke zerlegt, damit ein Fahrzeugtransport nach Straßenverkehrsordnung zulässig ist (Beachtung zulässiger Längen-, Breiten-, Höhenmaße und Einhaltung des maximal zulässigen Gesamtgewichtes). Durch Einsatz von Baggern kann z. B. ein demontierter Betonturm vor Ort in Stahl und mineralischer Matrix vorsepariert werden, wodurch die Produkte relativ sortenrein den spezifischen Verwertungsrouten Stahl und mineralische Abfälle zugeführt werden können. Nach Verladung des zerlegten Stahlschrotts wird dieser entsprechend zunächst in der logistischen Abfolge Schrotthändler (regional) Behandlungszentrum (überregional) nach Sorten konfektioniert und ggfs. für die geforderte Chargierfähigkeit (Stückigkeit, Schüttdichte) weiter vorbehandelt. Im Vergleich: kleinformatige Bauteile werden im Regelfall nicht vor Ort, sondern in den metallhandelnden Betrieben demontiert (vgl. Abbildung 42).

Die metallurgische Aufbereitung von Stahl erfolgt heutzutage entweder nach dem Sauerstoffstahl-Verfahren/Linz-Donawitz (LD)- oder dem Elektrostahl-Verfahren. Beim LD-Verfahren wird flüssiges Roheisen aus Erz erzeugt („Integriertes Hüttenwerk“) und anschließend das Roheisen reduziert. Stahlschrott wird hierbei als Kühlmittel eingesetzt und ist auf etwa 25 % der Gesamtcharge zu begrenzen. Im Gegensatz dazu wird beim Elektrostahl-Verfahren Stahlschrott als Hauptrohstoff (bis zu 100 %) eingesetzt. Sollte keine Sortenreinheit bzgl. Legierungsbestandteile im Input gewährleistet werden können, werden im Vergleich zu Primärware schlechtere Güteklasse erzeugt („Downcycling“).

Abbildung 42: Prozesskette Stahlschrott-Recycling



Quelle: (Ramboll)

Aluminiumschrott

Aluminium (AL) findet sich in WEA i.W. im Gehäuse (Gondel und Arbeitsstrang), in Einbauten von Hybrid- und Betontürmen sowie in Elektrogeräten und Elektronik. Wie in Kapitel 4 bereits dargestellt, erfordern die schwierigen schmelzmetallurgischen Eigenschaften von Al-Schrotten für eine hochwertige stoffliche Verwertung die weitgehende Entfernung von Fremdmaterial, Beschichtungen und Anhaftungen sowie eine Lenkung der Stoffströme in Knet- und Gusslegierungen, die nicht an der Anfallstelle, sondern in den spezialisierten Betrieben auf regionaler und überregionaler Ebene vorgenommen werden.

Art und Umfang der mechanischen Aufbereitung als erforderliche Vorkonditionierung wird dabei von der stofflichen Heterogenität des Abfallstroms bestimmt. Bei heterogenen Abfallstoffen erfolgt die Voranreicherung eines NE-Konzentrates ggfs. nach Aufschluss und Abscheidung von Fremdstoffen durch die verfahrenstechnische Abfolge Magnetscheidung und Wirbelstromscheidung. Die Abtrennung von leitfähigen Schwermetallen aus dem Wirbelstromscheiderprodukt (z. B. Cu, Pb, Ms, Sn) erfordert eine nachfolgende Sortierung, z. B. in Schwertrüben oder durch Röntgentransmission (XRT), ggfs. auch nach Farbe, sofern die Oberflächen „blank“ sind, um anschließend die Stoffströme getrennt der Aluminium- und Buntmetallroute zuzuführen.

Eine Auftrennung von Al nach Guss- und Knetlegierungen ist inzwischen durch sensorbasierte Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy (LIBS) möglich. Die heutigen technischen Möglichkeiten lassen sogar eine Separierung von 5xxx und 6xxx Legierungen (unterschiedliche Mg und Si-Gehalte), z. B. für

Produktionsabfälle im Bereich der Automobilerzeugung, zu (Heinrichs 2018). Aufgrund der hohen Kosten für LIBS sind derzeit aber nur wenige Anlagen verfügbar.

Anschließend werden die gewonnenen Vorkonzentrate in Schmelzhütten weiterverarbeitet. Dabei erfolgt die Verarbeitung von Gusslegierungen bzw. Schrotten starker Verunreinigung in Refinern (Schmelzhütten) in Salzbadsmelzen, z. B. im Drehtrommelofen. Die Reaktion erfolgt unter der Salzdecke (NaCl/KCl/CaF₂-Gemisch). Je unreiner dabei die Schrottqualität ist, desto mehr Primäraluminium muss verarbeitet werden. Erzeugt wird ein Aluminium in hoher Qualität, allerdings fallen pro Tonne Al ca. 500 kg Salzschlacke an, die entsorgt werden müssen.

Bei der Umschmelzung im Remelter werden hingegen sortenreine Knetlegierungen verarbeitet. Der Schmelzprozess findet dabei i.d.R. in salzarmen Schmelzen statt. Das Zweikammer-Verfahren mit Vorherd und Schmelzofen eignet sich für lackierte, verölte und dünnwandige Schrotte, nutzt den Energiegehalt der Schwelgase für den Schmelzprozess und die Chargenvorwärmung und führt im Ergebnis zu geringen Metallverlusten, da das Einschmelzen nahezu unter Luftabschluss stattfindet. Weiterer Vorteil des Zweikammer-Verfahrens ist die vollständige Erfassung und Reinigung aller im System anfallenden Gase.

Für Al-haltige Verbundstoffe eignet sich besonders das Pyrolyse-Blankglühen-Schmelzen. Kennzeichen des Verfahrens ist die Kombination von Pyrolyse und Verbrennung. Vorteilhaft sind aufgrund des Luftabschlusses geringe Metallverluste und die vollständige Erfassung und Reinigung aller im System anfallenden Gase. Nachteilig ist der erhebliche Prozessaufwand, der das Verfahren ca. 10 % teurer als herkömmliche Verfahren macht.

Kupferschrott

In WEA liegen Kupferschrotte vorrangig in hoher Reinheit (Schaltregler, Generatoren, Kabel, Drähte, Kontakte) vor. Problematisch ist die Anreicherung von Kupferdrähten durch Wirbelstromscheidung, da in den nahezu eindimensionalen Körpern keine – für eine Trennung erforderlichen – magnetischen Wechselfelder ausgebildet werden. Hierzu ist zunächst eine Formänderung („Verkuglung“), z. B. durch gezielte Zerkleinerungswirkung, vorzunehmen.

Für die in WEA eingesetzten Bauteile wie z.B. Generatoren oder Transformatoren reicht häufig eine Demontage der Cu-haltigen Bestandteile aus. Ist dies nicht möglich, wie z. B. bei Elektromotoren, erfolgt die Routenführung nach ausschließlich wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In diesem Falle wird der Elektromotor aufgrund der höheren Werthaltigkeit der Kupferraffination zugeführt, Eisenmetalle werden als Verlust durch Überführung in die Schlacke beim Schmelzprozess akzeptiert.

Der metallurgische Schmelzprozess im Remelter ermöglicht eine Anreicherung des Cu auf >95%, wobei Kupferschrott als Kühlschrott zugegeben wird. Nach der Verarbeitung im Remelter wird im Anodenofen und der Raffinationselektrolyse eine Reinheit > 99,9 % Cu erzeugt. Der Anteil an Altkupfer an der Kupferproduktion beträgt heute ca. 40 %, durch die problemlose Beimischung existieren für Cu keine separaten Recyclingrouten. Insbesondere beim Einsatz von Altkupfer können zudem wertvolle Begleitmetalle (z. B. Edelmetalle, Blei- und Zinklegierungen, Selen) zurückgewonnen werden.

5.2.1.4 Batterien und Akkumulatoren

Je nach Herstellungsart und Zusammensetzung stehen für Altbatterien unterschiedliche Verwertungsverfahren zur Verfügung. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Die umweltschonende Entsorgung von gefährlichen Bestandteilen, wie z.B. Blei, Cadmium und Quecksilber, wie auch die Rückgewinnung von werthaltigen Komponenten. Sofern die Altbatterien als Gemische erfasst wurden, werden sie zunächst nach chemischen Batteriesystemen sortiert und anschließend einem stofflichen Verwertungsprozess zugeführt, z.B. zum Recycling im Hochofen oder im Drehrohrofen. Insgesamt gibt es in Deutschland ca. 20 Recyclingbetriebe von Altbatterien,

beispielsweise zum Recycling von lithiumhaltigen Altbatterien, Blei-Altbatterien und Nickel-Cadmium-Altbatterien. Die im jeweiligen Verwertungsprozess erreichten Recyclingeffizienzen werden dem UBA jährlich übermittelt. Die Ergebnisse des Jahres 2017 zeigen (UBA, 2018), dass ein hoher Anteil der Wertstoffe in Altbatterien effizient wiedergewonnen wurde und Deutschland alle von der EU festgelegten Mindestziele für das Sammeln und Recyceln von Altbatterien erreichte. Für das Jahr 2017 wurden – entsprechend der Methodik der Recyclingeffizienzverordnung (EU) 493/2012 – folgende durchschnittliche Recyclingeffizienzen erzielt:

- Verfahren der Recyclingbetriebe von Blei-Säure-Batterien: 84,7 %,
- Verfahren von Nickel-Cadmium-Batterien: 79 % und
- Verfahren von sonstigen Batterien: 82,6 %.

Unter die Kategorie „sonstige Batterien“ fallen insbesondere Alkali-Mangan-, Zink-Kohle-, Lithium- und Lithium-Ionen-Altbatterien.

5.2.1.5 Verbundwerkstoffe

GFK finden sich in WEA in Rotorblättern (hauptsächlicher Anteil) sowie in der Rotornabe, dort gemeinsam mit Stahl und Elektrokomponenten. Das deutlich hochpreisige CFK wird derzeit vorrangig in langen Rotorblättern einiger Hersteller als Stabilisierungselement eingesetzt.

Aufgrund des unterschiedlichen Mengenanfalls, der chemischen Zusammensetzung in Verbindung mit einem unterschiedlichen Prozessverhalten und monetärer Wertigkeit existieren für GFK und CFK unterschiedliche Verwertungsoptionen, die bei allen bislang umgesetzten Verfahren zu einem mehr oder weniger starkem Downcycling führen.

GFK

Der derzeitige Status zu den Möglichkeiten der Verwertung von GFK-Abfällen ist zusammenfassend in Tabelle 4 in Kapitel 2.2.2 dargestellt.

In Verbindung mit einer ökonomischen Wertigkeit, die für GFK deutlich niedriger als für CFK liegt, kann die energetisch/stoffliche Verwertung in der Zementherstellung als ökologisch vorteilhaft eingeordnet werden.

Anwendungen für recyceltes GFK beschränken sich bislang auf eine einfache mechanische Aufbereitung (Erzeugung von Füllstoffen für den Straßenbau) die Verbrennung in MVAs mit den Herausforderungen eines hohen, zu deponierenden Aschegehaltes von bis zu 60 % (Milchert 2017, 33) und der daraus resultierenden Verstopfungsgefahr der AbluftreinigungsfILTER (Pehlken 2015) sowie der o.g. energetisch/stofflichen Verwertung von GFK-Abfällen in Zementwerken. Eine erfolgreiche Umsetzung zeigt die Kooperation der dänischen Firma Fiberline Composites A/s (Profilhersteller), der Firma Zajons Zerkleinerungs GmbH, Melbeck sowie des Schweizer Zementherstellers Holcim AG. Zajons zerkleinert die GFK-Abfälle und passt durch Zusatz additiver Abfallströme den Brennwert, Feuchte und Aschegehalt an. Die Holcim AG nutzt den auf diese Weise konfektionierten Abfallstrom zur Zementherzeugung, wobei die Mineralik als Zementmasse und die organischen Komponenten als EBS genutzt werden (Jensen 2018).

Die Firma Neocomp GmbH hat sich dem Konsortium angeschlossen und betreibt in der Nähe von Bremen eine GFK-Aufbereitungsanlage. Der aktuelle Durchsatz der Anlage liegt bei 25.000 Mg/a. Dabei liegt der Anteil von GFK aus Rotorblättern bei ca. 20 %. Eine Erweiterung der Anlagenkapazität auf ca. 50.000 Mg/a wäre nach Betreiberangaben durch eine zweite Prozesslinie realisierbar. Nach erfolgtem Rückbau werden die Blätter vor Ort in transportfähige Stücke zerlegt und Störstoffe, wie z.B. CFK-Gurte entfernt. Zum Materialaufschluss werden Schrottscheren verwendet (Jensen 2018).

In der Aufbereitungsanlage werden die vorzerkleinerten GFK-Stücke zusammen mittels Kammwalze und nachgeschaltetem Querstromzersetzer auf die gewünschte Korngröße zerkleinert (vgl. Abbildung 43). Eingesetzt in der Zementklinkerindustrie, können diese durch Zusatz von Ersatzbrennstoffe (hier: Spuckstoffe aus der Papierindustrie) einerseits fossile Brennstoffe ersetzen und somit Energie liefern und andererseits Rohstoffe wie Quarzsand substituieren. Dies ermöglicht der in den Glasfasern enthaltende Siliciumdioxidanteil: bei der Verbrennung der Fasern entsteht Siliciumoxid, welches den Sand im Zement substituieren kann (Jensen 2018). Damit können Siliciumdefizite bei der Zementherstellung, welche an ungünstigen Standorten für Zementwerke auftreten, überwunden werden.

Hinsichtlich der Entsorgung ist für GFK zu vermuten, dass derzeit der überwiegende Teil einer energetischen Verwertung zugeführt wird. Aufgrund mangelnden Datenmaterials kann diese Aussage aber nicht quantifiziert werden. Der Vorteil der konventionellen energetischen Verwertung besteht darin, dass Anteile von Nichteisenmetallen in den Rotorblättern zurückgewonnen werden können.

Des Weiteren gibt es Forschungsansätze zur elektrodynamischen Fragmentierung, mit welcher Kunststoff, Glasfasern sowie Nichteisenmetalle zurückgewonnen werden könnten. Die Verfahren befinden sich jedoch noch im Forschungsstadium und es ist vollkommen unklar, ob die Verfahren die zu erwartenden Mengenströme einmal effektiv bewältigen können (Seifert & Thome 2014; Oliveux & Dandy 2015a; Wieberneit 2015; Pestalozzi 2018; Mativenga & Shuaib 2016).

Abbildung 43: GFK Abfälle vor (l.) und nach (r.) der Aufbereitung



Quelle: (Ramboll)

CFK

Der Verbundwerkstoff CFK besitzt derzeit nur eine geringe Mengenrelevanz und wird in WEA nur in bestimmten Rotorblättern als Stabilisierungselement in longitudinaler und radialer Richtung verwendet (Brøndsted & Lilholt 2005). Für den Aufbereitungsprozess des GFKs ist CFK ein Störstoff und wird bei der Zerlegung des Rotors abgetrennt. Das Identifizieren und Aussortieren des CFK-Materiages gestaltete sich jedoch häufig als schwierig, da sich die Lage je nach Rotortyp und je nach Einarbeitung (Reinform oder Hybridbauweise) unterscheiden kann. Die Identifizierung des CFK-Anteils erfolgt bis dato subjektiv durch die Erfahrung des Personals oder durch „trial and error“ vor Ort.

Andererseits verfügt CFK über einen deutlich höheren Marktwert als GFK. Weil technologisch umsetzbar und aufgrund des hohen Marktwertes, werden Carbonfasern aus post-production Abfällen inzwischen in zwei europäischen Anlagen (CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG, Stade, ELG Carbon Fibre Ltd, Coseley, UK,) durch Pyrolyse zurückgewonnen. CFK-Bauteile in duroplastischer Matrix können zu Halbzeugen oder Maschinenteilen verarbeitet werden. Die Firma Technokon hat ein entsprechendes Verarbeitungsverfahren entwickelt, wonach durch den Abriss von WEA gewonnenes CFK zu Zug-/Druckstäben, Stützen, Trägern, Achsen, Paneelen und anderen Halbzeugen verarbeitet wird (Technokon).

Die grundsätzlichen derzeitigen Verwertungswege von CFK sind Tabelle 5 in Kapitel 2.2.2 zusammengeführt (Limburg & Stockschläder 2017a; Limburg & Stockschläder 2017b; Limburg & Quicker 2016; Weißhaupt 2018).

5.3 Suboptimale Entsorgungswege

5.3.1 Einführung

Abfallströme aus dem WEA-Rückbau umfassen metallische, mineralische und Verbundwerkstoffe ebenso wie Flüssigkeiten. Sowohl für gefährliche Stoffe (SF_6 , Betriebsmittel) als auch für Stahl, die NE-Metalle Kupfer und Aluminium, Batterien, mineralische Abfälle wie Betonabbruch und Schotter existieren etablierte vorgenannte Entsorgungswege. So werden z.B. abfallhaltige Metallströme aus Stahl und NE-Metallen aufgrund Ihrer monetären Wertigkeit und der guten Recyclingfähigkeit i. R. hochwertig recycelt. Ausnahme hierzu bilden SEE, bei denen sich ein Recycling, bedingt durch komplexe Vergesellschaftung des Wertstoffmetalls, geringe Gehalte, derzeit niedrige Rohstoffpreise und Anfallmengen sowie wegen des beträchtlichen Aufwands durch Entmagnetisierung vor dem Ausbau nicht wirtschaftlich darstellt.

Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen ist grundsätzlich etabliert, aber lokal ausgerichtet und steht je nach geologischer Situation und lokaler Nachfrage nach Baumaterialien in Konkurrenz zu primären Gesteinskörnungen. Nach dem Stand der Technik führt die Aufbereitung begrenzter Tiefe zu einer verringerten Qualität der Gesteinskörnungen, wodurch ein gleichwertiger Einsatz, z. B. im Tief- oder Hochbau, ausgeschlossen ist.

Aus Pyrolyseprozessen zurückgewonnene Carbonfasern unterliegen Qualitätseinbußen z. B. mit Blick auf reduzierte Zugfestigkeiten und kürzere Faserlängen. Auch können sich Produktverunreinigungen negativ auf die erzeugte Qualität auswirken. Das stoffliche Recycling von CFK erfordert daher derzeit nicht nur geeignete Verfahren, sondern auch homogene und qualitativ ähnliche Abfallströme (Weißhaupt 2018). In der thermischen Behandlung kann es zudem zu einer ungewollten Verkürzung und Absplitterung von Fasern kommen. Es wird vermutet, dass diese Faserbruchstücke ähnliche Eigenschaften wie Asbestfasern besitzen und damit zu einer Gesundheitsgefährdung für das Betriebspersonal werden. Die Leitfähigkeit von Carbonfasern kann außerdem zu negativen Auswirkungen auf elektrostatische Partikelabscheider führen.

5.3.2 Ausgewählte Stoffströme

5.3.2.1 Altbeton

Grundsätzlich könnte Altbeton auch höherwertiger recycelt werden. Allerdings stellt sich dessen Recycling als wesentlich aufwändiger dar als für die bestehenden Recyclingrouten für Produktionsabfälle aus Betonwerken: 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; zur Vermeidung von Schwindrissen beim Aushärten muss zudem RC-Beton durch Abdecken, Feuchthalten oder Berieseln nachbehandelt werden (BauNetz Media 2018). Während Produktionsabfälle am Standort des Betonwerkes in Recyclinganlagen recycelt werden, entstehen beim Rückbau aus WEA zudem zusätzliche Kosten für das Stückigmachen sowie den Transport des Materials zur Behandlungsanlage.

Obwohl in einem Forschungsprojekt der BTU (Spyra 2010) u.a. die Vergleichbarkeit der untersuchten RC-Betone mit Normalbeton nachgewiesen werden konnte und auch entsprechende RC-Beton-Normen vorliegen, hat sich dieser Baustoff in Deutschland bisher nicht im Markt etablieren können (Spyra 2010). Als Hauptgrund nennt beispielsweise das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr in Baden-Württemberg eine mangelnde Wahrnehmung bzw. Akzeptanz von RC-Beton bei Architekten und Bauingenieuren (Spyra 2010). Erschwerend ist die vorgenannte lokale

Konkurrenzsituation, wenn ein genügendes Angebot an primären Gesteinskörnungen vorliegt bei nur geringer Bauaktivität.

5.3.2.2 Verbundwerkstoff: CFK

Die Verwertungswege für CFK stellen ein Downcycling der Faserverbunde dar, da diese als Substitut für Energieträger oder für Additive eingesetzt und nicht als Bauteile wiederverwendet werden. Einen Überblick über den Status quo der aktuellen CFK-Verwertungsverfahren geben die Artikel der Autoren (Oliveux & Dandy 2015a; Rybicka & Tiwari 2016; Seiler & Stark 2016). Die Verwertung von CFK-Abfällen birgt technische, gesundheitliche Risiken sowie qualitative Herausforderungen.

Aufgrund ihrer hohen Energiedichte sind Carbonfasern nur unter extremen Bedingungen verbrennbar. Für eine vollständige Verbrennung der Fasern spielen die Temperatur und die Verweilzeit eine zentrale Rolle. Die Aufenthaltszeit in den heißen Zonen einer MVA ist in der Regel zu kurz (Limburg & Quicker 2016). Bei einer Verbrennung von CFK-Abfällen in einer MVA werden aufgrund des hohen Kohlenstoffanteils nur ca. 40% des Ausgangsmaterials umgesetzt, ca. 60 % verbleiben als Asche zurück (Larsen & Sonderberg Petersen. 2014). Aktuell gibt es eine Sondermüllverbrennungsanlage in Deutschland, die CFK Abfälle verbrennt (Limburg & Stockschläder 2017b).

Die elektrische Leitfähigkeit von CFK-Stäuben kann innerhalb der Anlagen zu Kurzschlüssen, Stromausfällen oder Bränden führen, insbesondere in elektrostatischen Partikelabscheidern (Schmidl & Hinrichs 2010; Limburg & Quicker 2016). Es bestehen weiterhin noch nicht hinreichend geklärte gesundheitliche Risiken, da bei der thermischen Behandlung von CFK-lungengängige Partikel entstehen könnten (Limburg & Stockschläder 2017a; Limburg & Stockschläder 2017b; Weißhaupt 2018). Die Wiederverwendung der Fasern ist abhängig von der Faserlänge. Bei der Verwertung ist darauf zu achten eine Faserverkürzung zu vermeiden, da dies zu einer Verschlechterung der Steifigkeit und Zugfestigkeit führen kann (Limburg & Stockschläder 2017a; Limburg & Stockschläder 2017b; Weißhaupt 2018).

Zur Konzipierung einer effizienten und wirtschaftlichen Verwertungskette bilden Statistiken über Mengen, Anfallorte und Zusammensetzungen eine wichtige Grundlage. Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, stellen die Spezifikationen der Hersteller noch keine Garantie für eine exakte Übersicht über die verbauten Mengen dar. Das Gewicht eines Rotorblattes kann im Einzelfall um bis zu 15 % von den Spezifikationen abweichen.

5.4 Potentialverbesserung

Potentialverbesserungen suboptimaler Verwertungswege erfordern technologische Weiterentwicklungen. Forschungsrelevante und technologieadaptierte Themen wurden bzw. werden für die Stoffströme Altbeton, CFK und SEE erarbeitet.

5.4.1 Altbeton

Um dem im Altbeton vorhandenen Kies wieder als Zuschlag bzw. Zusatz im Frischbeton einzusetzen, wurde vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) mit der elektrodynamischen Fragmentierung ein Verfahren entwickelt, das den Altbeton in die Komponenten Zuschläge und Zementsteinmasse zerlegt. Die Zerkleinerungswirkung beruht auf Schockwellen, die durch gepulste Funkenentladungen entstehen und über ein flüssiges Trägermedium auf das Material übertragen werden. Durch diese kurzen, aber heftigen mechanischen Stöße werden gezielt Schwachstellen im Material angegriffen: Die Trennung erfolgt an makroskopischen Verbindungsstellen oder an mikroskopischen Grenzflächen (Korn- oder Phasengrenzen) (Bokelmann & Hartfeil 2017) wodurch eine Fragmentierung am Bruchgefüge zwischen Kies und Zementsteinmasse erreicht und somit die „Verwachsung“ aufgeschlossen wird, was die Voraussetzung für die anschließende Separierung von Kies,

Zementsteinmasse und anderen Bestandteilen wie z.B. Stahlfasern im Stahlbeton, darstellt. Auch für den Aufschluss von CFK-haltigen Verbunden soll das Verfahren geeignet sein (Bokelmann & Hartfeil 2017; Roux & Eguémann 2016).

In einer Laboranlage können bereits mehrere Tonnen Altbeton pro Stunde aufbereitet werden (Krauß & Werner 2016). Eine marktreife Anlage mit einem Durchsatz von über 20 Tonnen pro Stunde wurde für 2014 erwartet (Thome 2018). Ergebnisse hierzu sind aber bis dato nicht veröffentlicht. Somit sind auch keine Daten zur Energiebilanz des Verfahrens verfügbar (Wieberneit 2015).

Innerhalb des Forschungsprojektes r3-Grenzflächen der Bauhaus Universität Weimar wurde der Aufschluss von Bauverbundstoffen, u.a. von Gesteins- und Zementkörnung, durch thermische Spannungen mittels Mikrowellen im Labormaßstab untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Aufschluss durch Mikrowellenstrahlung zwar grundsätzlich möglich ist, dass dieser jedoch nicht vollständig an den Phasengrenzen erfolgt. Das Projekt wurde im Juni 2016 beendet (Bauhaus-Universität Weimar 2013-2016; Weis 2018).

5.4.2 Verbundwerkstoff: CFK

Bei den industriell umsetzbaren Methoden für eine Verwertung von CFK stellt die Pyrolyse für post-production Abfälle die derzeit beste Möglichkeit einer Verwertung dar, etablierte Verwertungswege durch kostentragende Verfahren bestehen jedoch zurzeit noch nicht. Wegen der prozessbedingten qualitativen Verschlechterungen u.a. bzgl. Faserlängen, Reinheiten und Werkstoffeigenschaften fokussieren sich Forschungsarbeiten verstärkt auf die Weiterentwicklung der Pyrolyse, alternative Ansätze wie z. B die Nutzung von Produktionsabfällen bei der CFK-Bauteilherstellung (Verbundvorhaben MAI RecyTape), die mechanische Auftrennung der Verbunde (elektrodynamische Fragmentierung, (Thome & Karlstetter 2018) vgl. Altbeton), chemische (siehe Kapitel 4) sowie biotechnologische Behandlung stehen dabei im Fokus.

Möglichkeiten und Grenzen der chemischen Verfahren sind in Kapitel 4 aufgeführt worden. Grundsätzlich wird ein Potential für eine industrielle Umsetzung vermutet, das aber bis dato noch nicht umgesetzt worden ist (Weißhaupt 2018; Meiners & Eversmann 2014, Umweltbundesamt 2016; Prinçaud & Aymonier 2014; Oliveux & Dandy 2015b).

Am Hohenstein Institut wird die Verstoffwechslung von Kunststoffen durch Mikroorganismen untersucht. Bei dem angestrebten technologischen Abbau sollen z.B. Polyetherharze durch biochemische Prozesse umgesetzt werden, sodass nur die Carbonfaser zurückbleibt. Das Projekt startet in 2018.

Forschungskooperationen zum CFK-Recycling wurden bzw. werden in Deutschland ferner in den Vorhaben „MAI-Recycling“ (2012-2015) (Kreibe 2016) sowie „MAI-UCB“ (2016-2017), ReLei (2014-2018) durchgeführt und behandelten pyrolytische, solvolytische und elektrohydraulische Behandlungsweisen für duroplastische Werkstoffe sowie die Entwicklung von Verarbeitungsverfahren für rezyklierte Carbonfasern (Weißhaupt 2018).

5.4.3 SEE

Im Projekt SEMAREC wurde bis April 2018, aufbauend auf dem Vorgängerprojekt MORE, das *hydrometallurgische Recycling* von demontierten NdFeB-Magneten aus Elektromotoren von Elektro- und Hybridfahrzeugen untersucht. Innerhalb des MORE-Projektes identifizierte Optimierungspotenziale in den Bereichen mechanische Aufbereitung, Hydrometallurgie sowie Raffination wurden in SEMAREC weiter untersucht. Ergebnisse hierzu werden im Herbst 2018 veröffentlicht (CUTEC 2018).

Mit dem Recycling von komplex geformten NeFeB-Magneten aus Festplatten hat sich von 2015 bis 2017 das Projekt REProMag (Resource Efficient Production of Magnets) beschäftigt. Im Gegensatz zum

Projekt SEMAREC wird keine hydrometallurgische Verwertung, sondern ein werkstoffliches Recycling angestrebt. Mittels Wasserstoffversprödung werden die Magnete zerkleinert und zu neuen Magneten verarbeitet. Hierzu wurde innerhalb des Projektes eine Pilotanlage entwickelt und errichtet. Ein EU-Folgeprojekt zur Entwicklung eines Klassifizierungs- und Kennzeichnungssystem von Magneten wurde bereits genehmigt und ist am 01.05.2018 gestartet (Burkhardt 2017).

Die Firma Hitachi aus Japan hat einen *pyrometallurgischen* Prozess entwickelt, um SEE aus Festplatten zurückzugewinnen. Nach einer Demontage der Festplatten und dem Freilegen der Magnete werden die SEE bei einer Temperatur um die 1000°C zurückgewonnen. Dieser Prozess findet ohne Einsatz von Säuren statt. Das Unternehmen Hitachi hat bereits eine Anlage im kleinsttechnischen Maßstab in Betrieb genommen, die eine Rückgewinnung von SEE mit einem Durchsatz von 40 kg Magnete pro Tag aufweist (Saeki & Akahori 2014).

Es bleibt festzuhalten, dass auch die jüngeren Forschungsergebnisse, soweit diese bekannt sind, keine wesentlichen und absehbaren Entwicklungssprünge hin zu einer zeitnahen und betriebsreifen Weiterentwicklung der nicht etablierten Verwertungsrouten für WEA in Deutschland erwarten lassen.

5.5 Recycling

Aus den Ausführungen zur Rückbaupraxis und zu den Verwertungswegen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

4. Eine stoffliche Verwertung verlangt in den technischen Prozessrouten die Erfüllung stoffspezifischer Vorgaben für den finalen Verarbeitungsprozess durch Vorkonditionierung mittels organisatorischer und technischer Maßnahmen in vorgeschalteten Prozessen.
5. Etablierte Verwertungs- und Entsorgungswege einschließlich technologischer Behandlungsmethoden existieren für gefährliche Abfälle sowie für die in WEA mengenmäßig bedeutsamen metallhaltigen und mineralischen Abfallströme (Ausnahme SEE).
6. Für GfK ist die stofflich-thermische Verwertung im industriellen Maßstab zwar nicht flächendeckend eingeführt, aber bereits industriell mit positiver Wertschöpfung lokal umgesetzt worden.
7. Die Werthaltigkeit und die Menge an Stoffströmen beeinflusst die technologischen Möglichkeiten der Vorkonditionierung und die Reichweite von Transportvorgängen.
8. Sekundärbaustoffe weisen gegenüber Metallen eine geringe Wertschöpfung auf und unterliegen i.R. einem direkten, lokalen Wettbewerb zu Primärrohstoffen.
9. Sämtliche Akteure in der Verwertungskette (Unternehmen des Rückbau-, des Transportes sowie der Konditionier- und finalen Verarbeitungsprozesse), müssen, da gewerblich ausgerichtet, kosteneffizient arbeiten.
10. Die Erfassung von Stoffströmen im Rahmen von Rückbaumaßnahmen führt zu bereits vorangereicherten Stoffströmen (siehe Anlage G), die anschließend in die spezialisierten Routen gehen.

Durch recyclinggerechtes Gestalten bzw. durch vorhandene oder verbesserte Konditionierverfahren könnten Materialverbunde detektiert bzw. besser separiert werden, wodurch durch höhere Sortenreinheit zugleich höhere Verwertungsanforderungen erfüllt werden könnten.

Ein bereits seit langem bewährtes Verfahren hierzu ist die Zerkleinerung von armiertem Stahlbeton im Prallbrecher. Durch das unterschiedliche Zerkleinerungsverhalten von spröder mineralischer Matrix und duktilem Stahl wird eine selektive Zerkleinerungswirkung erreicht; durch anschließendes Absiebung können die beiden Fraktionen voneinander separiert werden. Die entsprechenden Aufbereitungsrouten sind hierauf spezialisiert. Probleme treten bei Änderung der Zusammensetzung des Betons auf; z. B. bei Einsatz von fasermierten Beton, bei dem keine Separation der Bestandteile durch die vorherrschende Prallbeanspruchung stattfinden kann. In diesem Falle ist der

Aufbereitungsprozess kostenintensiv anzupassen und auch nur dann, wenn die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen modifizierte Technik zulassen.

Die elektrodynamische Fragmentierung von Altbeton verspricht nach Aussagen des BIP eine vollständige Separierung von Inhaltsstoffen, wodurch auch die Gesteinskörnungen wieder im Frischbeton eingesetzt werden könnten. Der Bewehrungsstahl liegt im Anschluss getrennt vor und kann einem Recyclingverfahren zugeführt werden. Die Gewährleistung der Betriebstauglichkeit des Verfahrens steht noch aus. Vor dem Hintergrund regionaler Märkte für Baustoffe allgemein und niedriger Wertschöpfung erscheint fraglich, ob das Verfahren selbst bei Nachweis der technologischen Tauglichkeit wettbewerbsfähig sein kann.

Recyclinggerechtes Konstruieren erscheint sinnvoll bei der erforderlichen Trennung von CFK-verstärkten Rotorblättern, da der bestehende Verwertungspfad für die stofflich-energetische Verwertung von GFK in Zementwerken die Abtrennung der CFK-Bauteile einfordert. Die einfachste Möglichkeit zur Unterscheidung unter Baustellenbedingungen ist eine Kennzeichnung durch unterschiedliche Farbgebung, die dem Schneidpersonal ohne den Bedarf an technischen Hilfsmitteln eine verlässliche Entscheidungshilfe für die selektive Abtrennung bietet.

Eine Alternative könnte z. B. die Verwendung des digitalen Wasserzeichens sein, die während des Herstellungsprozesses auf die Oberfläche durch bewusst herbeigeführte Pixelanordnung aufgebracht werden kann. Diese Pixelanordnungen sind für das menschliche Auge nicht sichtbar, können aber von Kameras, Smartphones und anderen technischen Geräten erkannt und ausgelesen werden. Alternativ können Oberflächen auch mit einer Oberflächenstruktur versehen werden. Mit einem digitalen Wasserzeichen können Materialinformationen (Zusammensetzung, Materialeigenschaften, und verwendete -mengen, Hinweise für das Recycling oder eine Demontage) hinterlegt und nach Verwendung ausgelesen werden.

Mangelnde bzw. ungenügende Informationen zur stofflichen Zusammensetzung sowie von Gewichten von Bauteilen sind nicht auf CFK-haltige Bauteile beschränkt, sondern sind für alle wesentlichen Baugruppen einer WEA festzustellen. Eine Offenlegung näherer Details ist aufgrund des Wettbewerbes der Hersteller untereinander nicht zu erwarten, sondern kann nur im Rahmen einer Auftragsvergabe als Ausschlusskriterium bei Nichterfüllung verhandelt werden. Dazu könnte ein standardisiertes Formular durch alle involvierten Akteure erarbeitet werden, welches nachfolgend für die Abschätzung des tatsächlichen Rückbauaufwandes, technisch wirtschaftlich, genutzt werden könnte.

Bei sonstigen Geräten (z. B. elektrischen Anlagen) erscheint hingegen ein recyclinggerechtes Design aufgrund der geforderten Funktionalitäten schwer umsetzbar oder entsprechende Vorsätze scheitern bereits an grundlegenden Aspekten, wie für SEE dargestellt.

6 Kostenprognose für Anforderungen an Rückbau und Entsorgung

Im folgenden Abschnitt wird die bestehende Kostenprognose (vgl. Kapitel 3.4) vor dem Hintergrund der Empfehlungen zu Anforderungen an Rückbau und Entsorgung sowie dem erkennbaren technologischen Fortschritt insbesondere bei der Entsorgung diskutiert (vgl. Kapitel 4 und 5). Auf dieser Diskussion aufbauend werden Fortbestand und Höhe der in Kapitel 3.4 identifizierten Finanzierungslücke prognostiziert.

Im Rahmen der Kosten- und Erlösprognose aus Kapitel 3.4 wurden Kosten für Rückbau und Entsorgung relevanter WEA- und TURM-Cluster auf Grundlage einer tätigkeitsorientierten Kostenstruktur ermittelt und anschließend saldiert. Diese Betrachtungsweise ermöglicht es, die zum jetzigen Zeitpunkt hoch unsicheren Auswirkungen der Empfehlungen zu Anforderungen an Rückbau und Entsorgung (vgl. Kapitel 4 und 5) auf die Gesamtkosten mit Hilfe einer Sensitivitätsabschätzung zu diskutieren. Als Grundlage hierfür sind in Tabelle 25 die Anteile wesentlicher Rückbau- und Entsorgungsschritte an den Gesamtkosten dargestellt²².

Tabelle 25: Anteil verschiedener Rückbau- und Entsorgungsschritten an den Gesamtkosten (ohne Berücksichtigung möglicher Erlöse) für alle WEA- / TURM-Cluster im Bestand mit 10 oder mehr Installationen

		ANTEIL GESAMTKOSTEN	
		MIN	MAX
RÜCKBAU	GESAMT	74,96%	90,42%
	Kran	21,15%	49,63%
	Fundament	13,40%	24,92%
	Abtransport	5,76%	11,85%
	Sonstige Kosten	9,06%	35,23%
ENTSORGUNG	GESAMT	9,58%	25,04%
	GFK / CFK	1,30%	15,18%
	Beton	5,98%	12,63%
	Elektroschrott	0,26%	1,36%
	Betriebsflüssigkeiten	0,10%	0,77%

Quelle: (Ramboll)

Um Ausreißer zu eliminieren wurden Kombinationen aus WEA- und TURM-Cluster mit weniger als 10 Installation aus der Auswertung eliminiert.

6.1 Rückbau

Der Vergleich der Kostenanteile von Rückbau und Entsorgung im Status quo zeigt, dass über sämtlichen betrachteten Kombinationen aus WEA- und TURM-Clustern der Rückbau zwischen 75% und 90% der Gesamtkosten verursacht, also den dominanten Kostenanteil darstellt. Eine differenzierte Betrachtung dieses Kostenanteils ermöglicht eine Abschätzung der Kostenwirkungen von Empfehlungen zum Rückbau aus Kapitel 4:

- Kran – Krankosten stellen in der Regel den größten Anteil an den Gesamtkosten da. Die für den Regelfall empfohlene Festschreibung des Rückbaus mittels Krans wurde bei der ursprünglichen Kostenprognose bereits vorausgesetzt, so dass hier aus den gegebenen Empfehlungen keine

²² Eine genaue Übersicht der Datengrundlage befindet sich in Kapitel 3 in Verbindung mit Anlage C

wesentliche Erhöhung dieser Kostenposition zu erwarten ist. Tatsächlich könnten absolute Höhe und Anteil der Krankkosten im Zeitverlauf sogar leicht sinken, da für den Rückbau zusätzlich die Kapazitäten kleinerer und für den Aufbau der heutigen größeren WEA nicht mehr geeigneten Kräne genutzt werden können. Da dieser Effekt jedoch unsicher ist, wird er bei der weiteren Diskussion nicht berücksichtigt.

- **Fundament – Neben Kabeln und Nebenanlagen** stellen Fundamente diejenigen Bauteile dar, die ohne dauerhaft sichtbare Beeinträchtigung zumindest teilweise im Boden verbleiben könnten. Die Empfehlung eines im Regelfall vollständigen Rückbaus auch der Fundamente könnte somit zunächst einen Anstieg der Rückbaukosten erwarten lassen. Tatsächlich wurde ein vollständiger Rückbau der Fundamente mittels Sprengung oder mechanischer Verfahren bereits in der ursprünglichen Kostenprognose berücksichtigt, so dass auch für Fundamente keine wesentliche Veränderung der prognostizierten absoluten Höhe bzw. ihres Anteils an den Entsorgungskosten zu erwarten ist. Auch die empfohlene Ausnahme für Pfahlgründungen hat auf Grund ihres geringen Anteils auf diese Erwartung keine wesentliche Auswirkung. Anzumerken ist, dass der Kostenanteil des Rückbaus von Fundamenten mit zunehmender Nabenhöhe ansteigt, da die Fundamentmasse überproportional ansteigt. Da die Nabenhöhe der im Zeitverlauf zurückzubauenden Anlagen tendenziell ansteigt, ist mit einer Erhöhung des Kostenanteils der Fundamente in Richtung des dargestellten Maximalwerts zu rechnen.
- **Kabel und Nebenanlagen** – Die Empfehlung eines vollständigen Rückbaus betrifft neben Fundamenten auch Kabel und Nebenanlagen. Da jedoch die Länge der rückzubauenden Kabelstrecken sowie Anzahl und Art der Nebenanlagen und damit die verursachten Kosten neben dem Windparklayout von weiteren individuellen Faktoren (z.B. Genehmigung, Wegerechte) abhängen konnte ein Rückbau der Kabel und Nebenanlagen in der Kostenprognose nicht berücksichtigt werden. In Tabelle 25 ist er entsprechend auch nicht dargestellt. Da diese Kosten bei einem vollständigen Rückbau tatsächlich jedoch anfallen werden, ist mit zusätzlichen aber moderaten Rückbaukosten zu rechnen.
- **Abtransport** – Zu Kosten für den Abtransport von WEA, Turm und Fundamentbestandteilen wurden keine Empfehlungen für zusätzliche Anforderungen gegeben. Folglich bleibt die ursprüngliche Kostenprognose für diesen Kostenanteil gültig.
- **Sonstige Kosten** – In den Bereich der sonstigen Rückbaukosten fallen z.B. Aufwendungen für das Einrichten der Baustelle, für begleitendes Personal sowie ggf. für die Sprengung von Betontürmen. Anzumerken ist, dass dieser Kostenanteil eine hohe Spreizung zwischen Minimal- und Maximalwert aufweist, da die Sprengung von Betontürmen nur für wenige WEA-TURM Kombinationen relevant ist. Der Anteil sonstiger Kosten befindet sich für Kombinationen ohne Sprengung eher in der Nähe des Minimalwerts. Zu erwarten ist, dass die sonstigen Kosten bei Umsetzung der Empfehlungen für den Rückbau leicht ansteigen. So erhöht beispielsweise die Umsetzung der formulierten Anforderungen an die Qualifikation des eingesetzten Personals sowie die Verpflichtung, Zusammensetzung und Mengen der Materialien zu kennen, die sonstigen Kosten direkt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Umsetzung der Empfehlungen zum Rückbau (vgl. Kapitel 5) die Prognose der Rückbaukosten moderat erhöhen würden. Zwar sind die meisten Empfehlungen, wie z.B. ein Rückbau im Regelfall per Kran, bereits in der Prognose abgebildet, jedoch

würden zusätzliche aber schwer zu schätzende Kosten durch die Anforderung eines vollständigen Rückbaus entstehen. Unter Berücksichtigung, dass im Bereich Rückbau kein technologischer Fortschritt zu erwartet ist, der diese zusätzlichen Kosten überkompensieren könnte, ist mindestens von Rückbaukosten entsprechend der Kostenprognose des 2. Zwischenberichts auszugehen.

6.2 Entsorgung

Im Vergleich zu den Rückbaukosten ist der Anteil der Entsorgung an den Gesamtkosten aktuell mit 10% bis 25% deutlich geringer (vgl. Tabelle 25), wobei die Gesamtkosten in den ersten Jahren des ab 2021 verstärkt einsetzenden Rückbaus auf Grund des Rückbaus zunächst überwiegend kleiner WEA leicht in Richtung Entsorgung verschoben sein werden.

Im Gegensatz zum Rückbau ist im Bereich Entsorgung jedoch mit weiterem technologischem Fortschritt zu rechnen, der die grundsätzliche Wiederverwertung einzelner Stoffe ermöglicht oder die Kosten einer Wiederverwertung reduziert. Dieser technologische Fortschritt hat jedoch noch nicht zu industriellen Verfahren geführt. Zusätzlich anzumerken ist, dass die Gesamtkosten auf Grund des geringeren Anteils der Entsorgungskosten bei einer Veränderung einzelner Kostensätze im Bereich Entsorgung wenig sensitiv reagieren werden. Trotzdem werden im Folgenden die Entsorgungskosten entlang ihrer Bestandteile differenziert betrachtet (vgl. Tabelle 25):

- CFK / GFK – Die Kosten für die Entsorgung von Verbundwerkstoffen werden auf Grund der hohen Verbreitung im untersuchten Anlagenbestand zunächst überwiegend von den Kostensätzen für die Entsorgung von GFK und nicht denjenigen von CFK bestimmt. Tatsächlich weisen nur drei der betrachteten dreizehn WEA Cluster überhaupt einen CFK Anteil auf. Ein nennenswerter Rückbau dieser drei Cluster wird erst ab 2025 (Gear_04) bzw. ab 2034 (Gear_05) und 2037 (Gear_06) einsetzen. Daher werden die aufgezeigten Verfahren zur CFK Entsorgung (vgl. Kapitel 5.2.1.5), selbst bei zügigem Erreichen einer industriellen Anwendung, die Kosten für die Entsorgung von CFK / GFK kurz- bis mittelfristig nur in geringem Maße beeinflussen. Eine verstärkte Kostenwirkung ist erst am Ende des Prognosezeitraums ab 2034 zu erwarten. Die Kosten für die Entsorgung von GFK sind dagegen bereits kurzfristig relevant und könnten zusätzlich im Zeitverlauf moderat ansteigen. Zwar ist absehbar mit keiner technologisch induzierten Preissteigerung zu rechnen, da entsprechende Verfahren bereits im industriellen Maßstab existieren (vgl. Kapitel 5.2.1.5), doch steht zu befürchten, dass die zusätzlich zu den bisherigen Mengen zu entsorgenden GFK Mengen von 15.000t/a bis 73.000t/a die bestehenden Entsorgungswege überfordern und zu einer mengeninduzierten Preissteigerung führen. Die jährlich stark schwankenden Mengen werden einen Kapazitätsaufbau zumindest erschweren.
- Beton – Die Entwicklung der Kostensätze für die Entsorgung von Beton hängt stark von tatsächlichen zukünftigen Anforderungen ab. Sollten die aktuell in der Entwicklung befindlichen Verfahren obligatorisch werden (vgl. Kapitel 5.1.4.2), ist mit einer Erhöhung dieser Kostensätze zu rechnen. Auf Grund des frühen Entwicklungsstadiums der Verfahren sind deren spätere Kostensätze im Rahmen einer industriellen Anwendung nicht zu prognostizieren. Sollten die Anforderungen an die Entsorgung von Altbeton stabil bleiben, ist auch mit annähernd konstanten Entsorgungskosten zu rechnen.
- Elektroschrott (inklusive SEE) – Die Entsorgung von Elektroschrott verursacht im Status quo tatsächlich nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten. Mit Ausnahme von SEE sind für Elektroschrott auch keine zusätzlichen Anforderungen an die Entsorgung erkennbar, so dass für Elektroschrott ohne SEE Bestandteile annähernd konstante Kostensätze angenommen werden

können. Abweichend von dieser Annahme könnte es bei Bauteilen mit SEE, die aktuell dieselben Entsorgungswege wie Elektro- bzw. Elektronikschrott nehmen (vgl. Kapitel 5.2.1.3), bei Bestehen einer expliziten Recycling-Anforderung zu zusätzlichen und in der Kostenprognose nicht berücksichtigten Entsorgungskosten kommen. Auf Grund der hohen technologischen Unsicherheit, besteht aktuell kein Recyclingverfahren, ist eine realistische Kostenschätzung zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch unmöglich. Anzumerken ist, dass auf Grund der großen Verbreitung von SEE in anderen Industrien sowie dem zunehmenden Rücklauf von Elektrofahrzeugen von Endkonsumenten die Entwicklung solcher Verfahren außerhalb der WEA Industrie getrieben werden wird.

- Betriebsflüssigkeiten – Die Entsorgung von Betriebsflüssigkeiten verursacht nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten. Zudem sind für Betriebsflüssigkeiten keine über die etablierten Entsorgungswege hinausgehende Anforderungen erkennbar, so dass für Betriebsflüssigkeiten mit annähernd konstanten und in der Kostenprognose bereits abgebildeten Kostensätzen gerechnet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vorhersage der Entsorgungskosten insbesondere abhängig von zukünftigen Anforderungen und noch zu entwickelnden Verfahren deutlich unsicherer als die Entwicklung der Rückbaukosten ist. Eine Aktualisierung der bestehenden Kostenprognose erscheint unter Berücksichtigung der hohen Unsicherheiten (Preisentwicklung GFK Entsorgung, zukünftige Recycling-Anforderungen Beton und SEE) jedoch aktuell nicht möglich. Die bestehende Kostenprognose ist vor diesem Hintergrund als günstiger Fall zu interpretieren.

6.3 Finanzierung Rückbau und Entsorgung

Zur Finanzierung von Rückbau und Entsorgung dienen neben den Erlösen aus dem Verkauf zurückgewonnener Materialien (insbesondere Stahl sowie NE-Metalle) von den Betreibern der WEA obligatorisch zu bildenden Rückstellungen (vgl. Kapitel 3). Es ist darauf hinzuweisen, dass der Beitrag von Erlösen aus dem Verkauf zurückgewonnener Materialien auf Grund volatiler Rohstoffpreise insbesondere vor dem Hintergrund des langen Prognosehorizonts unsicher ist. Auch die in der Vergangenheit teilweise zu beobachtende Sondereffekte auf den globalen Rohstoffmärkten, z.B. durch gezielte Verknappung von SEE können nicht vorhergesehen werden.

Bereits im Rahmen der ursprünglichen Kostenprognose wurde deutlich, dass auch bei Berücksichtigung möglicher Erlöse (zu aktuellen Preisen) die gebildeten Rückstellungen für den Rückbau des Gesamtbestands wahrscheinlich nicht ausreichen werden, so dass eine Finanzierungslücke zu erwarten ist. Bei Berücksichtigung möglicher zukünftiger Anforderungen an Rückbau (vgl. Kapitel 6.1) und Entsorgung (vgl. Kapitel 6.2) sowie der Auswirkungen des technologischen Fortschritts steht zu befürchten, dass diese Finanzierungslücke tendenziell größer als ursprünglich prognostiziert ist. Zudem ist bei einer frühzeitigen Etablierung der empfohlenen Anforderungen an Rückbau und Entsorgung insbesondere an unwirtschaftliche Entsorgungswege bereits kurzfristig in der ersten Phase des verstärkt einsetzenden Rückbaus zwischen 2021 und 2025 sicher mit dem Auftreten einer Finanzierungslücke zu rechnen.

Für den genehmigten Anlagenbestand ließe sich die absehbare Finanzierungslücke – ohne die Anforderungen an Rückbau und Entsorgung zu kompromittieren – durch eine Überprüfung der Rückstellungen im Einzelfall sowie ggf. eine nachträgliche Erhöhung der geforderten Rückstellungen schließen. Auch eine forcierte Entwicklung insbesondere neuer und effizienterer Entsorgungsverfahren könnte mittelfristig einen Beitrag zur Schließung der Finanzierungslücke leisten. Eine eventuelle Verlängerung der Laufzeiten von WEA durch entstehende „post EEG“ Geschäftsmodelle wird die Finanzierungslücke dagegen nicht verkleinern, sondern das Entstehen der

Rückbau- und Entsorgungskosten lediglich in die Zukunft verschieben. Allerdings könnte durch Laufzeitverlängerungen eines signifikanten Anteils des Anlagenbestands Zeit für die Entwicklung effizienterer Entsorgungsverfahren gewonnen werden.

Gleichzeitig sollte für zukünftig zu errichtenden Anlagen das Entstehen von Finanzierungslücken möglichst auch bei höheren Anforderungen an Rückbau und Entsorgung ausgeschlossen werden. Auch wenn die Bildung höherer Rückstellungen die Erzeugungskosten von onshore Windenergie zunächst leicht erhöhen wird, erscheint diese Erhöhung vor dem Hintergrund der alternativen Übernahme dieser Kosten durch den Flächeneigner (selten Betreiber der Anlagen) oder die Allgemeinheit insgesamt die wirtschaftlichere und fairere Lösung zu sein. Zusätzlich sollte bei der Ermittlung zukünftiger Rückstellungen die Beachtung von Vorgaben zum rückbau- und entsorgungsgerechten Konstruieren durch die Anlagenhersteller belohnt werden, so dass für Projektierer und Betreiber ein Anreiz zur Auswahl ressourcenschonend zurückzubauender Anlagen entsteht.

7 Diskussion möglicher Maßnahmen zur organisatorischen und finanziellen Umsetzung

7.1 Einführung und Hintergrund zu möglichen politischen Maßnahmen

Nach derzeitiger Einschätzung lässt sich festhalten, dass es diverse geeignete und umweltschonende Rückbau- und Recyclingtechniken gibt, zugleich lässt sich aber zu folgenden Fragen Handlungsbedarf (siehe dazu auch Kapitel 7.2) ableiten:

- Der gesetzliche Standard im Bereich Rückbau und Entsorgung ist zwar gesetzlich abstrakt festgelegt und auch als Pflicht nach der von uns vertretenen Ansicht konkret zugewiesen (wenn auch in verschiedenen Rechtsregimes). Wirtschaftsakteure und Behörden verfügen aber derzeit insbesondere speziell mit Blick auf den Rückbau von WEA nicht über integrierte verbindliche oder auch unverbindliche detaillierte Vorgaben zur Ausfüllung des gesetzlichen Standards und zur Definition in Genehmigungen;
- Vor dem Hintergrund ökonomischer Gegebenheiten ist offen, inwieweit ein ressourcensicherndes und umweltfreundliches Vorgehen vorausgesetzt werden kann. Insbesondere ist sehr fraglich, inwieweit gebildete Rückstellungen zur Deckung der Kosten von Rückbau und Entsorgung ausreichen;
- Schließlich stellt sich die Frage, ob an das Inverkehrbringen von WEA bzw. Komponenten bestimmte Anforderungen und bestimmte Pflichten – etwa an die Hersteller im Sinne der Produktverantwortung – definiert werden sollten.

Neben den technischen Anforderungen an einen ressourcensichernden und umweltfreundlichen Rückbau einschließlich der Entsorgung (siehe Kapitel 6 und 7) sehen wir daher politischen Handlungsbedarf, um diese Anforderungen in der Praxis realisieren zu können. Mögliche Maßnahmen sollen in diesem Bericht diskutiert werden. Die Umsetzung und Konkretisierung von bestehenden Verpflichtungen für Rückbau und Entsorgung sollen nach unserem Verständnis, soweit möglich, Vorrang vor der Schaffung neuer Regelungen haben.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Windenergie eine wichtige Säule für das Erreichen einer Energiewende in Deutschland ist. Durch Fortentwicklung der Technologie und sogenanntes „Repowering“ ist der Flächenertrag weiter gestiegen und wird entkoppelt von der Flächeninanspruchnahme weiterhin steigen. Bereits heute ist eine Vermeidung von Abfällen durch regelmäßige Wartung der WEA und Ansätzen von recyclinggerechter Konstruktion auch im Sinne der Hersteller und Betreiber von WEA.

Ein Überblick zu theoretisch möglichen Maßnahmen sowohl mit Blick auf bessere Umsetzung bestehender Verpflichtungen als auch mit Blick auf neu einzuführende Instrumente, der Reichweite möglicher Maßnahmen sowie einer Diskussion ausgewählter Maßnahmen wird im Folgenden gegeben.

7.1.1 Reichweite möglicher Maßnahmen

Für die weitere Diskussion möglicher Maßnahmen muss nach unserer Auffassung bezüglich deren Reichweite differenziert werden.

Zum einen muss unterschieden werden zwischen Maßnahmen, die auf den eigentlichen Rückbau (d.h. Demontage, Zerlegung, Abbruch, etc.) abzielen sowie Maßnahmen, die auf die Entsorgung der resultierenden Stoffströme abzielen. Etwaige Schnittstellen zwischen Rückbau und Entsorgung wie

z.B. eine Getrenntsammlung und/oder Vorkonfektionierung bestimmter Stoffströme einer WEA, damit diese einen herkömmlichen Entsorgungsweg gehen können, werden dabei dem Themengebiet der Entsorgung zugeordnet.

Zum anderen muss zwischen Maßnahmen für bestehende (und bis zum Stichtag der Einführung möglicher Maßnahmen genehmigte) WEA und zukünftigen Anlagen unterschieden werden. In dieser Unterteilung wird es Schnittstellen geben, die eine scharfe Trennung von bestimmten Maßnahmen erschweren. Dennoch ist eine Unterscheidung notwendig, da Anforderungen wie z.B. an recyclinggerechte Konstruktion oder die Rückstellung von Sicherheitsleistungen ihre Wirkung nur auf zukünftige Anlagen entfalten können.

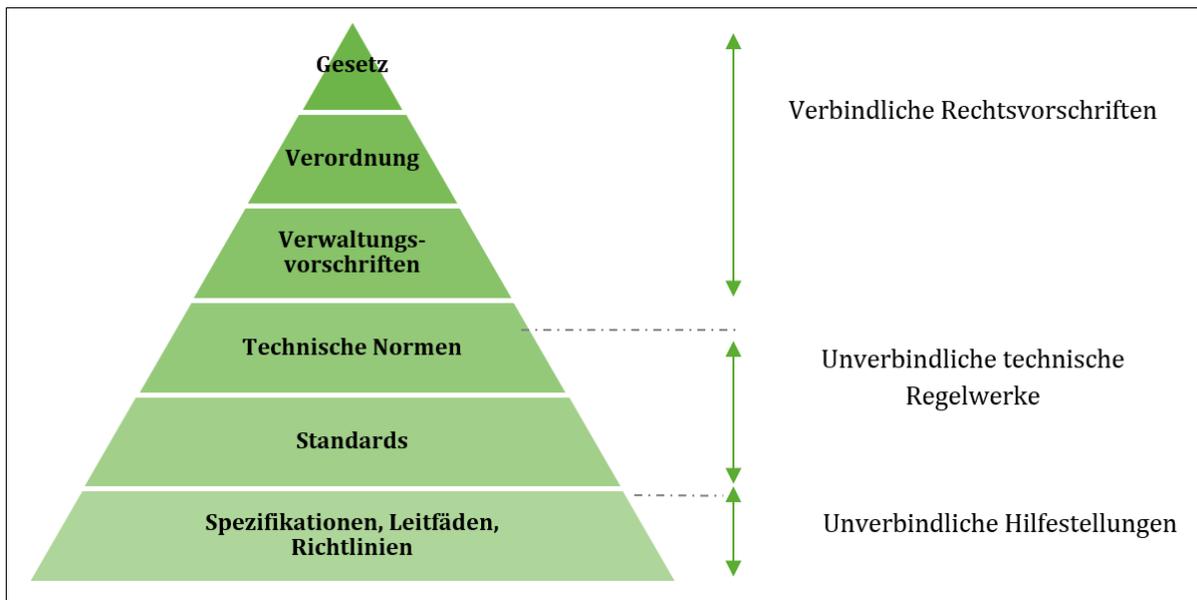
7.1.2 Überblick möglicher Instrumententypen und Maßnahmen

Um die in Kapitel 7.2 näher dargestellten Herausforderungen bei Rückbau und Entsorgung von bestehenden und zukünftigen WEA zu meistern, bieten sich grundsätzlich eine Vielzahl politischer Instrumente an. Die Bandbreite der möglichen Maßnahmen deckt dabei rechtliche, ökonomische und informatorische Instrumente ab. Bezugnehmend auf die Darstellung der aktuellen Vorgaben für Rückbau und Entsorgung von WEA identifizieren wir die folgenden politischen Werkzeuge:

- Gesetze und Verordnungen (Schaffung neuer Regelungen):
- Verwaltungsvorschriften (Verbesserter Vollzug bestehender Regelungen – Berücksichtigung der verschiedenen Genehmigungsregimes)
- Normen und andere privatrechtliche Standards/ Selbstverpflichtungen der Wirtschaft
- Leitlinien
- Steueranreize und Subventionen
- Informationsblätter und -plattformen

Aus diesem grundsätzlich zur Verfügung stehenden „Werkzeug“-Kasten werden im weiteren Verlauf dieses Berichts mögliche Maßnahmen diskutiert, wie gezeigt getrennt nach Maßnahmen mit Blick auf bestehende WEA und solche mit Blick auf zukünftig zu errichtende WEA. Dabei ist zu beachten, dass es verschiedene Möglichkeiten auf unterschiedlichen Hierarchieebenen gibt, um technische Anforderungen oder Hilfestellungen für Fragestellungen des Rückbaus sowie der Entsorgung bereitzustellen. Die verschiedenen Hierarchieebenen sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 44: Hierarchieebenen unterschiedlicher Regelungen



Quelle: (Ramboll)

- Verbindlich: Rechtliche Regelung, z.B. Verordnung oder Gesetz
- Verbindlich oder freiwillig: Normen oder Standards

7.2 Regelungsbedarf bei Rückbau und Entsorgung von WEA

7.2.1 Regelungsbedarf für den Rückbau von WEA

Wie in den Kapiteln 6 und 7 ausführlich dargestellt, besteht im Bereich des Rückbaus Regelungsbedarf im Hinblick auf folgende Aspekte:

- Klarstellung des Umfangs bestehender genehmigungsrechtlicher Pflichten
 - Rückbauumfang, insbesondere bezüglich des Rückbaus von Fundamenten und der Nebeneinrichtungen, wie Kabelsysteme, Stellflächen oder Zuwegung;
 - Angewandte Rückbaumethoden (Kran, Sprengung, Umziehen) für die jeweiligen Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, der Vermeidung von Flurschäden, sicherheitstechnischer Überlegungen, Lärmschutz und einem angemessenen Kosten-/Nutzen-Verhältnis;
- Anforderungen bezüglich Sicherheits- und Arbeitssicherheits-Aspekte (insbesondere, aber nicht ausschließlich auf Seiten der Rückbaufirmen) unter anderem vorzuweisende Ausbildungs-/Fortbildungsnachweise (z.B. Höhenttraining, Schaltberechtigung) oder Prüfplaketten (z.B. für Arbeitsmittel); Grundsätzlich sollten die gleichen Standards für Auf- und Rückbau gelten und in der Praxis angewendet werden;
- Datenbereithaltung (Mengen, Massen, Zeichnungen etc.) vom Betreiber eines Windparks - bzw. der entsprechenden Daten, die vom Hersteller bei dem Anlagenverkauf verbindlich zur Verfügung zu stellen sind – welche für den Rückbauprozess benötigt werden.

Zusätzlich zu diesen technischen Aspekten des Rückbaus ergibt sich ein weiterer möglicher Regelungsbedarf für den Rückbau von WEA (und auch für die im nächsten Abschnitt diskutierte Entsorgung) aufgrund der möglichen, mittelfristig auftretenden Finanzierungslücke zwischen gebildeten Sicherheitsleistungen der Windpark-Betreiber und den zukünftig zu erwarteten Rückbaukosten (siehe Kapitel 3.4). Der Betreiber, welcher die Rückbauverpflichtung trägt, hat den Rückbau dann auch tatsächlich zu bezahlen, auch wenn dieser teurer ist als ursprünglich angedacht.

7.2.2 Regelungsbedarf für die Entsorgung von WEA

Im Bereich Entsorgung der beim Rückbau entstehenden Abfälle bestehen nach aktueller Rechtslage bereits umfangreiche abfallrechtliche Pflichtenstellungen. Wie in Kapitel 7 ausführlich dargestellt, besteht im Bereich der Entsorgung Regelungsbedarf im Hinblick auf folgende Stoffströme:

- Umsetzung bestehender Pflichten zur Entsorgung in die Praxis, z.B. Getrennthaltung von bestimmten Stoffströmen (GewAbfV);
- Derzeit Defizite mit Blick auf hochwertige Verwertung (siehe Kapitel 5) von
 - Altbeton-Ströme aus WEA (Turm und Fundamente), z.B. durch fehlenden Einsatz und Akzeptanz von Recyclingbaustoffen;
 - SEE-Magneten aus WEA (Synchrongeneratoren), z.B. aufgrund fehlender Mengen für eine wirtschaftliche Verwertung;
 - GFK- und CFK-haltigen Abfälle aus WEA (Rotorblätter), z.B. aufgrund fehlender Vorgaben zur fachgerechten Verarbeitung/Zerlegung von Rotorblätter vor Ort.

7.3 Diskussion möglicher Maßnahmen für bestehende WEA

7.3.1 Rückbau

Die Vielfalt an Anlagen und den Rahmenbedingungen der jeweiligen Anlagenstandorte (Geologie, Landes- und Kommunalrecht, etc.) sprechen gegen eine starre und bundesweit einheitliche Regelung zum Rückbau von WEA. Die grundsätzlich denkbaren Maßnahmen zur Adressierung des Regelungsbedarfes aus Kapitel 7.2.1 sind im Folgenden kurz erörtert.

Zu unterscheiden ist grundsätzlich zwischen

- Hilfestellung für Wirtschaftsakteure und Behörden über nachträgliche Anordnungen bei genehmigungspflichtigen Anlagen bzw. Auflagen bei genehmigungspflichtigem Rückbau (länderspezifisch) als
 - Unverbindlichen technischen Leitlinien zum Rückbau;
 - Technische Normen zum Rückbau;
- Verwaltungsvorschriften;
- Rechtliche Vorgaben zum Rückbau

Im Folgenden werden diese Typen diskutiert und Hinweise gegeben, wo eine Kombination der verschiedenen Maßnahmen sinnvoll erscheint.

Wir gehen insofern davon aus, dass **Anforderungen und Standards für den Prozess des Rückbaus** rechtlich im Prinzip auch für bereits errichtete Anlagen definiert werden können. Dies gilt

insbesondere dort, wo detaillierte Standards der Konkretisierung eines gesetzlich abstrakt eingeführten Maßstabs bei der Erfüllung von Umweltpflichten dienen.

Ein Beispiel für einen solchen abstrakten Maßstab findet sich im Bereich der immissionsschutzrechtlichen Grundpflicht nach § 5 Abs. 3 Nr. 1 BImSchG:

„Genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung (...) von der Anlage oder dem Anlagengrundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können“

Der Maßstab für die Erfüllung dieser Umweltpflicht gilt – abstrakt – bereits heute. Inwieweit sich neu eingeführter Standards für bestehende und aktuell betriebene Anlagen auch unter Berücksichtigung bestehender Sicherheiten für den Rückbau und der etwaigen Belastung der Betreiber politisch realisieren lassen, ist die eine Dimension; rechtliche Grenze wäre hier insofern der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz.

7.3.1.1 Unverbindliche technische Leitlinien zum Rückbau

Unverbindliche Hilfestellungen werden unter anderem von den acht Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaften zu spezifischen Themenkomplexen erarbeitet. Dazu gehören die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft für Abfall (LAGA), Immissionsschutz (LAI), Bodenschutz (LABO), Wasser (LAWA), Chemikaliensicherheit (BLAC), Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung (LANA), sowie für Klima, Energie, Mobilität- Nachhaltigkeit (BLAG KliNA). Sie alle sind Arbeitsgremien der Umweltministerkonferenz mit der Aufgabe, einen möglichst ländereinheitlichen Verwaltungsverzug in den entsprechenden Themenfeldern zu erreichen. Dafür wird der Austausch von Informationen und Erfahrungen zwischen Bund und Ländern angestrebt um Fragen zu erörtern, Lösungen auszuarbeiten und Empfehlungen auszusprechen (LAGA o.J.) (LAI o.J.) (LABO o.J.) (UMK o.J.)

Für dieses Vorhaben stellen LAGA, LAI und LABO die relevanten Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaften dar. Zum Erreichen ihrer Ziele wird sich einer Vielzahl unterschiedlicher Typen der Hilfestellungen bedient. Nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick:

Tabelle 26: Überblick Hilfestellungen ausgewählter Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaften (LAGA o.J.) (LAI o.J.) (LABO o.J.)

Arbeitsgemeinschaft	LAGA	LAI	LABO
Dokumententyp	Vollzugshilfe - Musterverwaltungsschriften	Vollzugshilfe - Musterverwaltungsschriften	Auslegungen von Rechtsnormen
	Richtlinie	Durchführungsbestimmungen	
	Technische Regelungen	Richtlinien	
		Auslegungshinweise	Arbeitshilfen / Checklisten
		Handlungsempfehlungen	Handlungsempfehlungen
	Merkblätter	Leitfäden	Leitlinien / Bewertungshilfen

Quelle: (Ramboll)

Leitlinien, Vollzugshilfen, technische Regelungen u.ä. von LAGA, LAI und LABO stellen flexible Instrumente dar. Deren Entwicklung und potenzielle Anpassungen müssen im Gegensatz zu Gesetzen keinen starren und langwierigen Prozess folgen, sondern verfügen über einen gewissen Spielraum. Mit der Möglichkeit zur hohen Detailtiefe können unverbindliche Begleitdokumente Hilfestellungen und Erklärungen bieten, wo Gesetze Fragen und Interpretationsspielraum offenlassen. Zudem können unterschiedliche Interessensgruppen Einfluss bei der Erstellung und Bearbeitung nehmen, so dass ein

anwendungsnahes Endprodukt mit konkreten Lösungsvorschlägen ermöglicht werden kann. Weiterhin können zukünftige Weiterentwicklungen in der Entsorgungsbranche besser in solchen Leitlinien als in Verordnungen berücksichtigt werden.

Innerhalb der unverbindlichen Begleitdokumente gibt es jedoch auch Unterschiede. So haben Leitlinien einen vorrangig empfehlenden Charakter, wohingegen Richtlinien durchaus Vorgaben enthalten können. Um gewisse Hilfestellungen und Anleitungen in Bezug auf den Rückbau sowie die Entsorgung von Windenergieanlagen zu geben, erscheint die Erarbeitung von Leitlinien bzw. einer technischen Regelung als grundsätzlich geeignet.

Um einen geeigneten Entwurf einer technischen Leitlinie für den Abbruch und die Entsorgung von Windkraftanlagen zu erarbeiten wurden bereits existierende Leitlinien, Richtlinien und technische Regelungen der LAGA, der LAI und der LABO gesichtet und zur strukturellen Orientierung verwendet. Relevante Inhalte, welche innerhalb der Leitlinie für den Rückbau von WEA geregelt werden sollen, wurde den vorangegangenen Kapiteln dieses Berichts entnommen. Ein möglicher Gliederungsentwurf für solche Leitlinien ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Entwurf einer technischen Leitlinie zu technischen Anforderungen an den Rückbau (und Entsorgung) von WEA

Kapitelstruktur	Inhalt
Einleitung	Hintergrund Zielstellung
Begriffsbestimmung	
Rechtlicher Hintergrund	Internationale Regelung Nationale Regelung Baurecht Immissionsschutzrecht Relevante Pflichten im Bereich Rückbau Relevante Pflichten im Bereich Entsorgung
Rolle der Behörden	Pflichten und Aufgaben der Behörden Möglichkeiten der Einflussnahme von Behörden
Technische Anforderungen an den Rückbau	Nach Phasen: (1) Vorbereitungsarbeiten (2) Demontage der WEA Spezifikation des Rückbauumfangs Klärung der Zulässigkeit der derzeit verfügbaren Rückbaumethoden für die jeweiligen Anlagenkonzepte Anforderungen bzgl. der Verarbeitung/Zerlegung von Komponenten vor Ort (3) Demontage des Fundaments Spezifikation des Rückbauumfangs Anforderungen bzgl. der Verarbeitung/Zerlegung von Komponenten vor Ort (4) Rückbau der Kranstellflächen Spezifikation des Rückbauumfangs Anforderungen bzgl. der Verarbeitung/Zerlegung von Komponenten vor Ort (5) Rückbau der parkinternen Verkabelung Spezifikation des Rückbauumfangs Anforderungen bzgl. der Verarbeitung/Zerlegung von Komponenten vor Ort Allgemein: Anforderungen bezüglich Sicherheits- und Arbeitssicherheits-Aspekte Spezifikation notwendiger Dokumente und Daten von Betreiber des Windparks

Kapitelstruktur	Inhalt
	Spezifikation notwendiger Dokumente und Daten des Herstellers der WEA
Monitoring Technische Anforderungen an den Rückbau	Möglichkeiten der Überwachung
(Technische Anforderungen an die Entsorgung)	Schaffung von (bundesweit) einheitlichen Regelungen zur Qualität der Aufbereitung der WEA, sowie zum Umgang und der weiteren Verwendung von Recyclingmaterialien bzw. Sekundärrohstoffen inkl. der Definition einer sinnvollen Recyclingtiefe. (Struktur siehe Bsp. LAGA - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen) Nach Komponenten: Rotorblatt Definition Herkunft Untersuchungskonzept Spezifische Anforderungen Bewertung und Folgerung für die Verwertung Qualitätskontrolle Dokumentation Rotornarbe Gondel Turm Fundament Elektrogeräte, Elektronik, IT Ausstattung Kranstellflächen Kabel Sonstiges (z.B. SF ₆ , Schmier- und Kühlmittel, Batterien und Akkus, Lacke und Beschichtungen)
Monitoring technischer Anforderungen an die Entsorgung	Möglichkeiten der Überwachung

Quelle: (Ramboll)

7.3.1.2 Schaffung bzw. Änderung von Rückbau-relevanten Normen

Schaffung einer technischen Norm für den Rückbau von WEA

Eine Norm ist ein Dokument, das Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren festlegt und von einer auf nationaler (z.B. DIN), regionaler oder internationaler Ebene anerkannte Organisation akzeptiert wird. Im Gegensatz dazu sind Standards Ergebnisse von Standardisierungsprozessen bewährte strategische Mittel, um innovative Lösungen schnell und unkompliziert am Markt zu etablieren und zu verbreiten. Diese verlangen jedoch keine Akzeptanz anerkannter Normungsorganisationen.

Die Anwendung von Normen ist grundsätzlich freiwillig. Erst wenn der Gesetzgeber ihre Einhaltung zwingend vorschreibt, werden Normen bindend. Normen können dabei deregulierend wirken, da sie den Gesetzgeber und Bürger von starren Regeln entlasten aber dennoch konkrete Vorgaben bzw. Hilfestellungen enthalten. Daneben helfen sie im Fall einer möglichen Haftung: Wer DIN-Normen (oder andere Industrienormen) – als anerkannte Regeln der Technik – anwendet, kann ein ordnungsgemäßes Verhalten nachweisen. Solange die Anwendung der Norm auf freiwilliger Basis besteht, kann auf ein Missachten keine Konsequenz folgen.

Einen Antrag auf eine Norm kann praktisch jeder stellen. Grundsätzlich werden Sie von denjenigen entwickelt, die sie später auch anwenden. Entwürfe werden zudem öffentlich gemacht und zur Diskussion gestellt. Dies garantiert, dass nicht nur der aktuellste Stand der Technik Berücksichtigung

findet, sondern ebenfalls, dass sich alle relevanten Interessensgruppen an dem Entwicklungsprozess beteiligen können (DIN e.V. 2018).

Weder für den Rückbau noch für die Entsorgung von Windenergieanlagen ist zum heutigen Stand ein Standard oder eine anerkannte Norm verfügbar. Die Entwicklung einer anerkannten (DIN), bindenden Norm könnte eine flächendeckende Umsetzung von korrekten und umweltverträglichen Rückbau- und Entsorgungsvorhaben fördern. Aktuell plant die neu gegründete Industrievereinigung Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen (RDRWind e.V.) die Verbreitung neuer professioneller Anwendungen und nachhaltiger Prozesse, Standards und Normen für die Demontage von WEA. Insbesondere die Schaffung einer DIN-Norm, ggfs. mit Teilbereichen zu ausgewählten Rückbautätigkeiten steht hier auf der Agenda.

Jedoch könnten eine privatrechtliche (DIN) Norm keinen Einfluss auf die Verwaltungspraxis der Behörden nehmen.

Schaffung bzw. Änderung bestehender Normen für ausgewählte Rückbau-Tätigkeiten

Unabhängig vom Format der allgemeinen Anforderungen an den Rückbau (Unverbindliche Leitlinien, Norm, Verordnung) können diese allgemeinen Anforderungen durch das Schaffen von Normen bzw. die Anpassung bestehender Normen für einzelne, ausgewählte Rückbau-Tätigkeiten ergänzt werden.

Dazu müssen bestehende relevante Normen und deren Inhalte analysiert werden, um bereits bestehende Anforderungen zu identifizieren aber auch den Bedarf an Ergänzungen speziell für Rückbau-Tätigkeiten von Windenergieanlagen zu erkennen. Ein erster Entwurf dieser Analyse befindet sich in Anlage H. Diese Übersicht gilt als erster Ansatzpunkt einer möglichen Maßnahme „Schaffung bzw. Änderung bestehender Normen“. Um diese Maßnahme umzusetzen bedarf es einer intensiven Auseinandersetzung mit den Inhalten bereits bestehender Normen und der Möglichkeit eine zielführende Ergänzung vorzunehmen (siehe dazu auch Kapitel 8.2).

Ein konkretes Beispiel wäre der Verweis auf die bestehende Norm DIN EN 15027:2010-03 bezüglich des Einsatzes einer transportablen Wand- und Seilsäge für den Baustelleneinsatz bzw. deren Anpassung auf Bedürfnisse aus dem Rückbau von WEA wie z.B. der Einhausung der Sägestelle zum Schutz vor Stäuben und Fasern bei der Zerkleinerung von Rotorblättern.

Weitere Normen, z.B. für den Rückbau von Fundamenten, Kranstellflächen, etc. könnten diskutiert und dann ggfs. in Leitlinien, einer Rückbau-Norm oder einer Verordnung erwähnt werden.

7.3.1.3 Rechtliche Vorgaben zum Rückbau

Für den Rückbau von WEA könnte ebenfalls zum Mittel der Verabschiedung eines Gesetzes, einer Verordnung oder ggf. einer Verwaltungsvorschrift gegriffen werden.

Das Integrieren bestimmter Anforderungen an die korrekte und umweltverträgliche Umsetzung von Rückbau und Entsorgung von Windenergieanlagen auf gesetzlicher Ebene kann einen langwierigen Prozess bedeuten, was unter Umständen bedeutet, dass technisch ein veraltetes Konzept vorgegeben wird. Weiter ist fraglich, inwieweit die gleiche Detailtiefe der Anforderungen geboten werden, wie es bei Instrumenten vorangegangener Kapitel der Falls ist.

Schließlich stellt sich speziell beim Rückbau von WEA die Frage nach der korrekten und sachgerechten Rechtsgrundlage im föderalistischen System der Bundesrepublik. Zunächst scheint hier eine auf § 7 Abs. 1 BImSchG gestützte immissionsschutzrechtliche Verordnung (zur näheren Definition der Grundpflicht aus § 5 Abs. 3 BImSchG) nahezuliegen – hier besteht allerdings das Problem, dass eine solche Verordnung sich ausdrücklich nur auf diejenigen Anlagen beziehen würde, die nach dem Regime des BImSchG genehmigt wurden. Ob damit namentlich diejenigen Anlagen adressiert würden, die in näherer Zukunft zum Rückbau anstehen, ist fraglich (siehe Kapitel 2). Anforderungen zum Rückbau von nicht nach BImSchG genehmigten Anlagen können nach unserem Verständnis offensichtlich nicht auf § 7 BImSchG gestützt werden. Genauso wenig kommt § 23 Abs. 1 BImSchG als

Rechtsgrundlage in Betracht, der sich zwar mit „Errichtung, (...) Beschaffenheit und (...) Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen“ befasst, aber eben keine den Nachsorgepflichten aus § 5 Abs. 3 BImSchG verbgleichbare Reichweite hat. Diese Schwierigkeiten bestehen ähnlich auch beim möglichen Erlass einer Verwaltungsvorschrift nach § 48 BImSchG.

Ob vor dem Hintergrund dieser Schwierigkeiten das politische Ziel mit Blick auf Rückbau bestehender WEA, nämlich Verbesserung anstehender Rückbauaktivitäten und insbesondere auch Unterstützung von Wirtschaftsakteuren und Behörden bei der konkreten Ausfüllung des gesetzlichen Standards, sinnvollerweise mit einer gesetzlichen Intervention erreicht werden kann, muss bezweifelt werden. Uns erscheint insgesamt die Erarbeitung einer Leitlinie oder einer Norm als zielführender.

Grundsätzlich gilt für die Beseitigung baulicher Anlagen bereits das Baurecht mit dem Baugesetzbuch (BauGB) und den Bauordnungen der Bundesländer. Neben den gesetzlichen Grundlagen sind beim Rückbau zahlreiche untergesetzliche Regelungen zu beachten. Hier sind zunächst die Eurocodes als europaweit vereinheitlichte Regeln im Bauwesen zu nennen. Die Eurocodes sind seit 2012 bei Bauvorhaben verbindlich anzuwenden. Die Eurocodes werden durch die in den einzelne Bundesländern eingeführten technischen Baubestimmungen ergänzt. Der DIN-Arbeitsausschuss NA 005-51-07 AA "Windenergieanlagen" wurde 2013 im NABau gegründet, und beauftragt, die Eurocodes für die Windenergieanlagen sowohl on- als auch offshore anwendbar zu machen. Entwickelt wurde die nationalen Normenreihe DIN 18088 "Tragstrukturen für Windenergieanlagen", die sich an die Beteiligten von Planung, Errichtung und Betreuung von Windenergieanlagen richtet und neben den technischen, auch den nationalen rechtlichen Belangen gerecht werden. Diese besteht aus den folgenden Normen:

➤ DIN 18088-1:2019-01

Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 1: Grundlagen und Einwirkungen

➤ DIN 18088-2:2019-01

Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 2: Stahlbeton- und Spannbetontragwerke

➤ DIN 18088-3

Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 3: Stahlbauten

➤ DIN 18088-4

Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 4: Baugrund und Gründungselemente

➤ DIN 18088-5:2017-12 - Entwurf

Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 5: Verbindungen zwischen Stahlbauten und Stahl-beton- und Spannbetontragwerken

Weitere Regelungen zum Rückbau baulicher Anlagen beziehen sich auf den Arbeitsschutz und die Arbeitssicherheit. Exemplarisch seien an dieser Stelle das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), die Baustellenverordnung (BaustellV), die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV), das Sprengstoffgesetz (SprengG) und die Verordnung über arbeitsmedizinische Vorsorge (ArbMedVV) zu nennen.

Diese Regelungen werden wiederum ergänzt durch das Vorschriften- und Regelwerk der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). Es besteht aus zahlreichen Vorschriften, Regeln, Informationen und Grundsätzen, die sich unter anderem den Sachgebieten Sanierung und Bauwerksunterhalt, Hochbau und Tiefbau zuordnen lassen.

Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass diverse Teilaspekte des Rückbaus von Windenergieanlagen bereits heute durch das bestehende gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk sowie durch Industrienormen bestimmt wird. Dies gilt auch für die Aspekte des Arbeitsschutzes und der Arbeitssicherheit. In dieser Hinsicht besteht somit kein Handlungsbedarf in Bezug auf die Schaffung detaillierter gesetzlicher Vorgaben für den Rückbau von WEA, sondern vielmehr auf einer einheitlichen Zusammenstellung der Vorgaben in Leitlinien und einer konsequenten praktischen Umsetzung und entsprechenden Kontrollen. Somit sollten die relevanten gesetzlichen Vorgaben und relevante Industrienormen in möglichen Leitlinien (siehe Kapitel 7.3.2.1) entsprechend erwähnt werden.

Als Ausnahme sehen wir dennoch weitergehenden Regelungsbedarf hinsichtlich einer fachgerechten Zerlegung und Verwertung der Rotorblätter (siehe folgende Kapitel).

7.3.1.4 Ausschöpfen des genehmigungsrechtlichen Spielraums

Wie in Kapitel 2 beschrieben, können Vorgaben zur Umsetzung der immissionsschutzrechtlichen Nachsorgepflicht möglicherweise durch die zuständige Behörde im Weg nachträglicher Anordnung (sog. Nachsorgeanordnung, § 17 Abs. 1 i.V.m. Abs. 4 a Satz 2 BImSchG) konkretisiert werden. Unseres Erachtens bietet diese Vorschrift den Behörden genug Spielraum, um im Wege der Anordnung einen sachgerechten Rückbau sicherzustellen. Eine inhaltliche Ausfüllung dieses Spielraums könnte insbesondere durch die Initiative zu einer möglichen Leitlinie erfolgen. Wir erwarten von einer solchen Leitlinie auch eine entsprechende Auswirkung, in den Bereich derjenigen Anlagen hinein, die nicht dem BImSchG unterliegen, bei denen aber nach Landesrecht bauaufsichtsrechtliche Rückbauanordnungen bzw. eine Genehmigung der Rückbautätigkeit erforderlich ist.

7.3.2 Entsorgung und Verwertung

7.3.2.1 Anforderungen zur Entsorgung von Stoffströmen aus dem Rückbau von WEA in technischen Leitlinien oder gesetzlichen Vorgaben

Technische Leitlinien oder gesetzliche Vorgaben zum Rückbau von WEA (siehe Kapitel 7.3.1) können um Vorgaben zur Entsorgung von Stoffströmen aus dem Rückbau erweitert werden. Alternativ kann die Entsorgung auch in separaten Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben erfolgen.

Etwaige Probleme in der Entsorgung von Stoffströmen aus WEA, die nach Aufbereitung gleichwertig zu Stoffströmen anderen Ursprungs sind und nicht mehr eindeutig WEA zugeordnet werden können, sollten in etwaigen Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben nicht behandelt werden. Dies ist insbesondere hervorzuheben, da ein Großteil des Regelungsbedarfs für die Entsorgung von Abfällen aus WEA (siehe Kapitel 7.3.2) Stoffströme betrifft, deren Entsorgung aktuell insgesamt problematisch sind (siehe auch Kapitel 8.4).

Vielmehr müssen bestimmte Anforderung an die Entsorgung von Stoffströmen aus WEA, wie z.B. weitere Getrennthaltungspflichten oder die Aufbereitung bestimmter Stoffströme vor Ort in technischen Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben festgehalten werden. Sobald die Abfälle aus WEA gleichwertig zu Stoffströmen anderen Ursprungs sind oder in einer genehmigten Abfallbehandlungsanlage behandelt werden, muss auf eine weitere Behandlung nach aktuell geltendem Recht verwiesen werden. Stoffstromübergreifende Vorgaben, die aus der Motivation der Verbesserung des Rückbaus und der Entsorgung von Abfällen aus WEA entstehen, sollten nicht in technischen Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben zum Rückbau/Entsorgung von WEA adressiert werden.

Relevante Vorgaben für etwaige technische Leitlinien/gesetzliche Vorgaben bezüglich der Entsorgung sind wie bereits in Kapitel 5.1 näher beschrieben die Schaffung von einheitlichen Anforderungen zur Qualität der Aufbereitung, sowie zum Umgang und der weiteren Verwendung von Recyclingmaterialien bzw. Sekundärrohstoffen inkl. der Definition einer sinnvollen Recyclingtiefe (z.B. die Getrennthaltung und Aufbereitung der Altbetonströme aus WEA). Aufgrund des hohen Anteils betrifft dies insbesondere auch den Umgang mit Betonschotter und der Schaffung von einheitlichen Anforderungen zur Nutzung von RC-Beton als Füllstoff, sowie gegebenenfalls als Baumaterial. Weiterhin sind auch Vorgaben zur Aufbereitung von CFK-haltigen Abfällen denkbar, wie z.B. eine farbliche/digitale Kennzeichnung des CFK-Anteils in Verbundwerkstoffen (Rotorblätter) in Verbindung mit einem darauf abgestimmten Separationsverfahren.

Für die Umsetzung wäre eine eigenständige Leitlinie oder die Integration in die allgemeine Leitlinie zum Rückbau (siehe Abschnitt 7 im Gliederungsvorschlag der Tabelle 27 in Kapitel 7.3.2.1) zu diskutieren. Eine Umsetzung der Anforderungen zur Entsorgung in einer eigenständigen Verordnung erscheint wenig zielführend. Die Integration in eine Verordnung zum Rückbau (siehe Kapitel 7.3.2.3) wäre zu diskutieren. Vor- und Nachteile der Ausgestaltung der Anforderungen als unverbindliche Leitlinien oder gesetzliche Vorgaben sind analog zu den Ausführungen in Kapitel 7.3.1.

7.3.2.2 Schaffung bzw. Änderung von Entsorgungs-relevanten Normen

Unabhängig vom Format der allgemeinen Anforderungen an den Rückbau und die Entsorgung (Unverbindliche Leitlinien, Norm, Verordnung) können diese allgemeinen Anforderungen durch das Schaffen von Normen bzw. die Anpassung bestehender Normen für einzelne, ausgewählte Entsorgungs-Tätigkeiten ergänzt werden.

Ein konkretes Beispiel wäre der Verweis auf die bestehende Normen DIN 4226-100 bezüglich Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel (Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen) oder DIN EN 206 bezüglich Betons.

Weitere Normen, Gesetze/Verordnung (z.B. eine mögliche Mantelverordnung) oder auch technische Leitlinien wie die LAGA M20 Mitteilung zu Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen könnten ggfs. in Rückbauleitlinien oder einer Verordnung erwähnt werden.

7.4 Diskussion möglicher Maßnahmen für zukünftige WEA

Durch die klare Tendenz zu größeren WEA (Anstieg der Leistung und Gesamthöhe) und den gleichbleibenden Schwellenwerten der 4. BImSchV, ist für zukünftige WEA üblicherweise mit einer Genehmigung nach BImSchG zu rechnen. Dadurch erhöht sich die Einflussmöglichkeit für Behörden im Vergleich zu baurechtlich genehmigten WEA, deren Anteil an den gesamten WEA in Deutschland in Zukunft stark zurückgehen wird.

Anforderungen an zukünftige WEA (insbesondere solche zu recyclinggerechter Konstruktion) würden jedoch relativ lange Vorlaufzeiten erfordern, da entsprechende Neuentwicklung von Anlagen oder Anlagenkomponenten langfristig erfolgt. Hier müsste Bestandsschutz für alle WEA gelten, die zum Stichtag auf dem Markt bereits verfügbar sind (oder bereits Typenzertifizierung erhalten haben o.ä.).

7.4.1 Rückbau

In diesem Bereich gelten sinngemäß die Ausführungen zu Kapitel 7.3.1 oben. Zusätzlich könnten hier Leitlinien (und Verwaltungsvorschriften) die Funktion haben, den Behörden mit Blick auf Nebenbestimmungen zur Genehmigung (§ 12 BImSchG) und mit Blick auf die Höhe der festzulegenden Sicherheitsleistung Anleitung zu geben.

Wir erwarten angesichts der Entwicklung des deutschen Windparks (siehe Kapitel 3.2), dass der Anteil derjenigen Anlagen, die nicht nach BImSchG genehmigt werden, in Zukunft drastisch abnehmen wird.

7.4.2 Entsorgung und Verwertung

Für den Bereich Entsorgung bei zukünftigen WEA ergeben sich dieselben Maßnahmen wie bei der Entsorgung bestehender WEA (siehe Kapitel 7.3.3). Zusätzlich kann jedoch auch über die folgenden weiteren Maßnahmen nachgedacht werden. In jedem Fall sollte eine ausreichende Übergangsfrist eingeplant werden.

7.4.2.1 Produktverantwortung für gesamte WEA

Nach § 23 Abs. 4 KrWG ist die Bundesregierung ermächtigt, Rechtsverordnungen bezüglich der Ausgestaltung von Produktverantwortung nach § 23 Abs. 1 und 2 KrWG zu erlassen. Konkret für WEA enthält das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (BMUB 2016) der Bundesregierung vom März 2016 einen Prüfauftrag, inwieweit die Ausdehnung und Anwendung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für WEA in Betracht kommen kann.

Hersteller von WEA hätten demnach während des gesamten Lebenszyklus die Verantwortung für ihre Produkte. Ziele der Produktverantwortung für das Ende des Lebenszyklus sind demnach in der Regel eine Getrennterfassung der Produkte sowie deren hochwertige Entsorgung. Weiteres Ziel dabei ist eine Beteiligung der Hersteller an den Kosten der Entsorgung.

Auf dem Weg zu einer wirklichen Kreislaufwirtschaft ist weiterhin nicht nur die Pflicht zur hochwertigen Verwertung der Produkte am Ende des Lebenszyklus wichtig, sondern auch die Vorgaben für die Produktphase. Vorgaben für die Entwicklung langlebiger, reparierbarer, wiederverwendbarer und recycelfähiger Anlagen, der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen oder Kennzeichnungspflichten ermöglichen dabei eine Wiederverwendung bzw. eine hochwertige Verwertung der entstehenden Abfälle. Durch Produktverantwortung müssen Anreize für besseres Produktdesign geschaffen werden, die nicht den europäischen Binnenmarkt und Wettbewerb beeinträchtigen, sondern innovationsfördernd sind (PBnE 2017).

Eine theoretische Möglichkeit wäre also in diesem Rahmen ein System der erweiterten Herstellerverantwortung für WEA einzuführen, um den in Kapitel 7.2 identifizierten Regelungsbedarf zu adressieren. Solche Systeme bestehen bereits für einige b2c und b2b Produkte, z.B. im Rahmen des BattG, ElektroG, VerpackV/VerpackG, AltfahrzeugeV, AltöIV, etc.

Nach § 23 Abs. 4 KrWG ist dabei jedoch auch unter Anderem die Verhältnismäßigkeit einer solchen Maßnahme zu prüfen. Eine Übersicht von Vor- und Nachteilen ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 28: Vor- und Nachteile einer Konkretisierung der Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Windenergieanlagen

Vorteile	Nachteile
<p>Möglichkeit der Festlegung von Produkthanforderungen (z.B. Anforderung an Konstruktion bezüglich Langlebigkeit und Reparierbarkeit, Wartung, Kennzeichnung bestimmter Materialien, Einsatz von Sekundärrohstoffen, etc.);</p> <p>Mögliche Vorgaben decken Abfallstatus (z.B. Getrennthaltspflicht, Anforderung an hochwertige Entsorgung) ab;</p>	<p>Erfahrungen aus anderen Bereichen der Produktverantwortung zeigen, dass Produktdesign aus Sicht des Abfall-Status anderen Interessen im Lebenszyklus stark untergeordnet ist; EU-Binnenmarkt muss bei nationaler Regelung berücksichtigt werden; Langlebigkeit und Reparierbarkeit von WEA ist bereits im Interesse von Hersteller und Betreiber; Durch die lange Zeitspanne zwischen Produktkonzeption und Entsorgung besteht das Risiko, dass komplett am Bedarf der fortschreitenden Entsorgungs- und Recyclingtechnologie vorbeikonzipiert wird;</p> <p>Verpflichteter im Rahmen der Produktverantwortung wäre der Hersteller einer</p>

	WEA, verpflichtet für den Rückbau ist jedoch der Betreiber; Getrennterfassung von Windenergieanlagen ist bereits gegeben, Entsorgung muss für einzelne Komponenten verbessert werden;
Kostenbeteiligung durch Hersteller Weitere Chancen der Wertschöpfung für Hersteller durch maßgeschneiderte Rückbaukonzepte für die eigenen Anlagenmodelle - Effizienzsteigerung durch Spezialisierung und Herstellerwissen.	Wertschöpfung bei WEA findet nicht ausschließlich beim ggfs. zu verpflichtenden Hersteller statt, sondern über einen maßgeblichen Zeitraum auch beim Betreiber; Sicherheitsleistung für den Rückbau muss aktuell vom Betreiber geleistet werden, die Verpflichtung zum Rückbau läge dann beim Hersteller;
Hersteller verfügt über relevante Kenntnisse für den Rückbau (z.B. verbaute Materialien, Konstruktion etc.); Stärkung der Transparenz von Rückbaukosten, was eine Abschätzung möglicher Finanzierungslücken erleichtern würde;	Rückbau und Entsorgung finden üblicherweise stark zeitversetzt (mind. 15-20 Jahre) nach Bau der WEA statt, was eine Informationsweitergabe erschwert; Transparenz bei bestimmten Informationen können wettbewerbsrelevant sein und deshalb nicht weitergegeben werden;
Üblicherweise hohe Effizienz bei der Vorgabenumsetzung über Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung;	Auflagen einer erweiterten Herstellerverantwortung können den weiteren Ausbau der Windenergie in Deutschland behindern;

Quelle: (Ramboll)

Als Zwischenfazit überwiegen aus unserer Sicht die Nachteile der Einführung einer Produktverantwortung für gesamte WEA. Die Umsetzung einzelner Elemente (z.B. Informationspflichten für den Hersteller) können aber durchaus relevant und zweckdienlich sein.

7.4.2.2 Produktverantwortung für WEA-Komponenten

Neben einer allgemeinen Produktverantwortung für Hersteller von WEA besteht auch die Möglichkeit einer Konkretisierung der Produktverantwortung für kritische Komponenten von WEA, z.B. für Rotorblätter oder Getriebe, die SEE Magnete enthalten. So haben Chrerrington et al. bereits 2012 die Vorteile einer Produktverantwortung für Rotorblätter herausgearbeitet.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass einige WEA-Komponenten bereits einer spezifischen Produktverantwortung unterliegen können (siehe Kapitel 2.1.3). Beispielsweise können in WEA verwendete Energiespeichersysteme dem BattG unterliegen oder bestimmte Betriebsmittel und Hydraulikflüssigkeiten der Altölv.

Das ElektroG greift nicht für die gesamte WEA, da eine WEA zwar zur Stromerzeugung dient, üblicherweise eine Betriebsspannung von ca. 700 Volt aufweist und somit i.d.R. die Definition eines Elektro- und Elektronikgeräts nach § 3 Abs. 1 ElektroG erfüllt, aber durch die Ausnahmeregelung für ortsfeste Großanlagen nach § 2 Abs. 2. Nr. 5 ElektroG vom Anwendungsbereich ausgenommen ist.

Einzelne elektronische Komponenten der WEA können aber dennoch dem ElektroG unterliegen, z.B. wenn die Komponenten nicht speziell als Teil der WEA konzipiert und darin eingebaut sind (siehe § 2 Abs. 2 Nr. 6 ElektroG bzw. § 2 Abs. 2 Nr. 2 ElektroG). Die genaue Abgrenzung muss im Einzelfall getroffen werden, folgen aber der grundsätzlichen Fragestellung, ob die Komponenten speziell für die WEA konzipiert sind (nicht im Anwendungsbereich des ElektroG), sodass sie nur mit dieser zusammen genutzt werden können oder ob es sich um standardisierte Geräte handelt, die auch in anderem Zusammenhang oder eigenständig verwendet werden können (im Anwendungsbereich des ElektroG).

Zur Diskussion der Konkretisierung der Produktverantwortung für kritische Komponenten von WEA, z.B. für Rotorblätter oder Generatoren, die SEE Magnete enthalten, ist zunächst der mögliche Adressat zu diskutieren. Für das Beispiel der Rotorblätter wäre der Adressat einer Produktverantwortung wahrscheinlich der Hersteller der gesamten WEA, da der Hersteller der Rotorblätter üblicherweise

nur als Zulieferer agiert und nach Design und Vorgaben des WEA-Herstellers fertigt. Auch das Inverkehrbringen der Rotorblätter geschieht üblicherweise durch den WEA-Hersteller.

Eine Übersicht von Vor- und Nachteilen einer Konkretisierung der Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Komponenten einer Windenergieanlage ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 29: Vor- und Nachteile einer Konkretisierung der Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Komponenten einer Windenergieanlage

Vorteile	Nachteile
<p>Möglichkeit der Festlegung von Produkthanforderungen; Kennzeichnungs- und Informationspflichten; Förderung einer recyclinggerechten Konstruktion; Förderung der Wartung mit dem Ziel Langlebigkeit Betreiberpflichten werden teilweise auf den Hersteller übertragen; Rückbaukonzepte der Hersteller werden zum Auswahlkriterium beim Kauf einer Anlage</p>	<p>Erfahrungen aus anderen Bereichen der Produktverantwortung zeigen, dass Produktdesign aus Sicht des Abfall-Status anderen Interessen im Lebenszyklus stark untergeordnet ist; Für Rotorblätter ist dies ebenso zu erwarten, da z.B. nicht Recycling-gerechte Konstruktionen Vorteile während der Produktphase bieten kann; Obwohl keine pflichtig zu EU harmonisiertem Vorgehen besteht, stehen länderspezifische Produktvorgaben in latenter Spannung zum Ansatz des EU-Binnenmarkt Langlebigkeit und Reparierbarkeit von Rotorblättern ist bereits im Interesse von Herstellern und Betreibern;</p>
<p>Mögliche Vorgaben decken Abfallstatus (z.B. Getrennthaltepflcht, Anforderung an hochwertige Verwertung) ab; Keine unkontrollierte Vermischung mit anderen Abfällen Produkt- und branchenspezifische Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren auf der Grundlage des Herstellerwissens; Grundlage für standardisierte Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren; Sicherung der Rezyklat- oder ggf. der Ersatzbrennstoffqualität; An den produktseitigen Technologiewandel kontinuierlich angepasste Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren; Zuverlässige und ressourcensichernde Rückgewinnung von NE- und Fe-Metallen. Entlastung der kommunalen Abfallwirtschaft um (bereits aufgrund der Geometrie von Rotorblättern) problematische Abfall, die allerdings nur in vergleichsweise geringen Mengen vorkommen</p>	<p>Verpflichteter im Rahmen der Produktverantwortung wäre der Hersteller einer WEA, Die Rückbauverpflichtung liegt jedoch bei dem Betreiber, wodurch sich praktische Konsequenzen ergeben können, die nicht direkt absehbar sind; Getrennterfassung von Rotorblättern ist in der Praxis bereits gegeben; Entsorgungssituation bei Rotorblättern aus Verbundmaterialien ist aktuell stark diskutiert. Für GFK-haltige Abfälle etabliert sich die Mitverbrennung in Zementwerken und es besteht die Frage nach weiteren Kapazitäten bei steigenden Abfallmengen. Bei CFK-haltigen Bauteilen gibt es ebenfalls bereits Entsorgungsmöglichkeiten, die aktuell kontrovers diskutiert werden: zum einen bezüglich deren Hochwertigkeit und Praxistauglichkeit, zum anderen bezüglich verfügbarer Kapazitäten (siehe Kapitel 7). Die Diskussion zu Entsorgungsmöglichkeiten beider Stoffströme erstreckt sich jedoch auch auf andere Produkte aus Verbundwerkstoffen und müsste ggfs. eher stoffstromspezifisch statt produktspezifisch adressiert werden. Rückbau und Entsorgung finden üblicherweise stark zeitversetzt (mind. 15–20 Jahre) nach Bau der WEA statt; wodurch etwaige Technologieänderungen nicht vorhersehbar sind;</p>
<p>Hersteller würde sich an Finanzierung der Entsorgung beteiligen; Verursachergerechte Zuordnung der Entsorgungskosten Effizienz durch Spezialisierung sowie Berücksichtigung des Herstellerwissens.</p>	<p>Wertschöpfung bei WEA findet nicht ausschließlich beim ggfs. zu verpflichtenden Hersteller statt, sondern über einen maßgeblichen Zeitraum auch beim Betreiber; Aktueller Kostenfaktor ist eher Rückbau (Kran) und nicht die Entsorgung, im Bereich der Entsorgung</p>

<p>Hersteller verfügt über relevante Kenntnisse für den Rückbau (z.B. verbaute Materialien, Konstruktion etc.); dies führt ggfs. auch zu Transparenz bei Rückbaukosten was eine Abschätzung möglicher Finanzierungslücken erleichtern würde;</p> <p>Üblicherweise hohe Effizienz bei der Vorgabenumsetzung über Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung;</p>	<p>sind Rotorblätter ähnlich hohe Kostentreiber wie die anfallenden Betonmengen</p> <p>Auflagen einer erweiterten Herstellerverantwortung können den weiteren Ausbau der Windenergie in Deutschland behindern;</p>
--	--

Quelle: (Ramboll)

Im Rahmen der Diskussion um eine mögliche Produktverantwortung für einzelne WEA-Komponenten wäre eine weitere Idee die Etablierung von Wartungskreisläufen für kritische Komponenten wie Rotorblätter, Gondeln, Transformatoren, Getriebe, etc. Die Frage ist, ob Hersteller zu solchen Wartungskreisläufen verpflichtet werden sollten, um die Langlebigkeit und Reparierbarkeit zu sichern und eine Wiederverwendung, Vorbereitung zur Wiederverwendung oder stoffliche Verwertung am Ende des Lebenszyklus der Komponenten zu fördern. Dies wäre über eine Art individueller Herstellerverantwortung zu realisieren, um dem Umstand der Anlagenvielfalt gerecht zu werden und den Herstellern einen Anreiz zu recyclinggerechter Konstruktion der Komponenten zu geben.

Bei Großkomponenten haben sich solche Wartungskreisläufe bereits in der Praxis etabliert (z.B. Enercon Partner Konzept (EPK) oder Vestas AOM4000). Der technologische Fortschritt, d.h. die stetige Weiterentwicklung von WEA sowie teilweise geringe Stückzahlen begrenzen jedoch aktuell das Potenzial. Weiterhin besteht eine solche Wartungsverpflichtung bereits umfänglich in der Praxis zur Absicherung der strukturellen Integrität, für einige Komponenten sogar jährlich im Rahmen sogenannter Wiederkehrender Prüfungen (WKP). Für andere Komponenten wird der Betreiber aus ökonomischen Interessen diese Wartungen durchführen (lassen). Eine Festlegung der Wartungen auf den Hersteller erscheint problematisch, da sich hier Dienstleister entwickelt haben und die Entwicklung eher weg vom Hersteller geht. Vermutlich bedarf eine solchen Festlegung auch kartellrechtliche Prüfung.

Zusammenfassung Vor- und Nachteile Übertragung möglicher Elemente einer Produktverantwortung auf Rotorblätter

Dennoch könnte die Übertragung von bestimmten Elementen der Produktverantwortung auf Rotorblätter zielführend sein (vgl. Tabelle 29), da diese die nötigen Grundlagen für das Erreichen der formulierten Anforderungen an einen ressourcensichernden Rückbau erst ermöglicht. Allerdings erfordern derartige Maßnahmen einen langen zeitlichen Vorlauf sowie die Abstimmung mit den Herstellern. Eine freiwillige Selbstverpflichtung der Branche wäre eine Alternative. Erste Tendenzen, wie die bereits erwähnten Wartungskreisläufe, sind in der Branche bereits etabliert. Mit weiteren Vorgaben wird unter anderem durch den Trend der europäischen Kreislaufwirtschaftspolitik in der Branche gerechnet.

Insbesondere die folgenden Elemente der Produktverantwortung werden als hilfreich für die Rotorblattverwertung erachtet

1. Informations- und Kennzeichnungspflichten hinsichtlich der verwendeten Materialien der Rotorblätter

Eine notwendige Voraussetzung für die hochwertige Verwertung von Rotorblättern ist die Kenntnis der Materialzusammensetzung. Bisher werden Faserverbundwerkstoffe eher nach dem „Trial and error“ Prinzip und nach Erfahrungswerten repariert und verwertet. Eine Informationspflicht der Hersteller sowie eine Kennzeichnung, beispielsweise von CFK-Elementen, würde die Verwertung erleichtern und verbessern.

Die Umsetzung solcher Vorgaben erfordert Informationsstandards, Verantwortliche für die Archivierung und Erhebung der Informationen (Behörde, Betreiber, Hersteller, Rückbau-Unternehmen), sowie Archivierungsstandards unter Berücksichtigung des Wettbewerbsrechts.

2. Gewährleistung der Entsorgungssicherheit von Rotorblättern sowie verursachergerechte Zuordnung der Entsorgungskosten

Über eine sogenannte Branchenlösung könnten Hersteller zur hochwertigen Verwertung von Rotorblättern und damit zur Gewährleistung einer Entsorgungssicherheit für diese Abfallströme verpflichtet werden. Damit könnte eine maßgeschneiderte Verpflichtung für die Branche und das Produkt geschaffen, sowie die Entsorgungskosten nach dem „Polluter Pays“ Prinzip verursachergerecht zugeordnet werden. Für GFK-haltige Bauteile wäre so ein starker Anreiz geschaffen, die bestehenden Entsorgungsstrukturen zu stärken und weiter auszubauen. Dennoch können Elemente einer Produktverantwortung als Innovationstreiber agieren und die Entwicklung von Verwertungsmöglichkeiten fördern.

3. Produktspezifischer technischer und organisatorischer Ansatz (Branchenlösung) sowie separate Aufbereitung mit dem Ziel der Qualitätssicherung von Rezyklaten und Ersatzbrennstoffen;

Spezialisierte Aufbereitungsverfahren sind Grundlage einer hochwertigen Verwertung und die Sicherung von Rezyklatqualitäten und gegebenenfalls auch der Qualitäten von Ersatzbrennstoffen. Produktspezifische Aufbereitungsverfahren grenzen die Materialvielfalt und ermöglichen spezialisierte Verfahren der Separation und Schadstoffentfrachtung. Ein hoher Spezialisierungsgrad auf der Grundlage des Herstellerwissens vereinfachen die Verfahren und ermöglichen die Optimierung der Aufbereitungstechnik.

Den Vorteilen einer Produktverantwortung für Rotorblätter stehen einige Herausforderungen gegenüber (vgl. Tabelle 29).

Zuallererst steht einer isolierten Regelung in Deutschland in latenter Spannung mit dem das Konzept eines EU-Binnenmarktes entgegen. Um eine Lösung (d.h. eine Verpflichtung oder eine freiwillige Selbstverpflichtung von Rotorblatt-Herstellern) auf europäischer Ebene anzustoßen, sollte auch ein enger Austausch auf dieser Ebene stattfinden, z.B. durch Einbindung der europäischen Behörden und Interessensgruppen wie z.B. Wind Europe als Verband der Windenergie auf europäischer Ebene.

Einer Informations- und Kennzeichnungspflicht stehen auch eine Reihe Hindernisse gegenüber. Beispielsweise müssen, wie oben bereits bemerkt, das Format der Daten und der Speicherort (Hersteller, Betreiber, Behörde) geklärt werden, um auch in Zukunft bei etwaigen Geschäftsaufgaben von Herstellern noch Zugriff auf diese Daten haben zu können. Weiterhin haben Rotorblatt-Hersteller selbst nicht immer exakte Kenntnisse über die verbauten Materialien und diese Daten können wettbewerbsrelevant sein.

Der Verpflichtung zur Verwertung von Rotorblättern steht weiterhin entgegen, dass der Betreiber in der Verantwortung für den Rückbau steht, der Hersteller jedoch für die Entsorgung von Rotorblättern steht. In der Praxis kann dies bedeuten, dass Hersteller eine Pflicht erfüllen müssen, für deren ordnungsgemäße Erfüllung Hersteller wiederum stark von Betreibern abhängig sind.

Allen weiteren Überlegungen in Richtung individueller Herstellerverantwortung müssen berücksichtigen, dass dann zu überlegen wäre ggfs. auch die Rückstellungen für Rückbau und Entsorgung bei den Herstellern und nicht mehr bei den Betreibern gebildet werden müssen. Dies erscheint im aktuellen Ausschreibungsmarkt mit internationalen Betreibern und Herstellern eher nicht zielführend.

7.5 Sonstige Maßnahmen

Neben den oben beschriebenen Maßnahmen, bietet auch die verstärkte Nutzung von Synergien große Vorteile.

So können insbesondere die Betonschuttabfälle aus rückgebauten Windparks als Schotter in benachbarten neuen Windparks, die zeitgleich errichtet werden, genutzt werden. Ein solches Vorgehen spart sowohl auf Seiten des Betreibers des rückgebauten Windparks, als auch beim Betreiber des neuen Windparks Kosten und bietet zudem auch für die Umwelt Vorteile, da Transportaufwendungen und somit Emissionen reduziert werden.

Weiterhin sind auch Kooperationen verschiedener Betreiber von gleichzeitig rückzubauenden Windparks denkbar, wobei hier insbesondere auf eine Reduzierung der Rüstkosten für den Kran abgezielt wird. Einschränkend muss diesbezüglich jedoch festgehalten werden, dass derartige Synergien nur genutzt werden können, wenn WEA mit ähnlichen Dimensionen, in räumlicher Nähe und zu einem sehr ähnlichen Zeitpunkt rückgebaut werden sollen.

Es kann erwartet werden, dass die Nutzung solcher Synergien, ohne die Schaffung zusätzlicher Anreize aufgrund von Kostenvorteilen, sich von selbst ergeben. Als Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch in jedem Fall notwendig, dass eine gewisse Transparenz der notwendigen Informationen vorherrscht und diverse Betreiber in die Lage versetzt werden, derartige Kooperationen überhaupt einzugehen. In diesem Zusammenhang ist die Einführung des Marktstammdatenregisters, welches als Informationsquelle genutzt werden kann, ein erster richtiger Schritt. Sobald der Weiterbetrieb von WEA, d.h. ein standortspezifischer Betrieb über die ursprünglich in der Typenprüfung ausgewiesene Betriebsdauer hinweg, häufiger vorkommt, wäre zudem eine Ergänzung des Marktstammdatenregisters hilfreich, aus der der Ablauf der Standsicherheit hervorgeht. Diese Angabe könnte zudem auch von den zuständigen Behörden genutzt werden. Beispielsweise um rückgebaute/bald zu rückbauende WEA zu identifizieren (siehe auch Problembeschreibung in Kapitel 2.2.4) oder um einfach nachzuprüfen, ob ggf. WEA außerhalb des Zeitraums, für den die Standsicherheit sicher nachgewiesen wurde, betrieben werden. Im Fall eines Weiterbetriebs (nach entsprechendem Weiterbetriebsgutachten) wäre dann auch die resultierenden Laufzeitverlängerung zu erfassen.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

In der folgenden Tabelle sind, die von uns im vorigen Kapitel diskutierten Maßnahmen bezüglich ihrer Reichweite abgebildet. Prioritär erachtete Maßnahmen aus dem vorigen Kapitel sowie der weitere Forschungsbedarf sind weiterhin im Folgenden zusammengefasst.

Tabelle 30: Zusammenfassung möglicher Maßnahmen

	Rückbau	Entsorgung
Bestehende WEA	Technische Leitlinien/Verwaltungsvorschriften zum Rückbau Normen zu ausgewählten Rückbau-Tätigkeiten Nachträgliche Anordnungen für BImSchG-genehmigte Anlagen	Technische Leitlinien zur Entsorgung Normen zu ausgewählten Entsorgungstätigkeiten
Zukünftige WEA	Maßnahmen wie bei bestehenden WEA (außer nachträgliche Anordnungen) Rechtliche Leitlinien zur Konkretisierung der Nebenbestimmungen zu den BImSchG-Genehmigungen (Informationspflicht, Fundament-Rückbau, Sicherheitsleistungen, etc.)	Maßnahmen wie bei bestehenden WEA Elemente einer Produktverantwortung für WEA-Komponenten
Sonstige	Einführung und ggfs. Erweiterung des Marktstammdatenregisters zur Schaffung von Synergien bei Rückbau und Entsorgung	
Forschungsbedarf	Optimierung der Bewirtschaftung spezifischer Abfallströme Wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierungsbedarf	

Quelle: (Ramboll)

8.1 Schaffung von Leitlinien für den Rückbau und die Verwertung von WEA

Aufgrund der auslaufenden Förderung durch das EEG ist mit einem erhöhten Rückbau von WEA, die Ende der 1990er Jahre gebaut wurden, zu rechnen. Insbesondere in den Jahren 2021/2022 ist mit erhöhtem Rückbau und den damit verbundenen Abfallmengen zu rechnen. Ein weiterer Gipfel ist für die Jahre ab 2035 zu erwarten (siehe Kapitel 3). Um den Rückbau und die Verwertung von WEA insgesamt zu steuern sowie eine umweltgerechte und ressourcenschonende Verwertung der entstehenden Stoffströme sicherzustellen, sind Lenkungsmaßnahmen zweckmäßig.

Es wird daher empfohlen, einen Bund-Länder-Arbeitskreis, z. B. innerhalb der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) oder Abfall (LAGA) einzurichten, in welchem unter Berücksichtigung der Erfahrungen der Genehmigungsbehörden Leitlinien für den Rückbau und die Verwertung von Windenergieanlagen erarbeitet werden. Die Diversität des Anlagenbestandes, die abweichenden geologischen Gegebenheiten und die starke Position der Bundesländer sprechen für bundesweit abgestimmte jedoch flexible Empfehlungen und Vollzugshilfen. Die zu erarbeitende Leitlinie soll Behörden und Anlagenbetreibern im Fall des Rückbaus Hilfe bieten und eine gute und umweltverträgliche Rückbaupraxis unterstützen. Die Leitlinien könnten sich an den Empfehlungen aus Tabelle 29 in Kapitel 7.3.2.1 orientieren.

Technische Leitlinien wären ein flexibles Instrument und könnte unverbindliche aber wirksame Vorgaben für die beteiligten Akteure machen und Verweise auf bestehende Gesetze und Normen, z.B. zum Arbeitsschutz beim Rückbau, beinhalten. Ein Erfolgsfaktor für eine solche Leitlinie ist, wenn diese

auf einen allgemein anerkannten Branchenstandard hinweisen, der auf einem Konsens zwischen allen Beteiligten fußt.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Schaffung von Leitlinien zum Rückbau inklusive Hinweise für Behörden zum genehmigungsrechtlichen Spielraum (Möglichkeit der nachträglichen Anordnungen für den Rückbau bestehender WEA sowie die Konkretisierung der Nebenbestimmungen zur Genehmigung für den Rückbau zukünftiger WEA) aus unserer Sicht zielführender erscheint als die Schaffung eigener Gesetze und Verordnungen. Dennoch wäre auch die Option der Gestaltung solcher Leitlinien als Verwaltungsvorschrift denkbar. Die Umsetzung solcher Leitlinien in die Praxis sowie ein stärkerer Vollzug der bestehenden rechtlichen Vorgaben sollten aus unserer Sicht zunächst Priorität haben. Anforderungen an den Rückbau müssen so umgesetzt werden, dass die gebildeten und zukünftig zu bildenden Rückstellungen, den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen entsprechen. Sollten die Anforderungen so ambitioniert gewählt und umgesetzt werden, dass unverhältnismäßig hohe Rückstellungen gebildet werden müssten, kann dies zu Ausweichverhalten der beteiligten Akteure führen, die nur begrenzt durch verstärkte Kontrollen abgefangen werden können.

Optional: Weiterentwicklung der Leitlinien/Verordnung zu WEA-Rückbau für andere dezentrale Energieanlagen

Diverse Publikationen der Bundesregierung (Bundesregierung o.J.), des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi o.J.) oder des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE 2007) prognostizieren ein nennenswertes Potenzial der dezentralen Energieversorgung in Deutschland.

Es erscheint wahrscheinlich, dass die in diesem Forschungsvorhaben analysierten Herausforderungen für den Rückbau von WEA und der Entsorgung der entstehenden Stoffströme auch teilweise auf andere dezentralisierte Anlagen zur Energieerzeugung übertragbar sind. Aus diesem Grund ergibt sich ein Forschungsbedarf bezüglich der Übertragbarkeit bzw. Weiterentwicklung der hier vorgeschlagenen Leitlinien bzw. einer Verordnung auf andere dezentralisierte Anlagen zur Energieerzeugung.

8.2 Schaffung technischer Standards für bestimmte Rückbau- und Entsorgungstätigkeiten

Bestimmte technische Details des Rückbaus und Recyclings von WEA sind noch nicht standardisiert, und könnten von Standardisierungsgremien erarbeitet werden. Leitlinien der Behörden könnten auf vorhandene Standards verweisen und weiteren Normungsbedarf aufdecken (z.B. bei Sägen/Zerkleinerung von Rotorblätter, Recyclinggerechte Konstruktion von Rotorblättern, Materialanforderungen für entstehende Stoffströme, Vorgaben zur Zwischenlagerung, etc.). Die vorliegenden Forschungsergebnisse (siehe Kapitel 7.3.3.2) verdeutlichen jedoch, dass für viele Arbeitsschritte bereits Normen bestehen, die beachtet oder ggf. angepasst werden müssten. Hier besteht weiterer Prüfungsbedarf, der im Zuge der Entwicklungen der beschriebenen technischen Leitlinien erfolgen könnte.

Optional: Zertifizierung für Rückbau-Unternehmen/ für Entsorgungsunternehmen die Rückbautätigkeiten übernehmen

In Anlehnung an die Zertifizierung für Entsorgungsfachbetriebe nach §56/57 des KrWG könnten Rückbau-Unternehmen in Anlehnung an den vereinbarten Rückbau-Standard zertifiziert werden. Auch eine Zertifizierung von Entsorgungsunternehmen, die bestimmte WEA-Komponenten verwerten wäre grundsätzlich denkbar. Dennoch sollte der erforderliche bürokratische Aufwand geprüft werden und mit einem möglichen Nutzen ins Verhältnis gesetzt werden. Dazu besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

8.3 Prüfung der Einführung spezifischer Elemente einer Produktverantwortung für Rotorblätter

Rotorblattabfälle sind aufgrund der Faserverbundwerkstoffe außerordentlich schwer zu verwertende Anlagenteile und bedürfen einer besonderen Aufbereitung. Eine Regelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung könnte für diesen vergleichsweise homogenen und ähnlich zu behandelnden Abfallstrom zu einer verursachergerechten Zuweisung der Entsorgungskosten beitragen und langfristig eine branchen- und produktspezifische sowie umweltschonende und hochwertige Abfallbehandlung sicherstellen (siehe Kapitel 7.4.2.2). Daher sollte die Einführung der im Folgenden genannten, spezifischen Elemente einer Produktverantwortung nach § 23 KrWG für Rotorblätter geprüft werden:

- Informations- und Kennzeichnungspflichten zur Materialzusammensetzung der Rotorblätter;
- Produkt- und branchenspezifischer technischer und organisatorischer Ansatz (Branchenlösung);
- Separate Aufbereitung mit dem Ziel der Qualitätssicherung von Rezyklaten und Ersatzbrennstoffen;
- Verpflichtung zur hochwertigen Verwertung bzw. Gewährleistung der Entsorgungssicherheit;
- Einbeziehen des Herstellerwissens sowie dem produktseitigen Technologiewandel angepasste Aufbereitungstechnologien;
- Verursachergerechte Zuordnung der Entsorgungskosten und Organisationspflichten während der Entsorgung

Den Vorteilen einer Produktverantwortung für Rotorblätter stehen einige Herausforderungen gegenüber:

- Trotz der grundsätzlichen Möglichkeit und en sich bietenden Vorteilen von länderspezifischen Vorgaben, sollte beachtet werden dass viele WEA-Hersteller europaweit agieren. Eine isolierte Regelung in Deutschland ist dabei möglich, steht jedoch in latenter Spannung mit der grundsätzlichen Idee eines EU-Binnenmarktes;
- Format und Speicherort (Hersteller, Betreiber, Behörde) sowie Frage der Wettbewerbsrelevanz der zu erhebenden Daten;
- Lange Lebensdauern von Rotorblättern stehen der individuellen Produktverantwortung entgegen
- Die Diskussion zu Entsorgungsmöglichkeiten von Verbandmaterialien (GFK/CFK) erstreckt sich auch auf andere Produkte aus solchen Materialien und müsste ggfs. eher stoffstromspezifisch statt produktspezifisch adressiert werden.

Insgesamt besteht ein signifikanter Bedarf an hohem zeitlichem Vorlauf für Umsetzung solcher Maßnahmen. Ein Erfolgsfaktor ist die Ausgestaltung einer Produktverantwortung bzw. die Einführung von nur Teilelementen selbiger in Abstimmung mit den Herstellern bzw. eine Hinwirkung auf eine freiwillige Selbstverpflichtung der Branche.

8.4 Optimierungsbedarf bei der Bewirtschaftung spezifischer Abfallströme

Etwaige Probleme in der Entsorgung von Stoffströme aus WEA, die nach Aufbereitung gleichwertig zu Stoffströmen anderen Ursprungs sind und nicht mehr eindeutig WEA zugeordnet werden können, sollten wie in Kapitel 7.3.3.1 erwähnt in etwaigen Leitlinien/gesetzlichen Vorgaben nicht behandelt werden. Dies ist insbesondere hervorzuheben, da ein Großteil des Regelungsbedarfs für die Entsorgung von Abfällen aus WEA (siehe Kapitel 7.3.2) Stoffströme betrifft, deren Entsorgung aktuell insgesamt problematisch ist.

Darunter fällt z.B. der Forschungsbedarf zur Bündelung dezentral in unterschiedlichen Branchen anfallender Abfälle mit ähnlicher Zusammensetzung an wirtschaftsstrategischen und umweltrelevanten Metallen (z.B. SEE-haltige Materialien wie Getriebe von WEA) sowie der Entwicklung geeigneter Konzepte zum Recycling von Neodym oder anderen SEE.

Neben technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen, die es zu lösen gilt, sind auch administrative Fragestellungen zu klären. Beispielsweise wäre die Einführung neuer Einträge für CFK/GFK-haltige Abfälle in der Abfallverzeichnisverordnung zu diskutieren. Ebenso wäre denkbar die Nachweispflichten aus §50 KrWG auf Grundlage des § 51KrWG auf bestimmte nicht-gefährliche Stoffströme zu erweitern. Die weitere Schaffung von nicht-gefährlichen aber überwachungspflichtigen Abfällen und die damit verbundenen bürokratischen Auflagen ist dabei aber sorgfältig dem Nutzen gegenüber zu stellen.

Zu allen genannten Themengebieten bestehen bereits vereinzelte Forschungsvorhaben. Dennoch ist weiterer Bedarf zu erwarten, um die Herausforderungen zu meistern.

8.5 Wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierungsbedarf

Kapitel 3.4 enthält einen Vergleich zwischen Rückbau- und Entsorgungskosten (extrapoliert in die Zukunft, basierend auf der aktuellen Praxis) und einer Abschätzung der tatsächlich gebildeten Rückstellung nach unterschiedlichen Modellen (Modell HESSEN²³ und Modell BVerWG²⁴). Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass mittelfristig eine Finanzierungslücke droht.

Kapitel 6.3 greift diesen Vergleich auf und diskutiert einen Vergleich der gebildeten Rückstellungen mit den Kosten eines optimierten Rückbaukonzepts wie in den Kapiteln 4 und 5 vorgeschlagen. Eine detaillierte Prognose zu den erwarteten Rückbaukosten ist dabei nicht möglich. In der Tendenz sind aber höhere Rückbaukosten durch optimierten Rückbau zu erwarten, was zu einer Vergrößerung der Finanzierungslücke führen kann. Somit ergeben sich zwei weitere Themenfelder für Forschungsbedarf.

Zum einen könnte die Methode zur Berechnung der Sicherheitsleistung überarbeitet und in einem Rückbau-Leitlinien/einer Verordnung/etc. konkretisiert und vereinheitlicht werden. Insbesondere die Grundlage der Berechnungskosten muss dabei erörtert werden. Neben den bestehenden Berechnungsgrundlagen (Nabenhöhe der WEA, Installierte Leistung, etc.) könnte die Investitionssumme für den WEA-Aufbau herangezogen werden, die je nach Anlagentyp und Region durchaus den Rückbaukosten entsprechen kann. Allerdings besteht die Gefahr, dass über vereinfachte Formeln zu der Sicherheitsleistung ein komplexes Konstrukt pauschal vereinfacht wird (Bei gleichartigen WEA ist der erzielte Investitionspreis unabhängig von Rückbaukosten). Zielführender erscheint eine regelmäßige Überprüfung der Sicherheitsleistung durch einen unabhängigen Sachverständigen (z.B. im Intervall von 10, 15, 18, 19 Jahren, nachfolgend jährlich). Zudem sollten einige Kernaspekte wie die im Vorhaben vorgeschlagenen Anforderungen an den Rückbau fest definiert sein (vollständiger Rückbau der Fundamente, etc.). Weiterhin sollten Erlöse aus dem Verkauf

²³ Nabenhöhe der Windenergieanlage (m) x 1000 = Betrag der Sicherheitsleistung (€)

²⁴ 30 000 € pro Megawatt installierte elektrische Leistung

von Komponenten oder der Verwertung von Sekundärrohstoffen mit positiven Marktwert nach dem Rückbau der WEA nicht heute schon Einfluss auf die Sicherheitsleistung nehmen können, da die zukünftigen Marktwerte nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

Zum anderen müssen die Anforderungen an den Rückbau so umgesetzt werden, dass die gebildeten und zukünftig zu bildenden Rückstellungen, den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen entsprechen. Sollten die Anforderungen so ambitioniert gewählt und umgesetzt werden, dass hohe Rückstellungen gebildet werden müssten, kann dies im Fall der Unverhältnismäßigkeit von Gerichten korrigiert werden bzw. zu Ausweichverhalten der beteiligten Akteure führen, welche nur begrenzt durch verstärkte Kontrollen abgefangen werden können.

9 Anlagen

A Gesprächsleitfaden für Telefoninterviews (Kapitel 2)

Einleitung – Erläuterung der Verantwortlichkeiten

0	Interne Frage	Wer sind die Verantwortlichen?	
0	Interne Frage	Welche Dokumentationspflichten sind mit dem Rückbau verbunden?	
0	Interne Frage	Gibt es Verbände zu der Thematik „Recycling, Verwertung ...“ die sinnvollerweise angesprochen werden sollten?	
0	Interne Frage	Allgemeines Gespräch zum Rückbau mit dem BWE	

1) Aktuelle Praxis des Rückbaus

Nr.	Kategorie	Frage	Details zur Frage																
			Fachfirmen	Betreiber	Behörden	Banken	Verpächter	WEA-Hersteller	Verbände	Entsorgungsfirmen	Internetportale	Internetrecherche							
1	Allgemein	Wie erfolgt der Rückbau einer WEA üblicherweise? Was sind typische techn. Methoden? Wie ist die Vorgehensweise beim Rückbau? Gibt es Besonderheiten bei Repowering-Projekten? Gibt es besondere arbeitsrechtliche Bestimmungen die zu beachten sind (z.B. beim Umgang mit CFK/GFK)?	Bei vollständiger Entsorgung		x														
2	Allgemein	Was sind typische Probleme beim Rückbau einer WEA (z.B. technischer, aber auch genehmigungsrechtlicher Art)?	Bei vollständiger / teilweiser Weiterverwertung		x														
3	Allgemein	Welche Anforderungen werden an die Wiederherrichtung von Flächen nach dem Rückbau gestellt?	Bei vollständiger Entsorgung		x	x	x												
4	Allgemein	Wo liegen typische Schnittstellenrisiken / -probleme?	Bei vollständiger / teilweiser Weiterverwertung		x	x										x			
5	Allgemein	Wer sind die beauftragten Akteure? Werden Subunternehmer eingesetzt?			x	x										x			
6	Allgemein	Welche Dokumentationspflichten sind mit dem Rückbau verbunden? Werden Entsorgungsnachweise eingefordert?			x	x	x									x			
7	Allgemein	Gibt es während des Rückbaus eine differenzierte Behandlung für folgende Stoffgruppen / Komponenten:	GFK	Rotorblätter	x											x			
			CFK	Nabe															
			FE-Metalle (Stahl, ...)	Gondel (Gehäuse)															
			Nicht FE-Metalle (Al, CU, ...)	Gondel (Antriebsstrang)															
			Seltene Erden (Neodym, ...)	Turm															
			Beton	Fundament															
			Sonstiges (Geotextil, Lacke, Holz, ...)	Kranstellflächen															
			Schotter	Batterien															
			SF6	Elektrogeräte, z.B. IT Ausstattung, E-Technik															
			Öle	(Trafos, Umrichter, Schaltanlagen)															
8	Projektspezifisch	Was sind typische Mengen für folgende Stoffgruppen die als separat erfasste Abfälle anfallen / grundsätzlich in der Anlage enthalten sind?	Batterien/Akkus																
			GFK (t)	Projektspezifisch zu beantworten unter Nennung von:	x	x					x		x						
			CFK (t)	-Hersteller, Typ, Anzahl															
			FE-Metalle (Stahl, ...) (t)	- Nennleistung,															
			Nicht FE-Metalle (Al, CU, ...) (t)	Rotordurchmesser,															
			Seltene Erden (Neodym, ...) (t)	Nabenhöhe															
			Beton (t)	- Turmtyp, Fundamenttyp															
Sonstiges (Geotextil, Lacke, ...) (t)																			

9	Allgemein	Was sind typische Behandlungsmöglichkeiten (Verwertung und Beseitigung) für folgende Stoffgruppen:	Schotter (t) SF6 (t) Öle (t) Kühl- & Hydraulikflüssigkeiten (t) Batterien/Akkus (t) Elektrogeräte, IT-Ausstattung (t) GFK CFK FE-Metalle (Stahl, ...) Nicht FE-Metalle (Al, CU, ...) Seltene Erden (Neodym, ...) Beton Sonstiges (Geotextil, Lacke, Holz, ...) Schotter SF6 Öle Kühl- & Hydraulikflüssigkeiten Batterien/Akkus Elektrogeräte, IT-Ausstattung	- Vollständiger vs. Nicht vollständiger Rückbau - Entsorgung vs. Weiterverwendung	x	x						x	
10	Allgemein	Was sind typische Behandlungspfade (Verwertung und Beseitigung) für folgende Komponenten? Wer sind die entsprechenden Entsorgungsfirmen?		Rotorblätter Nabe Gondel (Gehäuse) Gondel (Antriebsstrang) Turm Fundament Kranstellflächen Batterien Elektrogeräte und IT-Ausstattung E-Technik (Trafos, Umrichter, Schaltanlagen)	x	x						x	
11	Allgemein	Wie schätzen Sie die aktuellen (stofflichen) Verwertungsquoten ein? Wie schätzen Sie die Massenanteile für Deponierung / Verbrennung / Verfüllung / Recycling ein? Wo sehen Sie Schwächen? Wo Optimierungsoptionen / -bedarf? Welche (stofflichen) Verwertungsquoten halten Sie (je Stoffgruppe) für erreichbar?		Rotorblätter (CFK) Rotorblätter (GFK) Nabe Gondel (Gehäuse) Gondel (Antriebsstrang) Turm Fundament Kranstellflächen Elektrogeräte und IT-Ausstattung E-Technik (Trafos, Umrichter, Schaltanlagen)								x	
12	Allgemein	Ist die vollständige Weiterverwendung er WEA eine Option? Wie oft kommt eine solche Weiterverwendung vor? Wie erfolgt die Restwertermittlung? Was sind die primären Zielmärkte? Wie schätzen Sie die künftige Entwicklung ein? Stellt die Logistik ein Problem dar?			x	x			x	x		x	

B Hintergrundinformation und Annahmen für die Darstellung der Rückbauprognose in Kapitel 2

B.1 Komponenten einer WEA sowie verwendete Materialien

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten einer WEA kurz bezüglich Ihrer Funktion beschrieben und konstruktive Besonderheiten dargestellt.

Im Anschluss erfolgt eine Abschätzung der zu erwartenden Materialmassen und der Gewichtsanteile bestimmter Materialien, basierend auf den uns bekannten Informationen. Hierzu kann grundsätzlich festgestellt werden, dass die Verfügbarkeit von Informationen bzgl. der stofflichen Zusammensetzungen Lücken haben, was mit der Wahrung von Geschäftsgeheimnissen zu begründen ist.

Wie nachfolgende Analysen aufdecken, sind allgemeine Aussagen zu Materialmassen, bspw. als Funktion der Nennleistung oder der Nabenhöhe, mit starken Unsicherheiten verbunden. Somit können Schätzungen zwar ungefähre Wertebereitstellen, doch sind sie für die Kalkulation von Rückbaukosten oder dem Stoffaufkommen für einzelne Projekte aus unserer Sicht ungeeignet. Bei der Betrachtung des Stoffaufkommens für ganz Deutschland, spielt zudem die Zusammensetzung des deutschen Windenergieanlagenbestandes eine große Rolle. So würden sich Unsicherheiten bei der Ermittlung von aufkommenden Stoffströmen nur dann gegenseitig ausgleichen, wenn von einer ausreichend homogenen Verteilung des Bestandes ausgegangen werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch die Marktanteile der unterschiedlichen Hersteller, sowie deren grundsätzliche Designphilosophie und technischen Konzepte sehr relevant. Basierend auf unserer Marktkenntnis erwarten wir keine ausreichend hohe Durchmischung des deutschen Windparkbestandes und werden daher die einzelnen Spezifika der jeweiligen WEA-Modelle möglichst detailliert berücksichtigen.

Da für den Rückbau eines Windparks bzw. eines spezifischen WEA-Modells einige grundsätzliche Informationen benötigt werden, bspw. um den tatsächlichen Rückbauaufwand abzuschätzen und daran anknüpfend die Rückbaukosten zu bestimmen, fällt der stofflichen Zusammensetzung eine große Bedeutung zu. Da zudem, aufgrund der langen Lebensdauern von WEA, nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass der WEA-Hersteller zum Zeitpunkt des Rückbaus noch verfügbar ist, sollte eine den effizienten und sicheren Rückbau ermöglichende Dokumentation vom Betreiber der WEA bereitgehalten werden. Hierzu wird Betreibern empfohlen frühzeitig, bspw. zur Inbetriebnahme, die notwendigen Daten von Herstellern einzufordern. Hierzu könnten die Vertragsverhandlungen mit dem WEA-Hersteller genutzt werden und innerhalb des Anlageliefervertrags der WEA klare Pflichten des Herstellers zur Übergabe der relevanten Dokumente aufgenommen werden.

Während der Betriebsphase sollten diese Daten dann gesichert und falls erforderlich, z. B. bei einem Austausch von größeren Komponenten, aktualisiert werden. Hierbei die erforderliche Detailtiefe an bereitzuhaltenden Informationen von großer Relevanz. So muss der Rückbau einerseits bestmöglich planbar sein, andererseits müssen Interessen (z. B. Geschäftsgeheimnisse) der WEA Herstellerberücksichtigt werden. Sinnvoll wäre diesbezüglich die Erarbeitung eines standardisierten Formulars, welches die für den Rückbau erforderlichen technischen Details abfragt und nachfolgend die Abschätzung der Rückbaukosten genutzt werden kann. Möglicherweise könnte auf dieser Grundlage auch eine genauere Berechnung der Rückstellleistungen erfolgen.

B.1.1 Rotorblatt

Moderne WEA besitzen typischerweise drei Rotorblätter. Dieses Konzept hat sich als eine Art Optimum aus energetischer Ausbeute, Kosteneffizienz, mechanischer Lastverteilung und Akzeptanz erwiesen. Teilweise befinden sich zudem auch WEA mit nur zwei, sehr selten auch nur einem Rotorblatt in Betrieb. Beide Konzepte sind jedoch hinsichtlich der Anlagenanzahl unbedeutend.

Primärer Nutzen eines Rotorblatts ist die Umwandlung der kinetischen Energie des Windes in Rotationsenergie. Hierbei nutzen moderne WEA-Rotorblätter das Prinzip des Auftriebs und entziehen dem Wind so die kinetische Energie, wobei gemäß dem Betzchen-Gesetz ein maximaler aerodynamischer Wirkungsgrad von ca. 59,2%, nicht überschritten werden kann. Aus Gründen der Kostenreduzierung, insbesondere bei der Dimensionierung der Tragstrukturen einer WEA, sollen Rotorblätter zudem möglichst leicht sein. Konstruktiv ebenfalls relevant ist ein ausreichendes Maß an Steifigkeit, sodass ein Kontakt zwischen einem rotierenden Rotorblatt und dem Turm in jedem Fall vermieden wird.

Basierend auf diesen Anforderungen werden moderne Rotorblätter primär aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt. Bisher kamen hier insbesondere glasfaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz, bei sehr langen Rotorblattlängen werden zudem auch häufig (in den besonders belasteten Bereichen) kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK) eingesetzt. Teilweise sind solche Rotorblätter aus CFK jedoch auch in älteren Rotorblättern zu finden, einige WEA-Hersteller (z.B. Senvion) verzichten gemäß eigener Aussagen dagegen vollständig auf die Verwendung von CFK.

Im Kalenderjahr 2015 wurden gemäß (Kraus 2016) weltweit etwa 14.500 t CFK für Windenergieanlagen eingesetzt. Bei Berücksichtigung der globalen Ausbauzahlen des Global Wind Energy Council in 2016 von 54.642 MW folgt somit ein spezifischer CFK-Bedarf von ca. 0,27 t/MW.

Konstruktiv sind Rotorblätter aus 2 Halbschalen zusammengesetzt und mittels innenliegender Verstrebungen verstärkt. Diese als Stege bezeichneten Längsverstrebungen, werden meist über Gurte mit den Halbschalen verbunden.

Gemäß diversen Veröffentlichungen können für ein Rotorblatt grundsätzlich sehr verschiedene Gewichtsanteile je Stoffgruppe vorliegen, was grundsätzlich auch durch herstellereigene Unterschiede begründet sein kann:

Tabelle 31: Stoffliche Zusammensetzung von Rotorblättern

Stoff	(Pehlken 2017)	(Umsicht 2017)	(Anderson 2015)
Glasfaser	40,6%	35 – 75%	80 – 95% (GFK)
Kohlefaser	k.A.		0 – 10% (CFK)
Harz	37,9%	30 – 50%	bereits enthalten
Stahl	k.A.	< 5 %	2-9%
Aluminium	0,6%	(Fe- & NE-Metalle)	0 – 1%
Kupfer	k.A.		k.A.
Polyamid	1,4%	k.A.	0 – 15%
Polyethylen	4,2%	k.A.	
PU-Hartschaum	5,2%	< 5 %	
PVC	2,4%	k.A.	
Lack	3,4%	< 5 %	k.A.

Stoff	(Pehlken 2017)	(Umsicht 2017)	(Anderson 2015)
Gummi	1,0%	k.A.	k.A.
Holz	k.A.	< 5 %	k.A.
Sonstiges	3,1%	k.A.	k.A.

Quelle: (Ramboll)

Um ergänzend zu den Ergebnissen aus der Literatur auch ein konkretes Beispiel zu nennen, wird auf nachfolgenden Auszug aus dem Life Cycle Assessment (LCA) des WEA-Hersteller Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A., verwiesen. Demnach hat das Modell G90-2.0 MW folgende Rotorzusammensetzung. Die Zahlen beziehen sich auf drei Rotorblätter inklusive Nabe.

Tabelle 32: Rotorzusammensetzung einer Gamesa G90-2.0

MATERIAL (Kg)	BLADES	PITCH SYSTEM	HUB	ROTOR (OTHERS)	TOTAL (Kg)
Low alloy steel	1,08	409,29	0,00	2.934,24	3.344,61
High alloy steel	897,37	281,91	0,00	5.708,26	6887,54
Casting	0,00	857,52	8.360,00	228,00	9445,52
Copper	52,98	2,55	0,00	0,00	55,53
Aluminum	0,00	34,79	0,00	15,28	50,073
Polimer	727,64	20,46	0,00	26,50	774,593574
Fiberglass	12.152,65	0,00	0,00	0,00	12152,6518
Carbon fiber	2.987,75	0,00	0,00	0,00	2987,751
GRP (Glass Reinforced Plastic)	0,00	0,00	0,00	186,30	186,3
Painting	681,90	0,00	0,00	0,00	681,9
Adhesiv	1.475,49	0,00	0,00	0,00	1475,49
Other materials	14,46	7,17	6,56	0,00	28,192
TOTAL (Kg)	18.991,32	1.613,69	8.366,56	9.098,59	38.070,16

Quelle: (LCA G90-2.0)

Auf der Grundlage der LCA der Gamesa G90, sowie den Literaturwerten muss von einer sehr heterogenen Zusammensetzung eines Rotorblatts ausgegangen werden.

Derzeit erfolgt die Entsorgung von Rotorblättern jedoch nicht separat je Stoffgruppe, sondern als Stoffgemisch (teilweise und in stofflich geringem Maße werden zugängliche metallische Bestandteile, z.B. Kabel für Sensoren oder Komponenten der Blitzableitung, händisch separiert). Folglich sind für die Bilanzierung der Abfallmengen somit weniger die einzelnen stofflichen Bestandteile, sondern eher die als Summe zu erfassenden Rotorblattgewichte relevant.

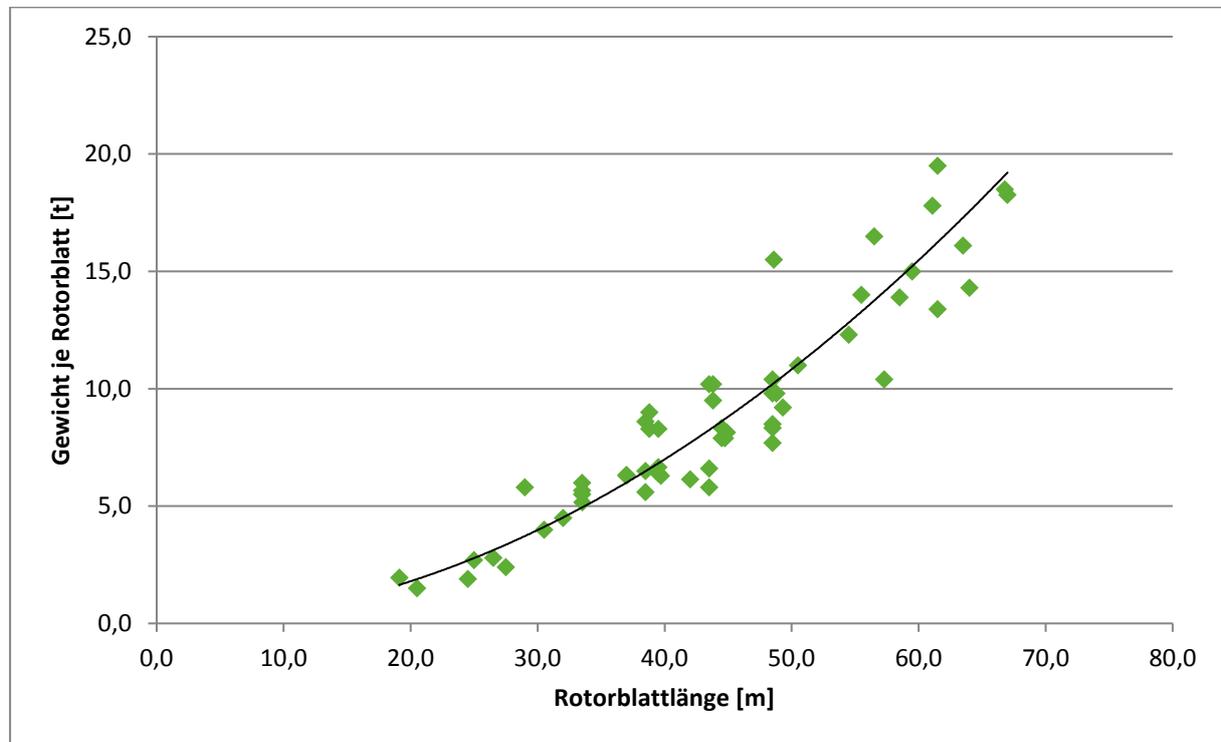
Die Ermittlung der einzelnen Rotorblattgewichte sollte hierbei idealerweise anhand der technischen Spezifikationen typenscharf erfolgen, da je nach Hersteller des Blattes unterschiedliche Designprinzipien Anwendung finden, die in unterschiedlichen Gewichten resultieren.

Um dennoch eine grobe Abschätzung der zu erwartenden mittleren Gewichte je Rotorblatt zu ermöglichen, kann anhand nachfolgender Gleichung, über die Länge des Rotorblattes das Gesamtgewicht abgeschätzt werden:

$$\text{Rotorblattgewicht [t]} = 0,0051 \cdot \text{Rotorblattlänge [m]}^{1,9595}$$

Vorstehende Gleichung wurde aus den technischen Spezifikationen von 57 verschiedenen Rotorblättern generiert und weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 89,0\%$ auf. Bei Anwendung der Formel und Abgleich mit den konkreten Angaben aus den technischen Spezifikationen ergeben sich teilweise erhebliche prozentuale Fehler von -47% bis 43% , wobei die Standardabweichung des Fehlers bei etwa 20% liegt.

Abbildung 45: Rotorblattgewichte als Funktion der Rotorblattlänge



Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend kann vorstehende Formel genutzt werden um Rotorblattgewicht (grob) abzuschätzen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten sollten jedoch für konkrete Bewertungen und Analysen möglichst die Spezifikationen eines WEA-Modells, verwendet werden.

B.1.2 Rotornabe

Die Rotornabe einer WEA verbindet die Rotorblätter mit dem Antriebsstrang und besteht überwiegend aus Stahl. Zudem beinhaltet die Nabe auch das Pitchsystem, welche die Positionierung der Rotorblätter und damit auch das Anhalten des Rotors regelt. (Anm.: Ältere WEA werden zudem oft nicht über ein Pitchsystem geregelt, sondern verfügen über eine Stall-Steuerung), welches sowohl hydraulisch als auch elektrisch betrieben werden kann (bei sehr kleinen WEA auch mechanisch). Da die WEA im Fall eines Stromausfalls in jedem Fall in einen sicheren Zustand überführt werden muss, sind elektrische Pitchsystem zudem mit einer Notstromversorgung ausgerüstet. Zuletzt werden bei der Verkleidung der Nabe teilweise auch geringe Mengen an GFK eingesetzt. Somit können beim Rückbau der Nabe insbesondere Stahl, sowie Elektrokomponenten und GFK anfallen.

Ähnlich wie bei den Rotorblättern empfiehlt es sich das Gesamtgewicht der Nabe, typenspezifisch aus der technischen Spezifikation des Herstellers zu entnehmen. Dies vorwiegend auch, da WEA Hersteller neue WEA-Modell häufig auf Vorgängermodellen aufsetzen

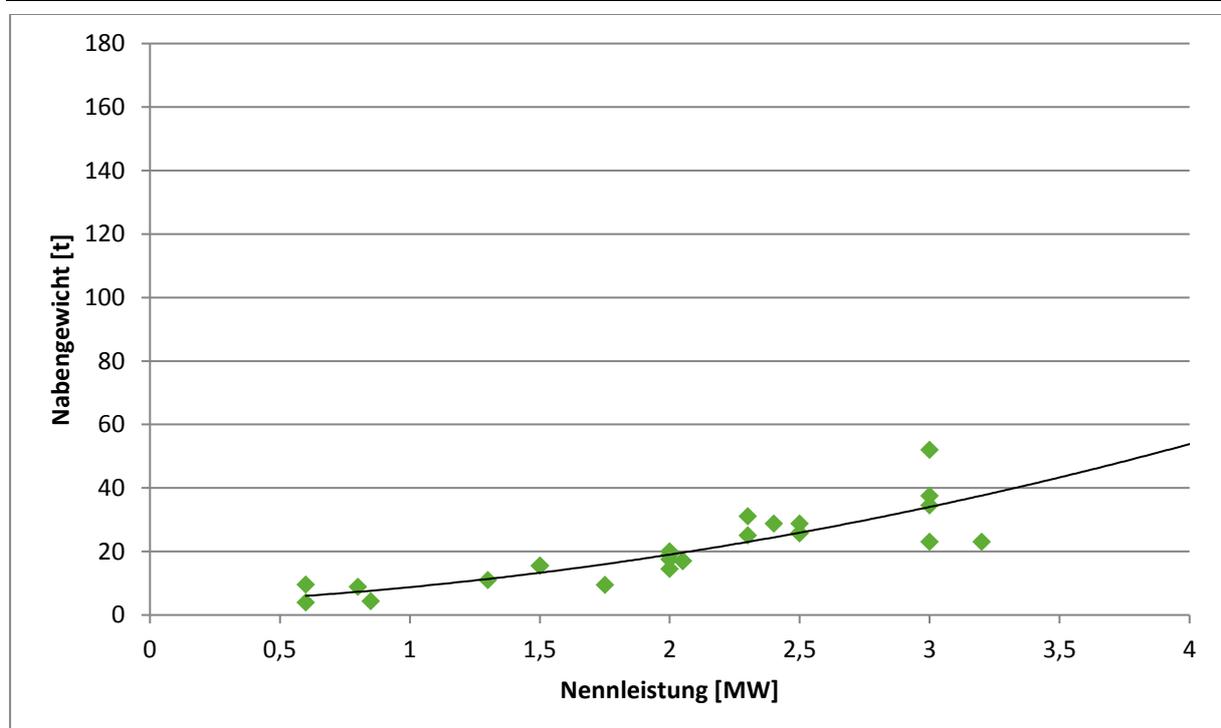
und so gewisse Generationen bilden. Innerhalb einer solchen Generation werden teilweise sehr ähnliche Gondeln und Naben für WEA-Modelle verschiedenster Leistungsklassen und mit unterschiedlich großen Rotoren verwendet.

Zu Abschätzungszwecken wurde aus den uns vorliegenden Nabengesamtgewichten aus insgesamt 26 verschiedenen WEA-Modelle, folgender Ansatz abgeleitet:

$$\begin{aligned} \text{Nabengesamtgewicht [t]} \\ = 2,3904 \cdot \text{Leistung [MW]}^2 + 3,0648 \cdot \text{Leistung [MW]} + 3,3247 \end{aligned}$$

Vorstehende Gleichung weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 95,9\%$ auf. Bei Anwendung der Formel und Abgleich mit den konkreten Angaben aus den technischen Spezifikationen ergeben sich erneut teilweise erhebliche prozentuale Fehler von -37% bis 78%, wobei die Standardabweichung des Fehlers bei etwa 32% liegt.

Abbildung 46: Nabengewichte als Funktion der Nennleistung



Quelle: (Ramboll)

Zusammenfassend kann vorstehende Formel genutzt werden, um das Gewicht der Nabe (grob) abzuschätzen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten sollten jedoch für konkrete Bewertungen und Analysen möglichst auf technische Spezifikation zu dem jeweiligen WEA-Modelle zurückgegriffen werden.

Vom Gesamtgewicht der Nabe macht Stahl, gemäß den ausgewerteten Abgaben der WEA-Hersteller, etwa 94% bis 95% aus, die Mengen an verwendeten GFK liegen typischerweise zwischen 0,5 und 1 t je Nabe. Das verbleibende Gewicht entspricht elektronischen Bauteilen.

B.1.3 Gondel (Gehäuse)

Zum Schutz des Triebstrangs und der innenliegenden Komponenten vor Witterungseinflüssen ist die Gondel vollständig eingehaust. Üblich sind Einhausungen aus GFK und teilweise auch aus Aluminium (z.B. Enercon).

Typische GFK-Massen für die Gondel einhausung liegen für WEA ab 2 MW bei ca. 1,5 bis 5 t GFK und für WEA mit 1,5 MW bei ca. 1 t.

B.1.4 Gondel (Antriebsstrang)

Innerhalb der Gondel befindet sich der Triebstrang, deren Komponenten die Rotationsenergie des Rotors in elektrische Energie umwandelt. Hierzu kann entweder ein zwischengeschaltetes Getriebe genutzt werden, um ausreichend hohe Umdrehungsgeschwindigkeiten zu erzeugen, oder ein Multipolgenerator direkt mit der Rotorwelle verbunden werden. Zudem gibt es zahlreiche weitere Unterschiede des Triebstrangs- bzw. elektrotechnischen Konzepts einer WEA, z. B. diverse Rotorwellenlager, unterschiedliche Generator- (Synchrongenerator vs. Asynchrongenerator) oder Umrichterarten (Vollumrichter vs. Teilumrichter). Weiterhin kann der Transformator einer WEA, als ein größeres elektrotechnisches Bauteil und je nach Konstruktion, entweder in der Gondel, im Turmfuß oder als externe Trafostation außerhalb der WEA lokalisiert sein.

Aufgrund der Vielzahl der Konzepte schwanken die Gewichte der Gondel (exkl. Gehäuse) deutlich. Basierend auf 44 verschiedenen WEA-Modelle, wurde folgende Gewichtsverteilung ermittelt:

- $P < 1 \text{ MW}$ 19 – 57 t
- $1 \text{ MW} \leq P < 2 \text{ MW}$ 49 – 59 t
- $2 \text{ MW} \leq P < 3 \text{ MW}$ 61 – 145 t
- $3 \text{ MW} \leq P < 4 \text{ MW}$ 90 – 214 t

Hiervon entfallen ca. 80–90 Gewichtsprozent auf Stahl (teilweise auch legierte Stähle). Die restlichen Anteile der Gondel bestehen hauptsächlich aus Nicht-FE-Metallen wie Kupfer und Aluminium (Kabel), sowie aus Elektroschrott.

Um die stoffliche Zusammensetzung der Gondel auch an einem konkreten Beispiel (exemplarisch) darzustellen, wird auf nachfolgenden Auszug aus dem LCA des spanischen WEA-Herstellers Gamesa für die G90-2.0 MW verwiesen:

Tabelle 33: Stoffliche Zusammensetzung der Gondel einer Gamesa G90-2.0

MATERIAL (Kg)	POWER TRANSFORMER	AUXILIARY SYSTEM TRANSFORMER	CONCRETE / ELEMENTS	METALLIC STRUCTURE	BUSBAR	ELECTRICAL EQUIPMENT	GROUNDING SYSTEMS	TOTAL (Kg)
Low alloy steel	1.471,42	35,76	0,00	288,49	0,00	37,88	0,00	1.833,56
Casting	0,00	0,00	0,00	37,23	0,00	0,00	0,00	37,226
Copper	370,07	0,00	0,00	0,00	64,78	3,64	4,76	443,245

MATERIAL (Kg)	POWER TRANSFORMER	AUXILIARY SYSTEM TRANSFORMER	CONCRETE / ELEMENTS	METALLIC STRUCTURE	BUSBAR	ELECTRICAL EQUIPMENT	GROUNDING SYSTEMS	TOTAL (Kg)
Aluminum	3,81	8,34	0,00	0,00	3,65	11,55	0,00	27,355
Brass	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,680
Polimers	0,00	2,50	0,00	0,00	16,19	0,78	0,22	19,684
Glass fiber	18,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,931
Painting	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,55
Lubricant	635,15	14,19	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	649,37
Concrete	0,00	0,00	7.200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7.200,00
Porcelain	6,47	0,46	0,00	0,00	0,00	45,55	0,00	52,49
Other materials	63,39	0,00	0,00	0,00	0,00	6,64	0,00	70,03
TOTAL (Kg)	2.572,49	61,25	7.200,00	325,71	84,62	106,08	4,97	10.355,13

Quelle: (LCA G90-2.0)

Die Angaben zur Gamesa G90-2.0 sind als Beispiel zu verstehen. Je nach Antriebstrangkonzzept können aber auch vollkommen andere Werkstoffe und Materialien Einsatz finden. So ist bei elektrisch erregten Direct-Drive Anlagen von deutlich höheren Kupferanteilen aus den Generatorwicklungen auszugehen.

In WEA, deren Synchrongenerator nicht elektrisch, sondern permanenterregt wird, sind zudem Seltene-Erden-Elemente zu finden. Gemäß (Pehlken 2012) kann für Permanentmagnete eine Zusammensetzung von etwa:

- Eisen 67,00%
- Neodym 29,25%
- Dysprosium 2,67%
- Bor 1,00%
- Terbium 0,08%

erwartet werden.

Zudem werden je MW installierter Leistung gemäß (Pehlken 2012) etwa 679,95 kg Permanentmagnete für getriebelose WEA benötigt. In (DERA 2016) dagegen werden diverse Veröffentlichungen zitiert, die von einem spezifischen Magnetbedarf zwischen 160 bis 700 kg/MW für permanentmagnetisch erregte Direct-Drive WEA ausgehen. Für permanentmagnetisch erregte Getriebe-WEA werden in (DERA 2016) Werte zwischen 30 und 160 kg/MW (Middle-Speed) bzw. 30 bis 80 kg/MW (High-Speed) angegeben.

Gemäß den verfügbaren Lebenszyklusanalysen des Herstellers Vestas beinhalten die WEA der Grid-Streamer Serie (inkl. Getriebe) etwa folgende Magnetmassen je MW:

- V80-2.0 ca. 180 kg/MW (LCA V80-2.0)

- V90-2.0 ca. 180 kg/MW (LCA V90-2.0)
- V90-3.0 ca. 78 kg/MW (LCA V90-3.0)
- V112-3.0 ca. 162 kg/MW (LCA V112-3.0)

Hierbei ist zudem auch zu berücksichtigen, dass dieser Hersteller Magnete nicht nur in den Generatoren, sondern auch zur Befestigung von Turmeinbauteilen nutzt. Basierend auf den LCA für die V112-3.3 (LCA V112-3.3), V117-3.3 (LCA V117-3.0) und V126-3.3 (LCA V126-3.3), werden für die Befestigung der Turmeinbauteile bei einer NH von 84 bzw. 91,5 m ca. 67 kg an Magneten und bei einer Nabenhöhe von 117 m ca. 100 kg an Magneten benötigt.

B.1.5 Turm

Bezüglich der Zusammensetzung des Turms muss zunächst zwischen den verschiedenen Turmtypen unterschieden werden:

- Betonturm: Stahlbeton, Bewehrungsstahl
- Stahlrohrturm: Stahl
- Hybridturm: Stahlbeton, Bewehrungsstahl, Stahl
- Gittermast: Stahl

Mengenmäßig sind hierbei insbesondere die Stahlrohrtürme und die Hybridtürme relevant. So kommen Gittermasttürme in Deutschland nur relativ selten vor und reine Betontürme sind, auch wenn kommerziell teilweise anders beworben, ebenfalls eher selten, da in der Regel meist mindestens ein Stahlsegment benötigt wird, um eine Verbindung zwischen Turm und Gondel herzustellen.

Stahlrohrtürme werden hierbei insbesondere bei geringeren Nabenhöhen eingesetzt, während Hybridtürme meist ab Nabenhöhen von 130 m und mehr zum Einsatz kommen. Grundsätzlich gibt es jedoch relevante Abweichungen von dieser Regel, sodass bspw. der Hersteller Vestas auch sehr hohe Nabenhöhen mit reinen Stahltürmen realisiert. Zudem nutzt der Hersteller Enercon Hybridtürme auch für deutliche geringe Nabenhöhen (z.B. 84 m).

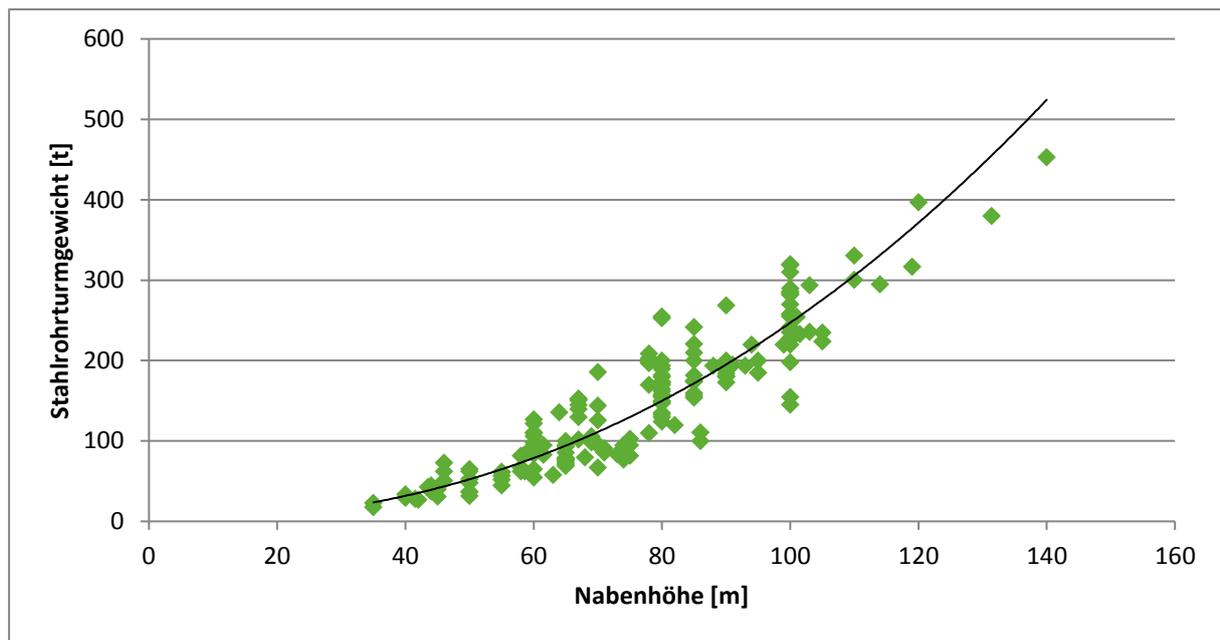
Basierend auf den Gewichten von insgesamt 177 Stahlrohrtürmen können die Turmgesamtwerte wie folgt, als Funktion der Nabenhöhe abgeschätzt werden:

$$\text{Gesamtwicht Stahlrohrturm [t]} = 0,0083 \cdot \text{NH [m]}^{2,2371}$$

Vorstehende Gleichung weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 87,09\%$ auf. Bei Anwendung der Formel und Abgleich mit den konkreten Angaben aus den technischen Spezifikationen ergeben sich teilweise erhebliche prozentuale Fehler von -41% bis 76% , wobei die Standardabweichung des Fehlers bei etwa 25% liegt.

Da in vorstehender Gleichung bspw. die Turmkopfmassen vollständig unberücksichtigt bleiben, empfiehlt sich aus unserer Sicht in jedem Fall eine spezifische Berücksichtigung der Ansätze gemäß Herstellerspezifikation. Die Formel sollte entsprechend nur für (grobe) Abschätzungen genutzt werden.

Abbildung 47: Stahlrohrturmgewichte [t] als Funktion der Nabhöhe [m]



Quelle: (Ramboll)

Eine zufriedenstellende Korrelation des Gesamtgewichts über die Nabhöhe wurde für Hybridtürme nicht gefunden. So sind Hybridtürme grundsätzlich sehr unterschiedlich insbesondere bezüglich der Länge des Turmabschnitts aus Beton bzw. aus Stahl, was aufgrund des sehr viel höheren spezifischen Gewichts für Betontürme (€/m) gegenüber Stahlrohrtürmen zu erheblichen Unterschieden führen kann. Da Betontürme zudem konisch geformt sind, ergeben sich abhängig von der Gesamthöhe des Turms zudem sehr unterschiedliche Betonturmdurchmesser am Fundament und somit sehr unterschiedliche Volumina bzw. Gewichte. Weiterhin spielen die Turmkopfmassen, bei der Auslegung von Hybridtürmen erneut eine große Rolle.

Basierend auf 22 verschiedenen Hybridtürmen, wurde folgende Gewichtsverteilung ermittelt:

- $80 \text{ m} \leq \text{NH} < 100 \text{ m}$ 540 – 890 t
- $100 \text{ m} \leq \text{NH} < 120 \text{ m}$ 980 – 1100 t
- $120 \text{ m} \leq \text{NH} < 140 \text{ m}$ 1040 – 1600 t
- $140 \text{ m} \leq \text{NH}$ 1190 – 2020 t

Stofflich entfallen hierbei ca. 84–88% auf Stahlbeton. Die restlichen Gewichts-Anteile sind primär durch Stahl (aus den Stahlurmsegmenten und dem Bewehrungsstahl) bestimmt.

Außerdem befinden sich, sowohl in Stahlrohrtürmen als auch in Hybridtürmen, Einbauten wie Plattformen, Leitern oder Schienensystem. Diese Einbauten bestehen typischerweise aus Aluminium (ca. 0,5 bis 5 t) und ggf. weiterem Stahl.

Die durch den Turm verlaufende Kabel (Kupfer und/oder Aluminium) wurden der Kategorie „Elektrogeräte, Elektronik, IT Ausstattung“ zugeordnet.

B.1.6 Fundament

WEA-Fundamente leiten die entstehenden Systemlasten ins Erdreich ab und bestimmen somit die Standsicherheit einer WEA. Hierbei ist es in Deutschland üblich, dass für jedes WEA-Modell und jede Nabenhöhe ein eigenes Fundament angelegt und zertifiziert wird. Dieses Fundament kann dann für unterschiedliche Standorte eingesetzt werden, wobei die generelle Eignung standortspezifisch von Gutachter bestätigt werden muss. Ist eine solche Bestätigung nicht möglich, sind teilweise Sonderfundamentlösungen verfügbar. Gegenüber dieser Herangehensweise ist es bspw. für größere Windparks und im Ausland durchaus auch üblich, standortspezifische Fundamente zu entwickeln, was gegenüber der zuvor genannten Herangehensweise oftmals zu geringeren Kosten führt.

Generell lassen sich Fundamente zudem in Standardflachfundamente, jeweils mit ohne Auftriebssicherung, und Pfahlgründung (auch als Tiefgründung bezeichnet) unterscheiden. Vereinfacht ist eine Pfahlgründung ein Standardflachfundament, welches auf in das Erdreich eingebrachten Pfählen steht. Die Unterscheidung der Standardflachfundamente bezgl. der Auftriebssicherung, basiert zudem auf einer möglichen Auftriebskraft des Grundwassers bei geringen Grundwasserständen, sodass Standardflachfundamente mit Auftriebssicherung üblicherweise ein größeres Volumen (ca. 20-30% größer als Fundamente ohne Auftriebssicherung, grundsätzlich aber spezifisch) aufweisen als Standardflachfundamente ohne Auftriebssicherung. Die konkrete Eignung des jeweiligen Fundaments für ein konkretes Projekt ist abhängig von den jeweiligen Bodenverhältnissen und bedarf der Beurteilung eines Baugrundgutachters. So kommen in Deutschland grundsätzlich alle drei Fundamentarten zum Einsatz. Teilweise lassen sich Bodenverhältnisse zudem auch durch spezifische Baugrundverbesserungsmaßnahmen positiv beeinflussen.

Grundsätzlich bestehen Fundamente von WEA zu einem Großteil aus Stahlbeton, gefolgt von Bewehrungsstahl und kleinen Mengen an verzinktem Stahl, welcher als Erdungssystem dient. Ferner beinhalten die Fundamente häufig auch ein Fundamenteinbauteil (aus Stahl), welches zur Verbindung von Turm und Fundament benötigt wird. Weiterhin befinden sich innerhalb der Fundamente auch Leerrohre aus Kunststoffen, durch welche Kabel durchgeführt werden. Gemäß (LCA V80-2.0), (LCA V90-3.0) und (LCA V126-3.3) können je Fundament zwischen 100 und 167 kg an Kunststoffen anfallen. Die Gewichtsanteile des Stahls am Gesamtgewicht liegen zwischen ca. 2,7 und 6,3 %.

Das Gewicht eines Fundaments wächst mit der Gesamthöhe und Leistung einer WEA (Nabenhöhe und Rotorblattlänge). Eine konkrete Gleichung ist aber nicht ableitbar. So hängt die Dimensionierung eines Fundaments neben dem Rotordurchmesser, den vom Rotor induzierten Momenten und der Nabenhöhe auch von der Turmkopfmasse und der Turmmasse bzw. des Turmkonzeptes ab. Folglich verwundert es kaum, dass die Abschätzung der Fundamentdimensionen allein anhand der Gesamthöhe zu keinen guten Ergebnissen führt. Zu Abschätzung zukünftiger Stoffmengen sollten Fundamentgewichte entsprechend möglichst spezifisch anhand der Angaben aus den technischen Spezifikationen abgeleitet werden.

Aus einer Auswertung von 70 verschiedenen Standardflachfundamenten (ohne Auftriebssicherung) für unterschiedliche WEA-Modelle und Nabenhöhen wurde folgende Gewichtverteilung der Fundamente in Abhängigkeit der Gesamthöhe (GH) ermittelt:

- $100 \text{ m} \leq \text{GH} < 120 \text{ m}$ 510 – 800 t
- $120 \text{ m} \leq \text{GH} < 140 \text{ m}$ 730 – 1370 t
- $140 \text{ m} \leq \text{GH} < 160 \text{ m}$ 830 – 1830 t

- $160 \text{ m} \leq \text{GH} < 180 \text{ m}$ 1260 – 1740 t
- $180 \text{ m} \leq \text{GH} < 200 \text{ m}$ 1290 – 1930 t
- $200 \text{ m} \leq \text{GH}$ 1620 – 2380 t

B.1.7 Elektrogeräte, Elektronik, IT Ausstattung

Transformatoren von WEA transformieren den erzeugten Strom von Niederspannung auf Hochspannung, sodass ein verlustfreier Transport ermöglicht wird. Hierbei kann der Transformator entweder innerhalb der WEA (in der Gondel oder im Turmfuß) oder extern in einem separaten Trafobauwerk lokalisiert sein.

WEA-Transformatoren können grundsätzlich den Elektrogeräten zugeordnet und wie diese am Ende der Lebensdauer aufbereitet werden. Konstruktiv bestehen Trafos aus Wicklungen (Kupfer) und einem Kern (Eisen). Trafos lassen sich zudem unterteilen in Trockentransformatoren (Isolierung z. B. aus Gießharz) und in ölgefüllte Transformatoren. Bei externen Trafos sind weiterhin auch zusätzliche Abfallmengen aus der Einhausung und den Fundamenten (Beton) zu berücksichtigen.

Beim Rückbau von WEA entsteht weiterhin Elektronikschrott. Dieser kann einerseits aus größeren Modulen, wie Schaltanlagen oder Umrichtern, oder aus kleineren Steuerungssystemen stammen.

Für WEA ab einer Leistung von 2,5 MW liegen typische Mengen an Elektroschrott bei ca. 13 bis 15 t, wobei der Transformator hiervon ca. 9 t ausmacht. In der Leistungsklasse von 2 MW können ca. 9 bis 15 t Elektroschrott erwartet werden, wobei der Transformator hier ca. 4–7 t wiegt.

Zudem fallen zusätzliche Mengen an nicht FE-Metallen durch die Kabel und insbesondere das durch den Turm verlaufende Leistungskabel an.

B.1.8 Kranstellflächen

Kranstellflächen von WEA bestehen typischerweise aus Gesteinsschotter, sowie teilweise auch einer trennenden Schicht aus Geotextil oder Geogitter. Die genaue Art des Schotters wird teilweise durch die zuständigen Behörden vorgegeben bzw. eingeschränkt.

Schotterschichten sind projektspezifisch, durch einen Baugrundgutachter und unter Beachtung der erforderlichen Tragfähigkeit zu dimensionieren. Übliche Schichtdicken sind zwischen 40 und 80 cm, wobei für besonders komplexe Standorte auch deutliche Abweichungen auftreten können. Überdies erfolgt der Aufbau einer Kranstellfläche häufig mit verschiedenen Körnungen.

Die erforderlichen Stellflächen ergeben sich aus den technischen Errichtungsspezifikationen des Herstellers. Hierbei wird die gesamte Baustellenlogistik berücksichtigt, die resultierenden Nabenhöhen, sowie das eingesetzte Turmkonzept einen großen Einfluss auf die benötigte Kranstellflächengröße haben.

B.1.9 Sonstiges – SF₆

In den Schaltanlagen kann zudem das Gas Schwefelhexafluorid (SF₆) als Isolationsgas verwendet werden. Bei SF₆ handelt es sich um eine chemische Verbindung, welche in der Regel aufgrund

ihres enormen Treibhauspotentials von großer Relevanz ist. Beim Rückbau ist entsprechend sicherzustellen, dass, falls SF₆-Schaltanlagen verwendet wurden (grundsätzlich könnten auch Schaltanlagen verwendet werden, die kein SF₆ beinhalten), durch einhalten der Entnahmestandards kein Gasaustritt erfolgt

Die verwendeten Mengen an SF₆ in WEA sind weitgehend unbekannt. So konnten lediglich Angaben des WEA-Herstellers Vestas recherchiert werden, der SF₆ Mengen innerhalb der LCA bilanziert. Gemäß (LCA V80-2.0) und (LCA V126-3.3) enthalten WEA mit 2 bis 3,3 MW ca. 7,2 - 7,3 kg SF₆.

B.1.10 Sonstiges – Schmier- & Kühlmittel

Während des Rückbaus muss darüber hinaus eine Trockenlegung erfolgen. Die Schmier- und Kühlmittelmengen können je nach Konstruktion (z. B. mit oder ohne Getriebe) der WEA abweichen. Für WEA mit Getriebe können, basierend auf einer Auswertung von 31 unterschiedlichen WEA, Schmiermittelmengen (d.h. Öle + Fette) zwischen 212 und 483 l/MW erwartet werden (Mittelwert = 337 l/MW bei einer Standardabweichung von 77 l/MW).

Bei getriebelosen WEA (Stichprobe = 8 WEA-Modelle) sind Schmiermittelmengen (d. h. Öle + Fette) zwischen 28 und 81 l/MW zu erwarten (Mittelwert = 62 l/MW bei einer Standardabweichung von 22 l/MW).

Werden keine Trockentransformatoren verwendet, sind zudem weitere Ölmengen zwischen 350 und 450 l/MW innerhalb der Transformatoren zu berücksichtigen.

Die zu entsorgenden Kühlflüssigkeiten sind aufgrund von unterschiedlichen Möglichkeiten der Kühlung (Luftkühlung vs. Flüssigkühlung) spezifisch zu bestimmen. Die Volumina an Kühlflüssigkeiten variieren innerhalb der Stichprobe von 22 WEA-Anlagen zwischen 20 und 750 l.

B.1.11 Sonstiges – Batterien & Akkus

Im Fall eines Stromausfalls müssen WEA in einen sicheren Betriebszustand überführt werden können. Hierzu sind elektrische Pitchsysteme mit einer Notstromversorgung ausgerüstet, welche die Rotorblätter entsprechend aus dem Wind dreht, sodass die in das System eingebrachten Lasten deutlich reduziert werden und der Rotor nicht in einen unzulässigen Drehzahlbereich kommen kann. Bei Stall-Geregelten WEA sind solche Notstromaggregate in der Regel nicht vorhanden.

Außerdem verfügen WEA (ab einer gewissen Größe) über Hindernisfeuer, welche Piloten während des Sichtflugs das etwaige Hindernis aufmerksam machen sollen. Bei einem Stromausfall werden auch diese Feuer über eine Notstromversorgung versorgt.

Weiterhin werden teilweise auch Systeme, die der Regelung der WEA dienen, mittels Batterien/Akkus mit Notstrom versorgt.

Das exakte Gewicht der Notstromaggregate ist bisher nicht exakt bekannt. So kann hierzu lediglich festgestellt werden, dass die Akkumulatoren für eine WEA der Leistungsklasse zwischen 3 und 4 MW ein Gesamtgewicht von 500 kg nicht überschreiten.

B.1.12 Sonstiges – Lacke & Beschichtungen

Lacken und Beschichtungen werden gemäß der LCA des Hersteller Vestas in folgendem Umfang eingesetzt:

- | | | |
|------------------------|-------------------|----------------|
| ➤ V80-2.0 (80 m NH) | ca. 520 kg/WEA | (LCA V80-2.0) |
| ➤ V90-2.0 (80 m NH) | ca. 280 kg/WEA | (LCA V90-2.0) |
| ➤ V90-3.0 (80 m NH) | ca. 1.230 kg/WEA | (LCA V90-3.0) |
| ➤ V112-3.0 (84 m NH) | ca. 760 kg/ WEA | (LCA V112-3.0) |
| ➤ V112-3.3 (84 m NH) | ca. 1.480 kg/ WEA | (LCA V112-3.3) |
| ➤ V117-3.3 (91,5 m NH) | ca. 1.820 kg/ WEA | (LCA V117-3.3) |
| ➤ V126-3.3 (117 m NH) | ca. 1.940 kg/ WEA | (LCA V126-3.3) |

Gemäß (LCA G90-2.0) fallen bei der Gamesa G90 mit 2,0 MW zudem folgende Mengen an Farben an:

- | | | |
|---------------------|------------------|---------------|
| ➤ G90-2.0 (80 m NH) | ca. 1.336 kg/WEA | (LCA G90-2.0) |
|---------------------|------------------|---------------|

Weitere Informationen zur mengenmäßigen Verwendung von Lacken, Farben und Beschichtungen liegen nicht vor.

B.2 Lebensdauer einer Windenergieanlage

Die Lebensdauer einer Windenergieanlage richtet sich zunächst nach dem Standsicherheitsnachweis. Dieser wird gemäß der „Richtlinie für Windenergieanlagen“ des Deutschen Instituts für Bautechnik in aller Regel über eine Typenprüfung und für einen Zeitraum von 20 Jahren nachgewiesen. Hierbei werden kategorische Umgebungsbedingungen angenommen, welche üblicherweise nicht den tatsächlichen Bedingungen (z.B. mittlere Windgeschwindigkeit, Extremwinde oder Turbulenzintensitäten) am Standort entsprechen. Dies führt dazu, dass der Standsicherheitsnachweis einer WEA nicht individuell je Standort erfolgen muss, sondern vereinfacht ein einmaliger Standsicherheitsnachweis für einen theoretischen Referenzstandort erstellt wird und standortspezifisch für ein konkretes Projekt lediglich nachzuweisen ist, dass die tatsächlichen Umgebungsbedingungen am Standort nicht über denen des Referenzstandorts liegen. Diese Methodik führt häufig dazu, dass die tatsächlichen erfahrenen Lastprofile einer WEA in der Regel unter den Auslegungslasten liegen.

Folglich kann nach Ablauf von 20 Betriebsjahren und in Abhängigkeit der Auslegungslasten zu den tatsächlichen Lasten, über einen erneuten Nachweis der Standsicherheit ggf. ein Weiterbetrieb über einen zusätzlich nachzuweisenden Zeitraum erfolgen. Die sich hierbei ergebenden Zeiträume für einen Weiterbetrieb sind projektspezifisch zu verstehen und können stark schwanken. Insbesondere WEA-Typen der früheren Generation sind jedoch konstruktiv teilweise mit sehr großen Sicherheitsfaktoren konstruiert worden, sodass kalkulatorisch (je nach Standort) auch erheblich längere Betriebszeiträume möglich sind. In (Holzmüller 2016) werden diesbezüglich Zeiträume für den Weiterbetrieb für verschiedene WEA-Typen / Standorte zwischen 3 und 20 Jahren genannt. Neben dem direkten technischen Zusammenhang anhand der Lasten, ist der sich ergebende zusätzliche Zeitraum für einen möglichen

Weiterbetrieb zudem auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu verstehen. So fallen Windenergieanlagen ab einem gewissen Alter aus dem staatlichen Fördersystem des EEG und müssen fortan den produzierten Strom zu Wettbewerbsbedingungen am Strommarkt veräußern. Sollte ein wirtschaftlicher Betrieb einer WEA zu den dann aktuell vorherrschenden Marktbedingungen nicht möglich sein, wird ein möglicher Weiterbetrieb nicht mehr durch technische sondern durch wirtschaftliche Gegebenheiten limitiert.

Solche wirtschaftlichen Überlegungen führten zudem in der Vergangenheit auch häufig zu einem Rückbau von WEA mit einem Alter von deutlich weniger als 20 Jahren. Diese Anlagen wurden mit dem Ziel rückgebaut, diese durch neue und größere Anlagen zu ersetzen. Dieses als Repowering bezeichnete Vorgehen wurde vom Gesetzgeber über den sogenannten Repowering-Bonus zudem finanziell gefördert. Obgleich der Repowering-Bonus mit Einführung des EEG 2014 abgeschafft worden ist und somit kein direkter und unmittelbarer Anreiz für ein Repowering durch den Gesetzgeber mehr besteht, wurde das Repowering von alten WEA dennoch weiterhin betrieben. Als Ursache hierfür ist zunächst die grundsätzliche Weiterentwicklung der Technologie und somit einer Effizienzsteigerung der WEA zu nennen. Dieser Entwicklung wird zwar durch sinkende Fördersätze aus dem EEG (die Höhe der Förderung richtet sich nach dem Inbetriebnahme-Zeitpunkt einer WEA) entgegengewirkt, dennoch haben die technologischen Weiterentwicklungen in den letzten Jahren häufig zu einer Überkompensation der Förderdegression geführt, sodass Repowering-Vorhaben standortspezifisch weiterhin als wirtschaftlich attraktiv wahrgenommen wurden. Zudem führten weitreichende Änderungen am EEG, welches zwischenzeitlich von einem Festpreismodell auf ein Ausschreibungsmodell umgestellt wurde, bei vielen Betreibern dazu, dass womöglich längerfristig geplante Repowering-Projekte zeitlich vorgezogen wurden. So wurden genehmigte WEA in der Vergangenheit grundsätzlich immer finanziell gefördert, wohingegen die Förderung für neue WEA (ab einer gewissen Leistung) gegenwärtig nur noch erfolgt, wenn in einer vorausgegangenen Ausschreibung ein Zuschlag gewonnen wurde. In einer solchen Ausschreibung konkurrieren die Teilnehmer um eine begrenzte Kapazität (bzw. Leistung), wobei die Zuschlagserteilung aufsteigend, beginnend mit dem geringsten Gebotswert (in ct/kWh) erfolgt. Gegenüber dem vorausgegangenen Festpreismodell führen Ausschreibungen (bisher) zu sinkenden Einspeisevergütungen und zum anderen können Inhaber von Genehmigungen für WEA nicht mehr uneingeschränkt mit dem Erhalt einer finanziellen Förderung rechnen, da der Erhalt eines Zuschlags in einer Ausschreibung als zusätzliche Hürde zu bewältigen ist und gegenwärtig die Nachfrage, dass Angebot an Zuschlägen bei weitem übersteigt.

C Beschreibung der Datengrundlage für Kapitel 3

C.1 Die „WP-Deutschland“ Datenbank

Ersatzweise wird auf eine interne Datenbank des Ramboll-Konzerns zurückgegriffen. Diese als „WP-Deutschland“ bezeichnete Datenbank wird seit mehr als 20 Jahren gepflegt, indem kontinuierlich Informationen über bestehende Windenergieanlagen gesammelt, verifiziert und erweitert werden. Hierzu werden unterschiedliche Datenquellen genutzt:

- Das WMEP (Bundesforschungsministerium für Bildung und Forschung) in den Anfangszeiten der Windenergie (80er/90er Jahre)
- Die Veröffentlichungen des ISET/IWES (Institut für Solare Energieversorgungstechnik)
- Der IWET (Ingenieurwerkstatt Energietechnik: „Monatsinfos“)
- Das Anlagenregister der Bundesnetzagentur

Vorwiegend wird die „WP-Deutschland“ Datenbank in unserem Unternehmen Ramboll intern für die Bearbeitung von gutachterlichen Aufträgen für neue Windparks verwendet. So ist es bei der gutachterlichen Tätigkeit bspw. bei der Erstellung von Windgutachten für geplante Windparks erforderlich, auch Informationen von benachbarten und bereits bestehenden WEA einfließen zu lassen. Mithilfe der „WP-Deutschland“ Datenbank erfolgt die Identifikation solcher Referenz-WEA deutlich vereinfacht. Zudem hat die Bearbeitung von Projekten, bei gleichzeitiger Nutzung der „WP-Deutschland“ Datenbank, den großen Vorteil, dass Datenbankeinträge fortlaufend auf Aktualität und Richtigkeit geprüft werden, dies insbesondere auch da bei einer Vielzahl von Arbeiten im gutachterlichen Bereich auch Standortbesichtigungen durchgeführt werden und somit auch die Beobachtungen und Erkenntnisse von Ortsbesichtigungen mit einfließen.

Inhaltlich beinhaltet die „WP-Deutschland“ Datenbank eine Vielzahl von Eigenschaften zu einzelnen WEA-Standorten, wobei für dieses Projekt insbesondere folgende Eigenschaften von Relevanz sind:

- Standortgemeinde, Postleitzahl,
- Bundesland
- Standortkoordinaten
- WEA-Hersteller, WEA-Typ
- Nennleistung, Rotordurchmesser, Nabenhöhe
- Datum der Inbetriebnahme
- Vermerk ob die WEA bereits zurückgebaut worden ist

Insgesamt beinhaltet die „WP-Deutschland“ Datenbank in der für dieses Projekt genutzten Version 31.481 Datensätze bzw. WEA, wobei insgesamt 4.047 dieser WEA als bereits zurückgebaut gekennzeichnet sind. Folglich verbleiben 27.434 WEA noch in Betrieb befindliche WEA. Bei diesen WEA handelt es sich unter zeitlichen Gesichtspunkten, um sämtliche uns

bekanntem WEA mit einer Inbetriebnahme bis einschließlich dem Kalenderjahr 2017, sowie ergänzend um acht WEA die in 2018 in Betrieb genommen worden sind. Bezüglich der Nennleistung folgt für die bis einschließlich 2017 in Betrieb befindlichen WEA (= 27.426 WEA d.h. ohne die 8 WEA aus 2018) eine Gesamtleistung von ca. 49.803,64 MW.

Zur Klärung der Fragestellung, wie gut dieser Datenbestand den tatsächlichen Windenergieanlagenbestand beschreibt, besteht grundsätzlich die vorstehende beschriebene Problemstellung bzgl. des Fehlens einer offiziellen und verlässlichen Datengrundlage. Somit bleibt grundsätzlich nur die Möglichkeit, den uns vorliegenden Datenbestand mit dem Datenbestand aus einer anderen firmeninternen Datenbank bzw. den kumulierten und veröffentlichten Ergebnissen aus einer solchen externen Datenbank zu vergleichen. Hierbei wird auf die jüngste Veröffentlichung der Fa. DeutscheWindGuard (WindGuard 2017) abgestellt. Die DeutscheWindGuard veröffentlicht halbjährlich unter anderem im Auftrag des BWE eine Studie zum „Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland“. In dieser Studie wird bzgl. Neuerrichtungen auf das Anlagenregister verwiesen, zudem gibt es jedoch auch unverbindliche Angaben zum kumulierten WEA-Gesamtbestand, welcher mutmaßlich auch auf anderen Quellen beruht. Bis zum 31.12.2017 wird von der DeutscheWindGuard ein unverbindlicher kumulierter Gesamtbestand von 28.675 WEA bzw. 50.776,93 MW angegeben. Bei dem direkten Vergleich der beiden Datenbanken wurden die in Tabelle 34 abgebildeten Abweichungen ermittelt.

Tabelle 34: Vergleich der „WP-Deutschland“ Datenbank mit der Veröffentlichung der Fa. Deutsche-WindGuard (DWG)

Bezeichnung		DeutscheWindGuard	WP-Deutschland
Kumulierter Anlagenbestand (bis 31.12.2017)	Absolut	28.675 WEA	27.426 WEA
	Absolute Abweichung	-1.249 WEA	
	Proz. Abweichung	-4,6 %	
Kumuliert Nennleistung (bis 31.12.2017)	Absolut	50.776,93 MW	49.803,64 MW
	Absolute Abweichung	-973,3 MW	
	Proz. Abweichung	-2,0 %	

Quelle: (Ramboll)

Insgesamt lässt sich festhalten, dass beide Datengrundlagen auf einem ähnlichen Niveau liegen, wobei der Datensatz der DWG gegenüber den Daten aus der „WP-Deutschland“ einen geringfügig größeren Anlagenbestand (+4,6%) und eine geringfügig größere Gesamtleistung (+2,0%) für alle deutschen Onshore-WEA ausweist. Aus der Tatsache, dass die Gesamtleistung hierbei geringere prozentuale Abweichungen als die Anlagenanzahl aufweist, lässt sich zudem vermuten, dass die Abweichungen zwischen beiden Datensätzen insbesondere aus Unterschieden für kleinere und ältere WEA-Typen, mit geringer Nennleistung resultieren.

Insgesamt lässt sich jedoch nicht feststellen, welcher Datensatz der qualitativ bessere ist. Aufgrund des ähnlichen Umfangs beider Datensätze ist zu vermuten, dass beide Datensätze als hinreichend valide einzuschätzen sind. Folglich wird unsere firmeneigene „WP-Deutschland“-Datenbank in diesem Vorhaben genutzt.

Bezüglich einer möglichen Unsicherheitsschätzung der verwendeten Daten kann grob abgeschätzt werden, dass sich die Gesamtunsicherheit hinsichtlich der installierten Leistung auf wenige Prozent beschränkt. Dies beruht auf der Einschätzung, dass der reale Onshore-Windenergiebestand Ende 2017 eine Gesamtleistung zwischen dem Wert aus der DWG-Veröffentlichung und dem Wert aus der „WP-Deutschland“ Datenbank aufwies.

C.2 Datenaufbereitung

Aufgrund der Vielzahl an Einträgen wurde der Datensatz zunächst digital aufbereitet. Dies vorwiegend, da einzelne Einträge in „WP-Deutschland“ manuell vorgenommen wurden und somit auch Tippfehler oder Ähnliches auszugleichen waren. Vordergründig ist diese Methodik unumgänglich, da eine Handhabung und Analyse des umfangreichen Datensatzes nur automatisiert erfolgen kann, hierzu jedoch einzelne Bezeichnungen bspw. für einen bestimmten WEA-Typ auch einheitlich vorhanden sein müssen. Diese Vereinheitlichung wurde für folgende Eigenschaften der Datensätze vorgenommen:

- WEA-Hersteller
- WEA-Typ
- Nennleistung
- Rotordurchmesser
- Nabenhöhe

Im Ergebnis blieben insgesamt 647 verschiedene WEA-Konfigurationen (= Kombination aus den 5 vorstehenden Eigenschaften) erhalten. Hierbei wurden WEA-Hersteller, die zwischenzeitlich von anderen Herstellern übernommen wurden, bereits dem aktuellen Rechtsinhaber zuschreiben, da die Anzahl der Kombinationen andernfalls noch größer ausgefallen wäre.

Für diese 647 WEA-Konfigurationen wurden in einem nachfolgenden Schritt zudem die Informationen recherchiert, ob es sich bei dem WEA-Typ um eine getriebelose oder um eine WEA mit Getriebe handelt.

Zudem wurden auch die zum Einsatz kommenden Turmmodelle in Abhängigkeit der Nabenhöhe recherchiert. Hierbei wurde zwischen Gittermast-, Stahlrohr- und Hybridturm (Anm.: Umfasst auch die von Enercon als Betonturm beworbenen Türme) unterschieden. Hierbei ist anzumerken, dass es bei einigen wenigen WEA-Konfigurationen sowohl einen Stahlrohrturm als auch einen Gittermastturm gibt. Dies betrifft bspw. den Hersteller Nordex, welcher insbesondere Anfang 2000 auch einige Gittermasttürme errichtet hat, in den Folgejahren jedoch von dem Gittermastkonzept wieder abgerückt ist. Da Stahlrohrtürme insgesamt deutlicher häufiger verwendet werden, haben wir bei der Festlegung auf ein Turmkonzept für eine spezifische WEA-Konfiguration einen Stahlrohrturm gegenüber eines Gittermastturms bevorzugt berücksichtigt, da der Gesamtfehler zur Realität entsprechend kleiner ausfällt. Insgesamt ist jedoch zu erwarten, dass die Anzahl der Gittermasttürme in Deutschland von uns geringfügig unterschätzt und die Anzahl der Stahlrohrtürme gleichzeitig geringfügig überschätzt wird. Da für beide Turmkonzepte vorwiegend Stahl eingesetzt wird, in Gittermasttürmen jedoch bei vergleichbaren Nabenhöhen weniger Material benötigt wird, führt dies tendenziell zu einer geringfügigen Überschätzung der resultierenden Stahl-Abfallmengen. Eine erhebliche Beeinflussung auf die Gesamtergebnisse dieser Studie wird jedoch aufgrund der recht geringen Verbreitung dieses Spezialfalls nicht erwartet.

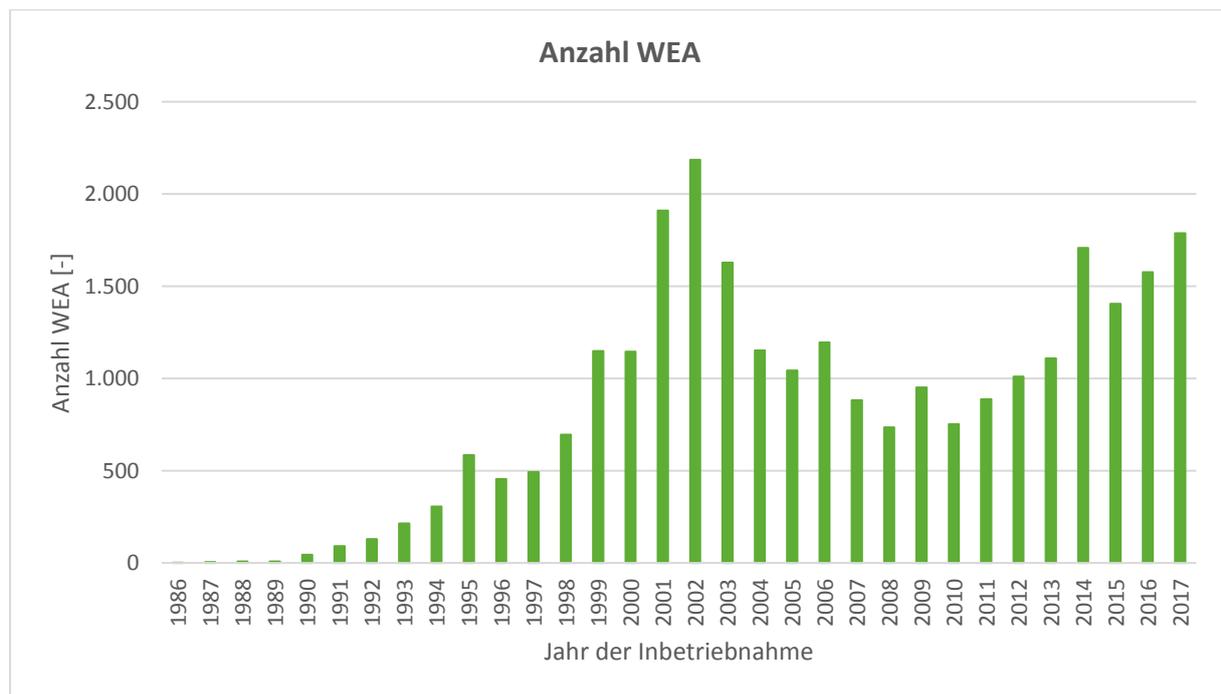
Zudem enthalten die Datensätze einige unvollständige Einträge, welche nicht vervollständigt werden konnten. Hierbei handelt es sich im Einzelnen um 32 WEA, mit unvollständigen Angaben zum WEA-Typ bzw. der Nabenhöhe, sowie um weitere 142 WEA, für die das Datum der Inbetriebnahme nicht bekannt ist. Diese Datensätze wurden für die weiteren Analysen verworfen.

C.3 Auswertungen zum bestehenden deutschen Onshore-Windenergieanlagenbestand

Nachfolgend wurden Auswertungen für die verbleibenden 27.252 WEA (= 27.426 WEA abzgl. 174 WEA) mit vollständigen Angaben aus der „WP-Deutschland“ Datenbank durchgeführt. Hierbei wurden einerseits der zeitliche Ausbau der Onshore-Windenergie insgesamt und andererseits auch die jeweiligen Spezifika (Leistung, Rotordurchmesser, Nabenhöhe, Antriebsstrangkonzzept, Turmmodell) der neu installierten WEA, näher untersucht.

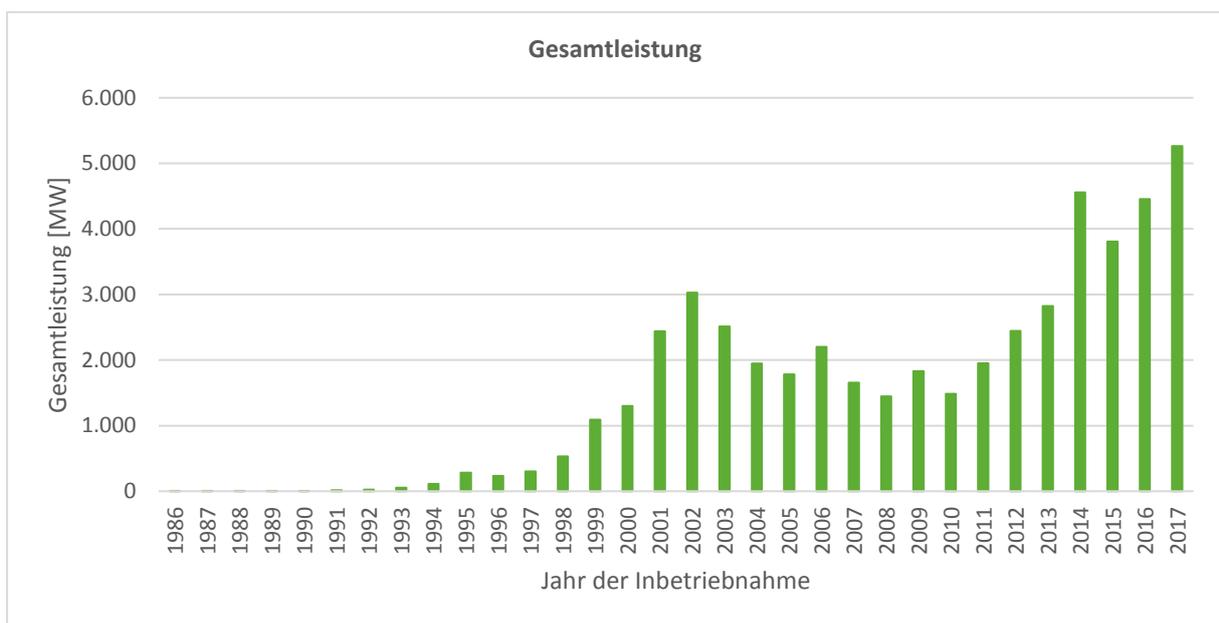
In den folgenden beiden Abbildungen wird zunächst der zeitliche Zubau, bezogen auf die Anlagenanzahl und die Gesamtleistung, für die den Zeitraum 1986 bis 2017 dargestellt.

Abbildung 48: Darstellung der zwischen 1986 und 2017 in Betrieb genommenen WEA



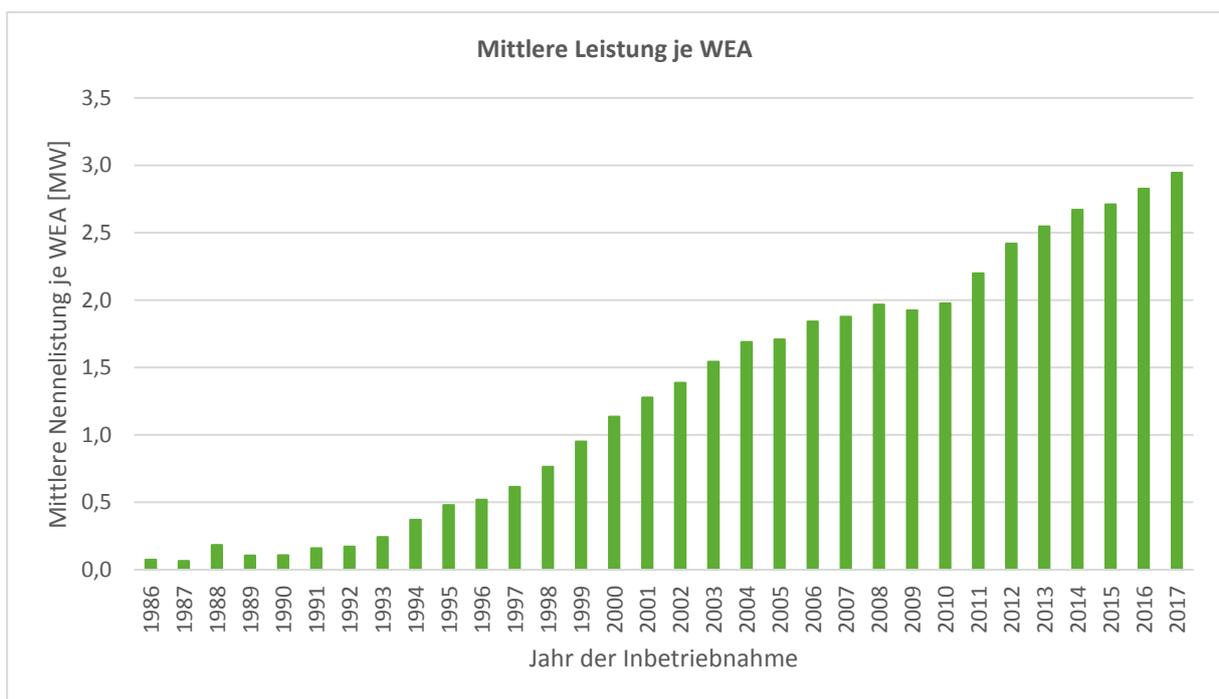
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 49: Darstellung der zwischen 1986 und 2017 in Betrieb genommenen Gesamtnennleistung



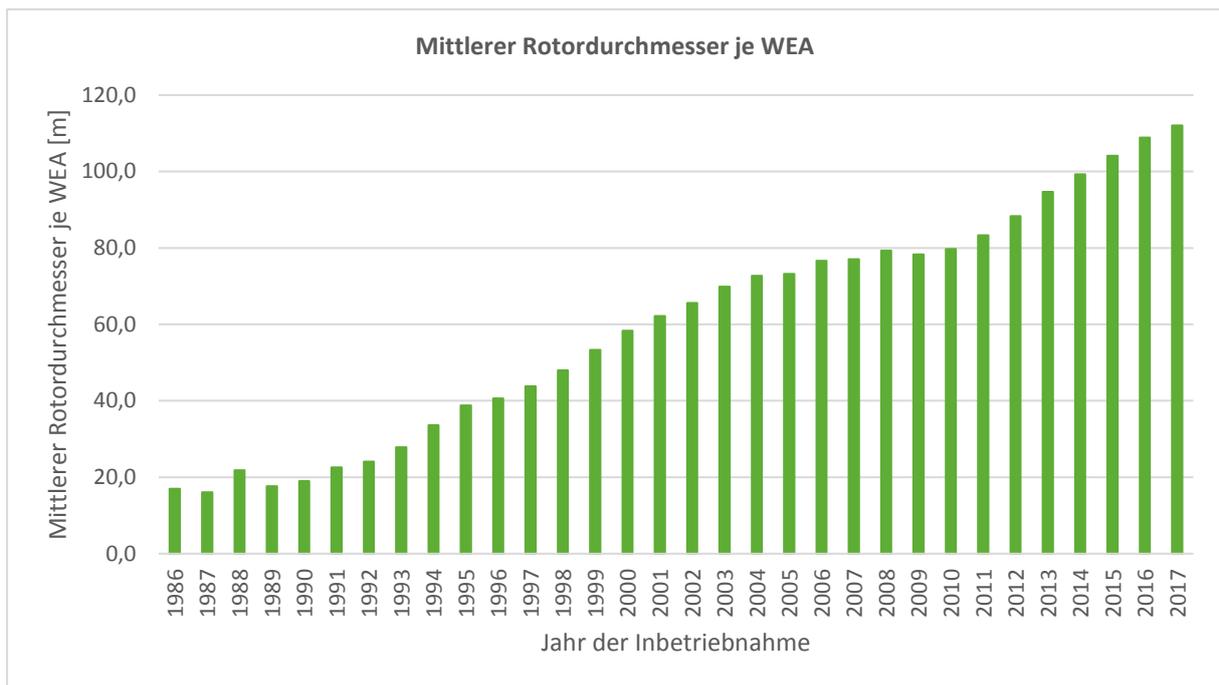
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 50: Darstellung der mittleren Nennleistung für die neu errichteten WEA



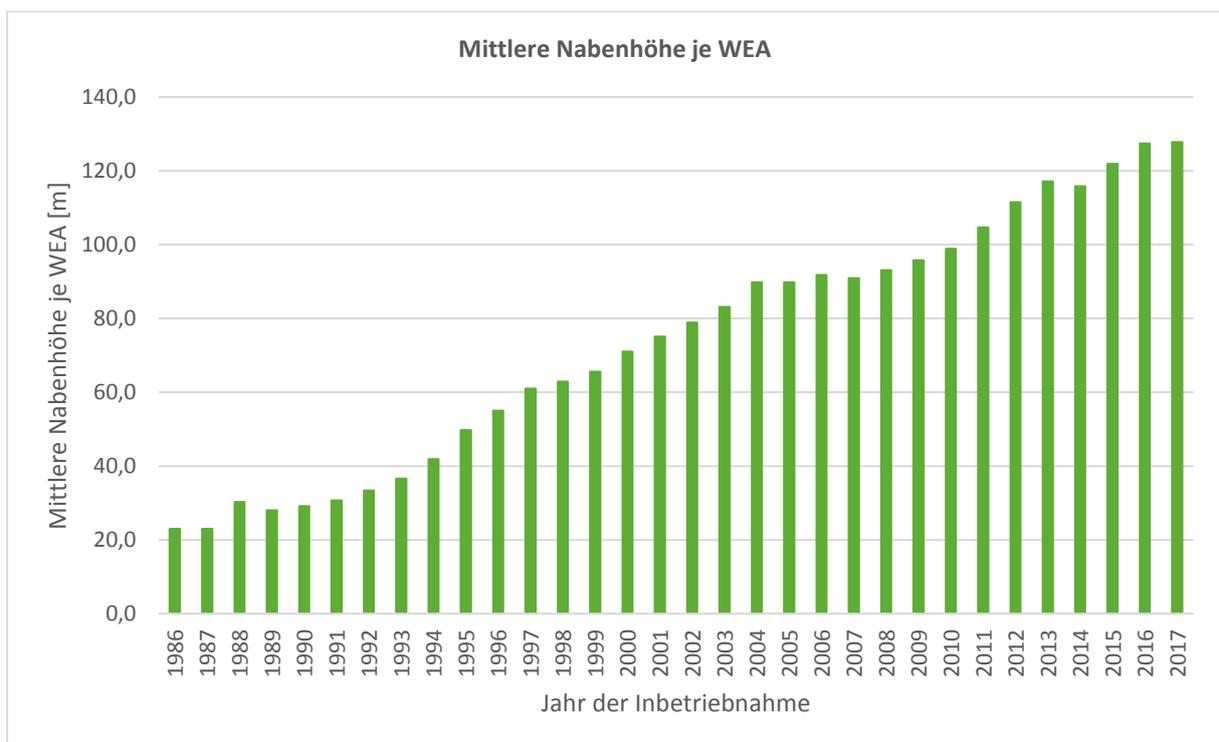
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 51: Darstellung des mittleren Rotordurchmessers für die neu errichteten WEA



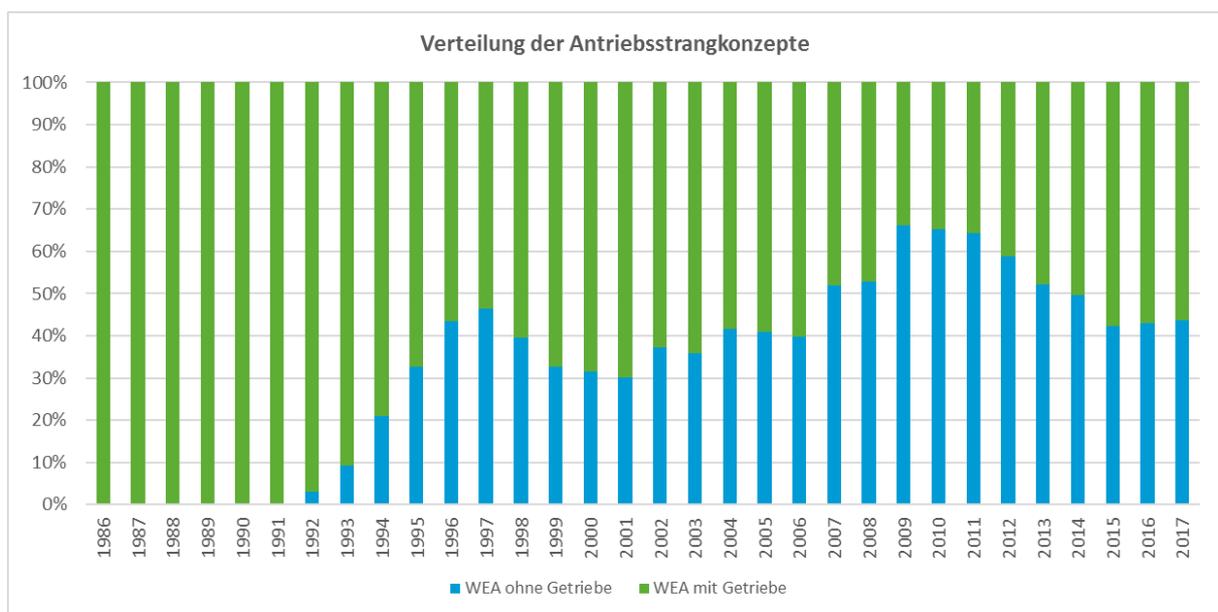
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 52: Darstellung der mittleren Nabenhöhe für die neu errichteten WEA



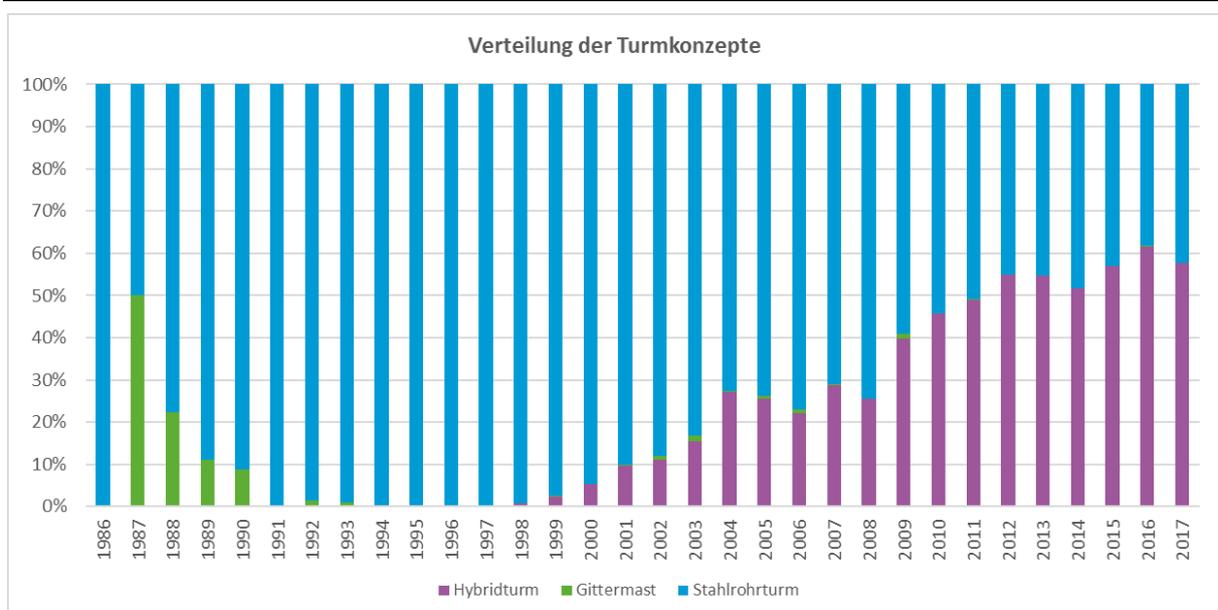
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 53: Anteile der Antriebskonzepte (bezogen auf die Nennleistung der Neuinstallationen) als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme



Quelle: (Ramboll)

Abbildung 54: Anteile der Turmvarianten (bezogen auf die Nennleistung der Neuinstallationen) als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme



Quelle: (Ramboll)

Abschließend wird auch die regionale Verteilung der installierten WEA dargestellt. Hierzu wurden die einzelnen Bundesländer wie folgt in drei Gruppen unterteilt:

1. Nord-Deutschland

- Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein

2. Mittel-Deutschland

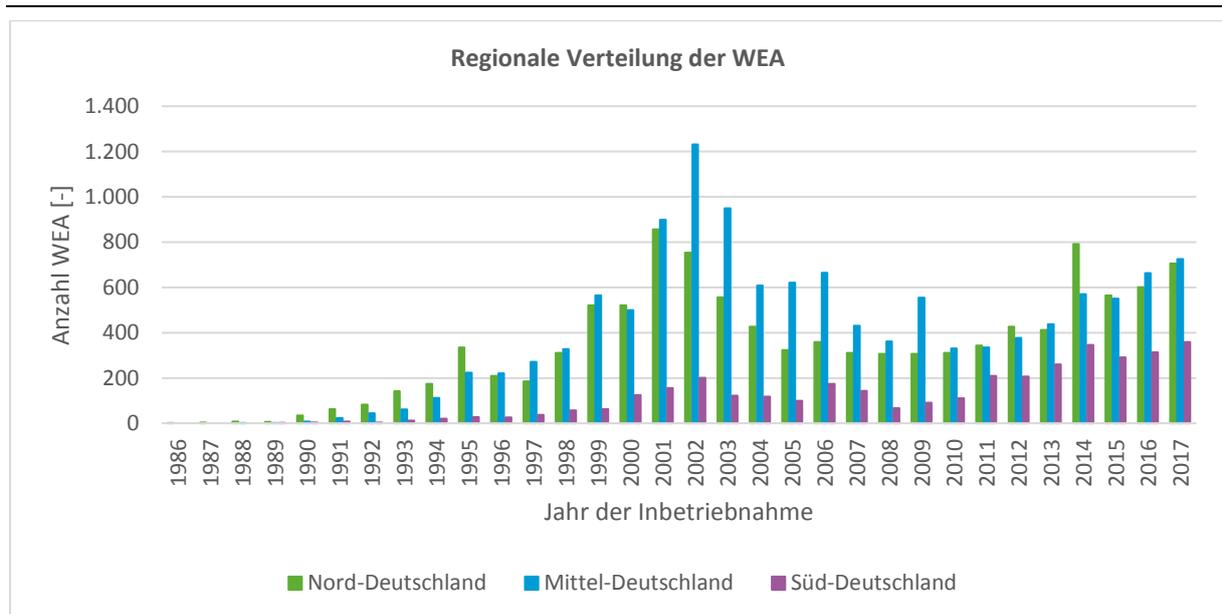
- Berlin, Brandenburg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen

3. Süd-Deutschland

- Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Saarland

Aus dieser Grafik lässt sich bspw. der Schwerpunkt der zukünftigen Rückbauaktivitäten jeweils auch unter zeitlichen Gesichtspunkten (bei Ansatz einer mittleren Betriebsdauer je WEA) ableiten.

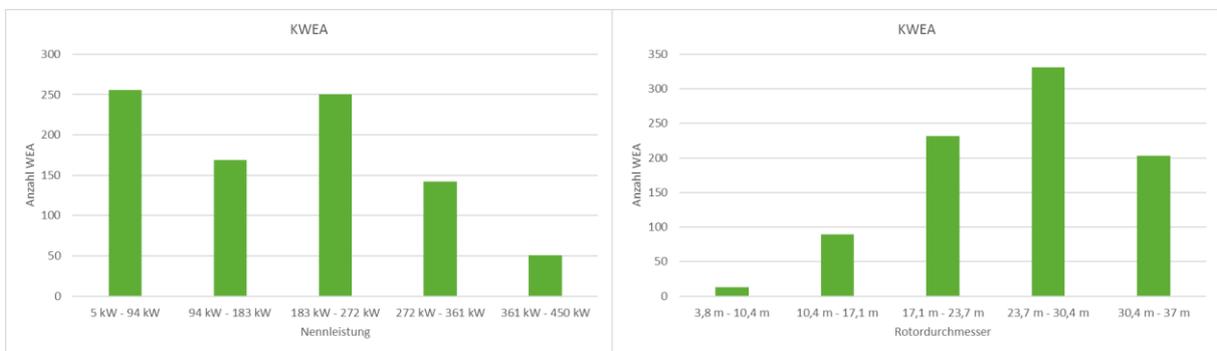
Abbildung 55: Verteilung der WEA-Errichtungen je Region und als Funktion des Jahres der Inbetriebnahme



Quelle: (Ramboll)

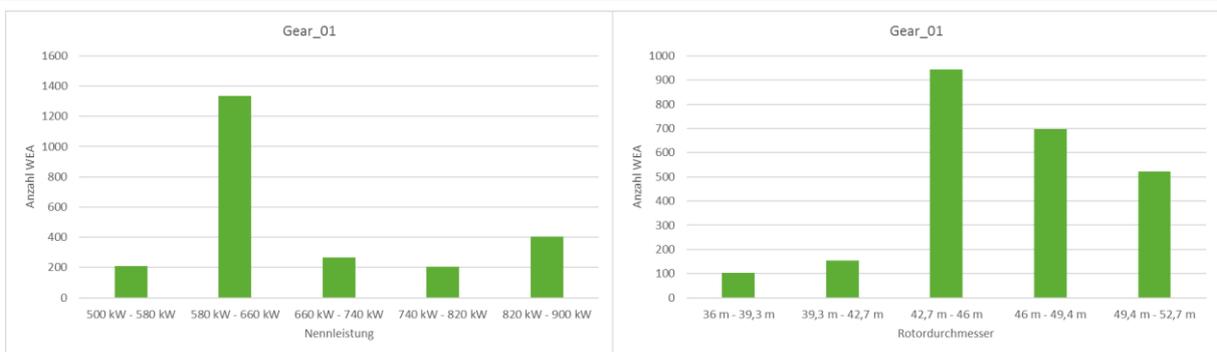
D Verteilung der Rotordurchmesser und der Nennleistung innerhalb der WEA-Cluster aus Kapitel 5.1

Abbildung 56: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „KWEA“



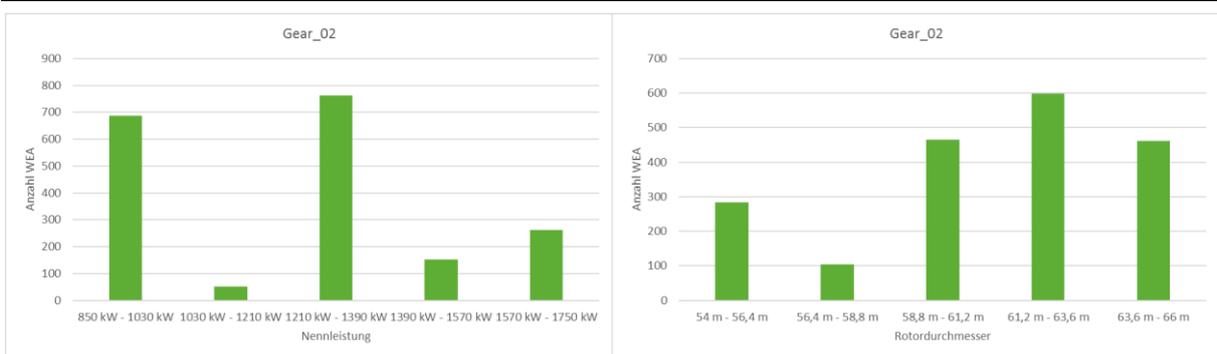
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 57: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_01“



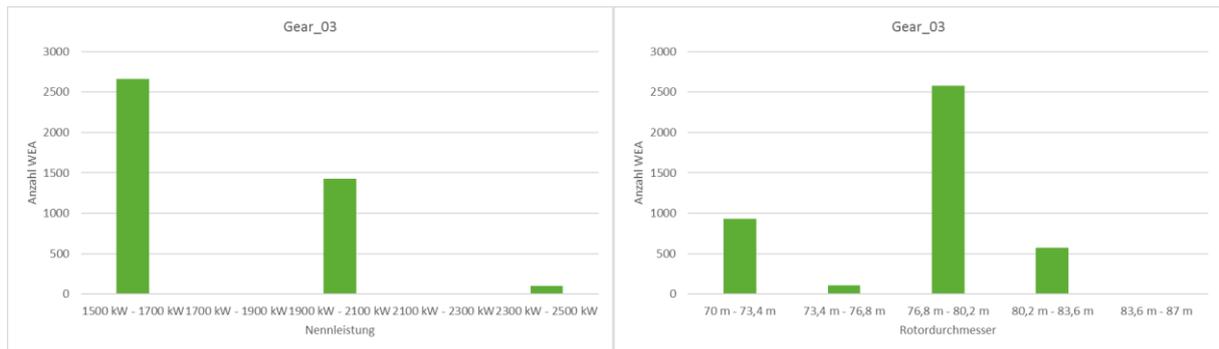
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 58: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_02“



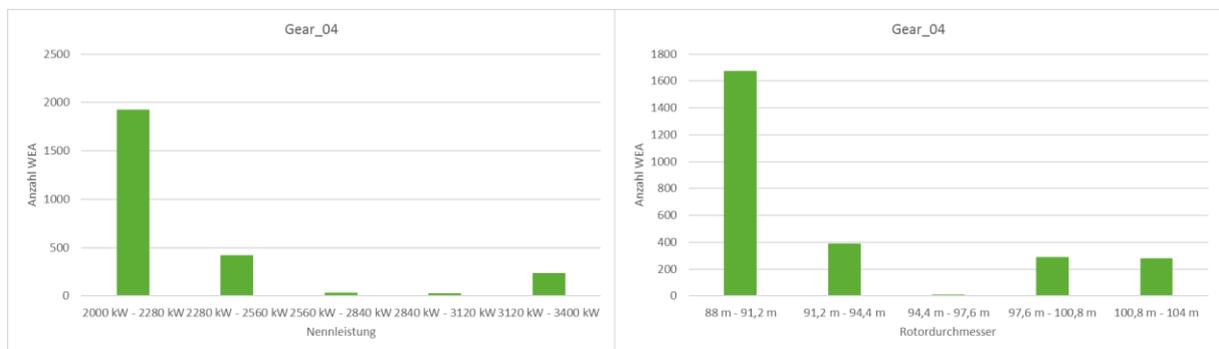
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 59: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_03“



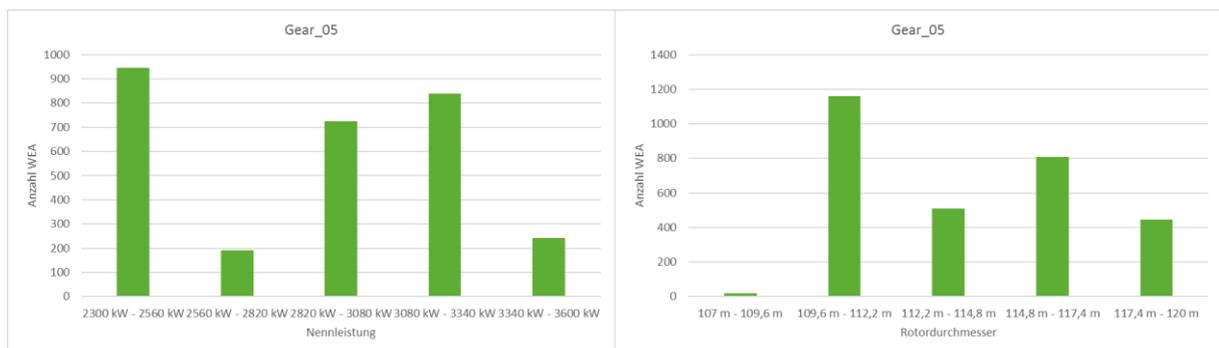
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 60: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_04“



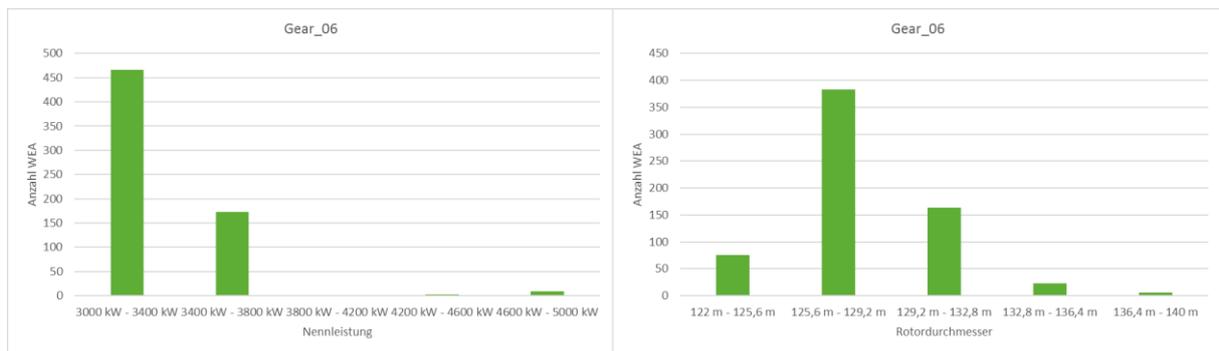
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 61: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_05“



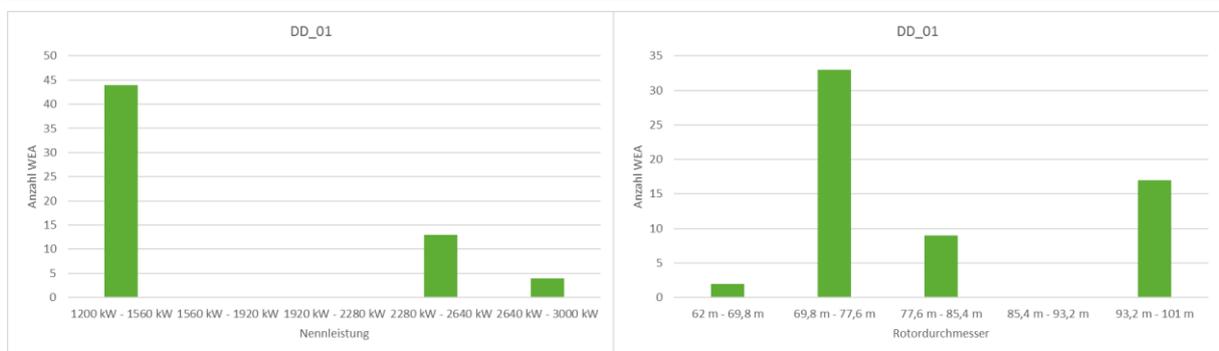
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 62: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „Gear_06“



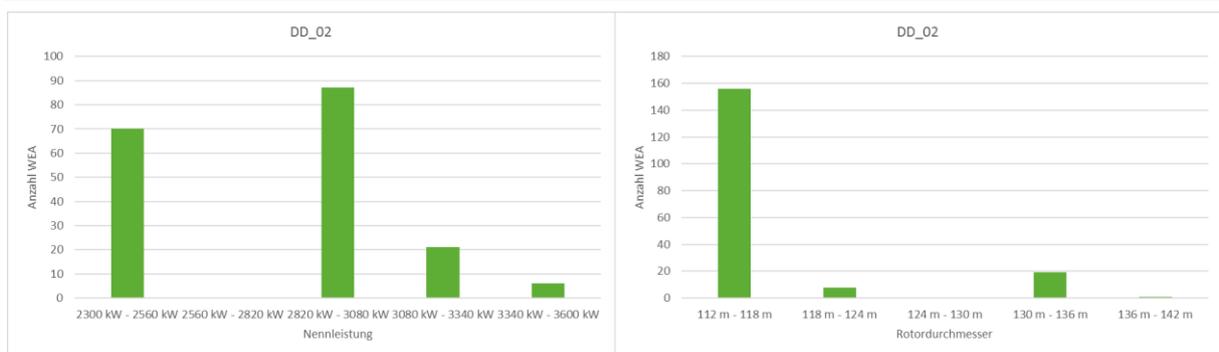
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 63: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_01“



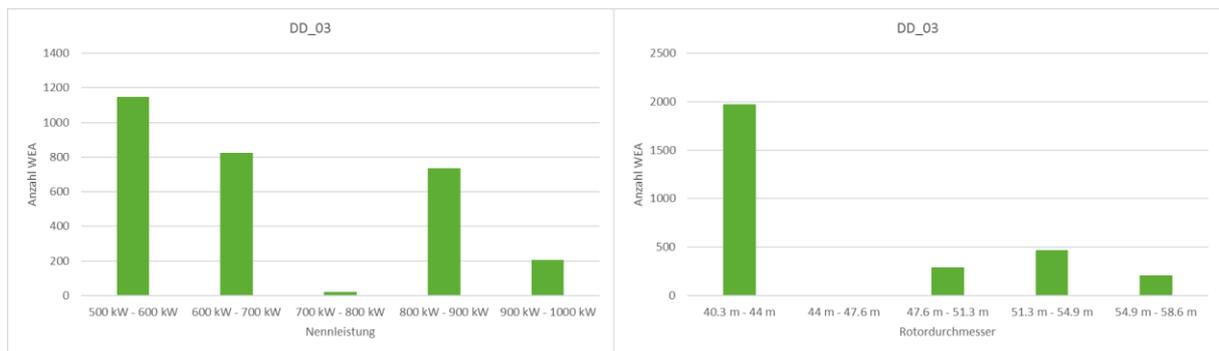
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 64: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_02“



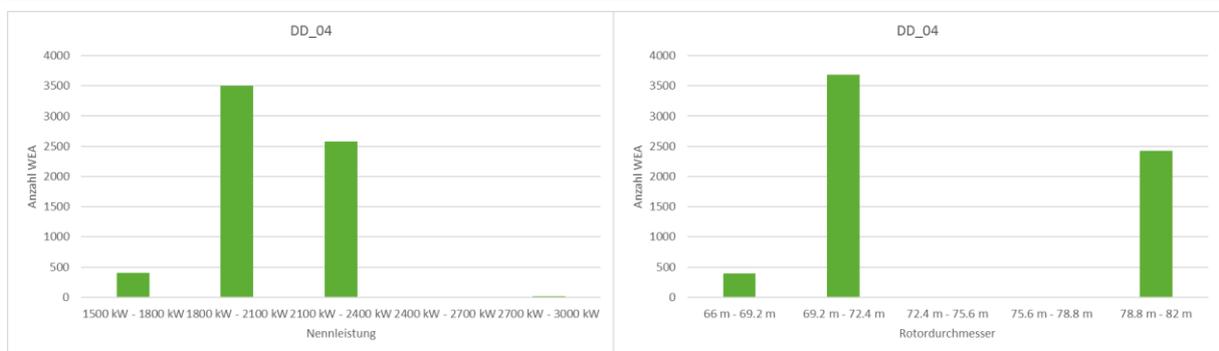
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 65: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_03“



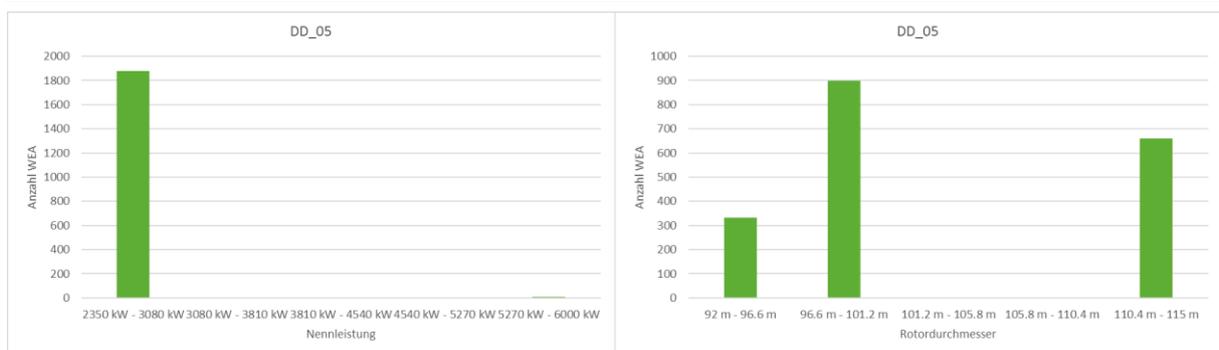
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 66: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_04“



Quelle: (Ramboll)

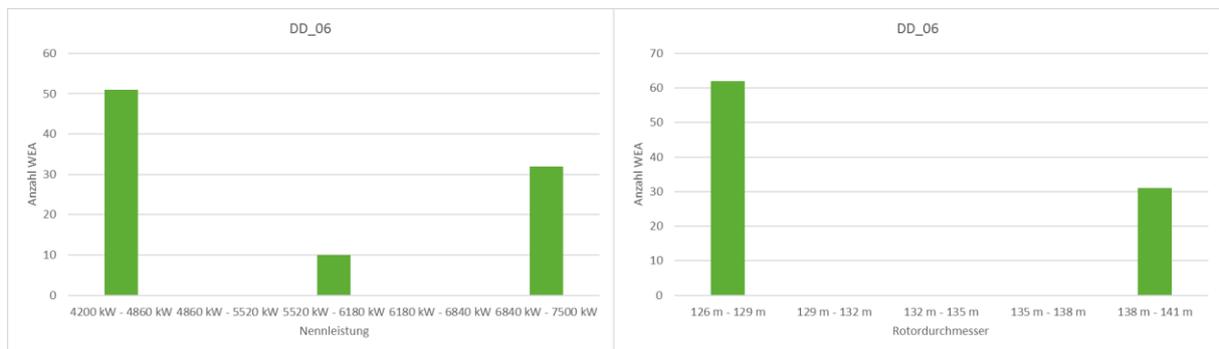
Abbildung 67: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_05“



Quelle: (Ramboll)

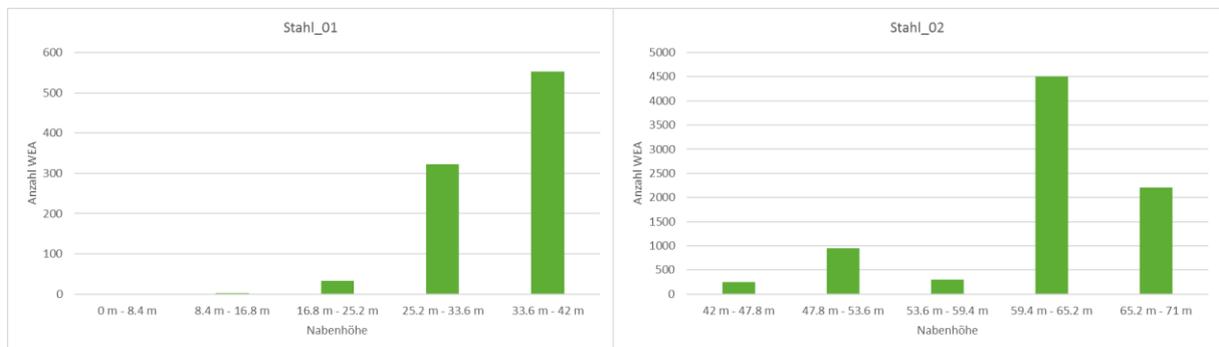
E Verteilung der Nabenhöhen je Turm-Cluster aus Kapitel 5.1

Abbildung 68: Verteilung der Nennleistung und des Rotordurchmessers innerhalb des WEA-Clusters „DD_06“



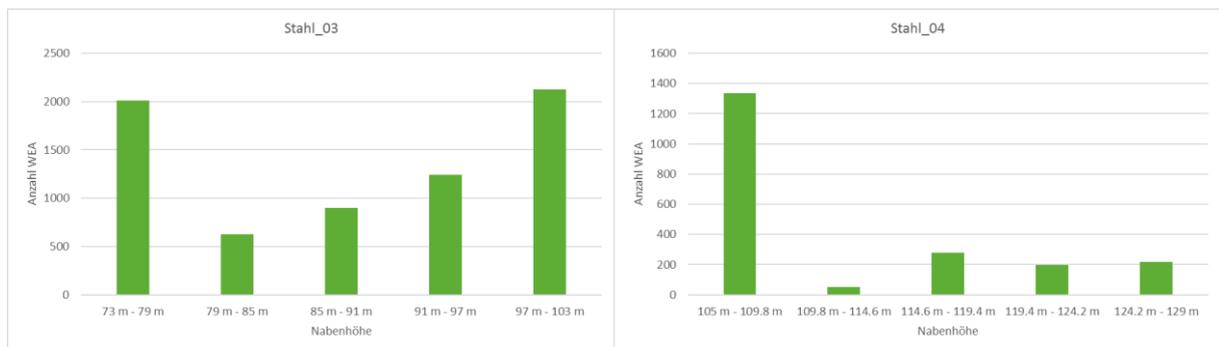
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 69: Verteilung der Nabenhöhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_01“ und „Stahl_02“



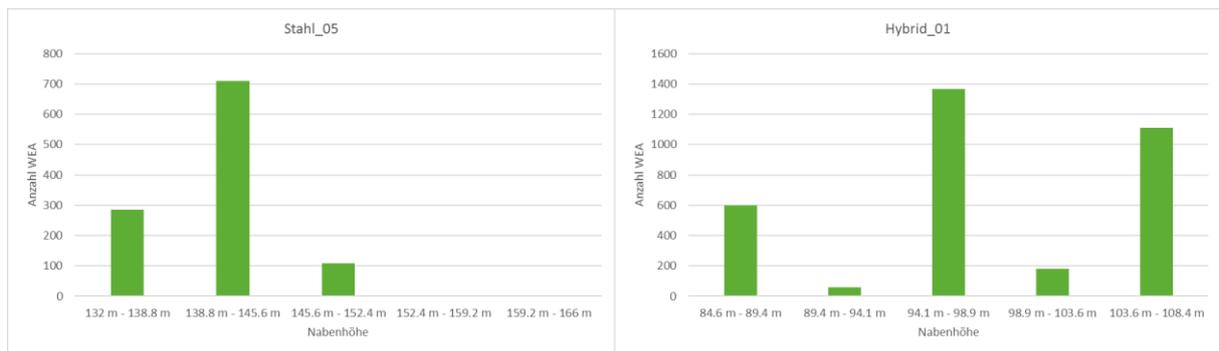
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 70: Verteilung der Nabenhöhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_03“ und „Stahl_04“



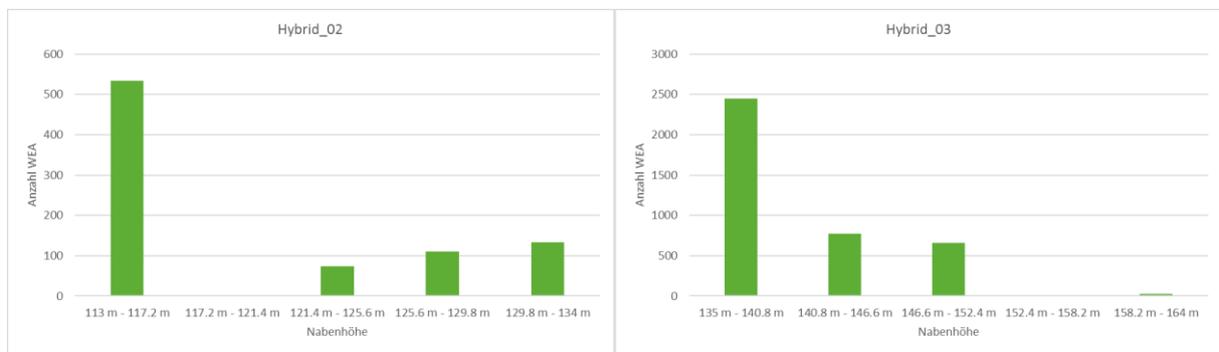
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 71: Verteilung der Nabenhöhen innerhalb der Turm-Cluster „Stahl_05“ und „Hybrid_01“



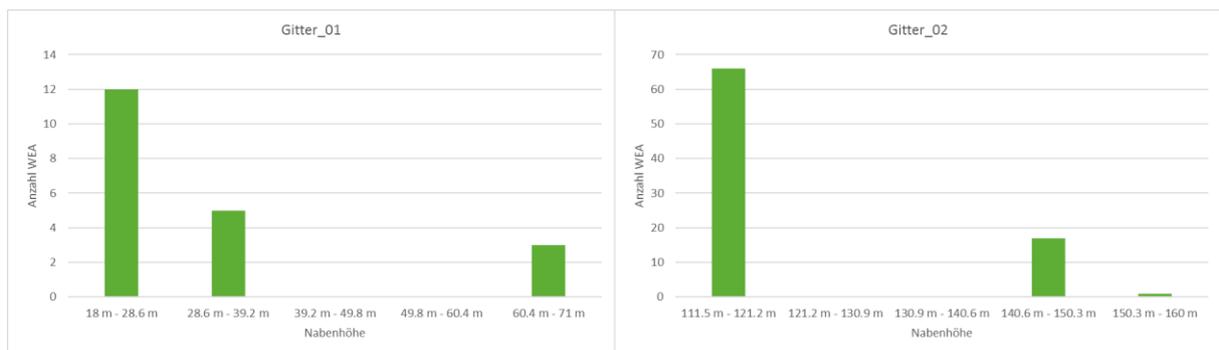
Quelle: (Ramboll)

Abbildung 72: Verteilung der Nabenhöhen innerhalb der Turm-Cluster „Hybrid_02“ und „Hybrid_03“



Quelle: (Ramboll)

Abbildung 73: Verteilung der Nabenhöhen innerhalb der Turm-Cluster „Gitter_01“ und „Gitter_02“



Quelle: (Ramboll)

F Beschreibung der Rechenmodels zur Abschätzung der Rückbaukosten aus Kapitel 5.4

Für die Abschätzung der resultierenden Rückbaukosten wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die einzelnen Rückbauschritte kostenseitig nachbildet. Grundlage dieses Modells waren insbesondere auch die Ergebnisse aus Kapitel 2 und die während der Interviews mit den verschiedenen Akteuren gewonnenen Informationen.

Hierbei wird grundsätzlich von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Rückbau mittels Krans
- Rückbau von Betonturmsegmenten mittels Sprengung
- Vollständige Entfernung der Fundamente
- Wiederverfüllung der Fundamentgruben
- Vollständige Entsorgung der rückgebauten WEA / Komponenten

Strukturell lässt sich die Kostenmodellierung zudem in vier Teilbereiche untergliedern.

- Vorbereitungsarbeiten
- Demontage der WEA inkl. Turm
- Demontage der Fundamente
- Entsorgung der Materialien

Nachfolgend werden die einzelnen Teilbereiche und die mit den Teilbereichen verknüpfte Kostenansätze näher beschrieben.

F.1 Vorbereitungsarbeiten

Wie in Kapitel 2 beschrieben müssen vor der eigentlichen Demontage zunächst einige Vorbereitungsarbeiten erledigt werden. So müssen bspw. die Kabelverbindungen gelöst bzw. das Turmkabel durchtrennt werden. Zudem sind Betriebsflüssigkeiten abzulassen und Schraubverbindungen möglichst „vorzulösen“.

Für die Vorbereitungsarbeiten sind gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 2 schätzungsweise 2-3 Arbeitstage je WEA, bei einem Personaleinsatz von vier Personen notwendig. Innerhalb der Kostenmodels werden diesbezüglich 20 Arbeitsstunden je WEA und Arbeiter (entsprechend 2,5 Arbeitstage zu je 8 Stunden), bei insgesamt vier Arbeitern und einem Stundensatz von 65 €/Stunde angesetzt. Insgesamt fallen somit 5.200 €/WEA an Personalkosten an.

Ergänzend werden weitere 2.500 €/WEA für die Einrichtung der Baustelle inkl. Verkehrssicherung berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um einen mittleren Kostenansatz, der insbesondere auch bei Gewerken, die während der Installation von WEA benötigt werden häufig Anwendung findet.

F.2 Demontage der WEA inkl. Turm

Für die Demontage der WEA sind insbesondere Personal- und Krankkosten sowie bei Hybridtürmen ergänzend auch Kosten für die Sprengung zu berücksichtigen.

Bezüglich des Personals werden insgesamt acht Personen berücksichtigt, von denen sich drei während der Demontage in der WEA befinden und bspw. die zu demontierenden Komponenten lösen und an den Kran befestigen. Die restlichen fünf Personen befinden sich am Boden und sind mit der Zerlegung der demontierten Komponenten in transportfähige Einheiten beschäftigt. Hierbei werden die fünf Arbeiter teilweise von einem kleineren Hilfskran, der ebenfalls für den Auf- und Abbau des Hauptkrans benötigt wird, unterstützt (Anm.: Die Kosten für diesen Hilfskran sind in Kostensätzen des Hauptkrans bereits enthalten). Analog zu den Personalkosten aus der Vorbereitungsphase wird von einem Stundensatz in Höhe von 65 € ausgegangen. Dieser Stundensatz liegt geringfügig über den mittleren Stundensätzen, beinhaltet neben dem reinen Personal jedoch auch Werkzeug. Die Anzahl der Arbeitstage je Person hängt grundsätzlich von den erforderlichen Krantagen ab, die wiederum in Abhängigkeit von der Größe der WEA zu sehen sind. Für die einzelnen Turm-Cluster haben wir die Anzahl der benötigten Tage wie folgt berücksichtigt:

- „Gitter_01“ 1,5 Tage
- „Gitter_02“ 3,0 Tage
- „Hybrid_01“ 2,0 Tage
- „Hybrid_02“ 3,0 Tage
- „Hybrid_03“ 4,0 Tage
- „Stahl_01“ 1,5 Tage
- „Stahl_02“ 2,0 Tage
- „Stahl_03“ 2,0 Tage
- „Stahl_04“ 3,0 Tage
- „Stahl_05“ 4,0 Tage

Hierbei wird entgegen der Vorbereitungsarbeiten und aufgrund des typischen Kranarbeitstages von einer täglichen Arbeitszeit in Höhe von 10 Stunden ausgegangen.

Bezüglich der Krankkosten wurde im Zuge des Projektes eine aktuelle Preisliste von einem Kranunternehmer eingeholt. Zur grundsätzlichen Validierung der Preisliste erfolgte zudem eine zusätzliche Preisindikation für den größten Kran aus der Preisliste, einem 900 t-Raupenkran, die im Ergebnis zu sehr ähnlichen Kosten führte. Sämtliche Krankkosten verstehen sich jeweils inkl. Kranführer, zudem ist ein typischer Kranarbeitstag, wie bereits vorstehend erwähnt und aufgrund der insgesamt verhältnismäßig hohen Kosten, auf 10 Stunden ausgelegt.

Im Einzelnen setzen sich die Krankkosten aus den Kosten für die An-/Abfahrt inkl. Nebenkosten (z.B. Begleitfahrzeuge während des Transports, Genehmigungen), Kosten für das Umsetzen (falls in einem Windpark mehrere WEA nacheinander abgebaut werden), den Tagessätzen und den Kosten für die Versicherung zusammen. Hierbei sind insbesondere bei sehr großen Kränen, die Kosten für die An- und Abfahrt in einem hohen fünfstelligen Bereich, sodass sich kostenseitig bei

dem Rückbau von mehreren WEA gegenüber einer einzelnen WEA deutliche Synergien ergeben können.

Zudem schwanken die Krankosten je nach benötigtem Kran, d.h. der erforderlichen Hakenhöhe, sowie dem zu hebenden Gewicht, erheblich. Die Auswahl eines geeigneten, jedoch möglichst kleinen Krans hat somit einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Rückbaukosten. Innehalb der Kostenmodellierung sind wir für die einzelnen Turm-Cluster von folgenden zum Einsatz kommenden Krantypen ausgegangen:

- „Gitter_01“ 400 t Telekran
- „Gitter_02“ 900 t Raupenkran
- „Hybrid_01“ 500 t Gitterkran
- „Hybrid_02“ 900 t Raupenkran
- „Hybrid_03“ 900 t Raupenkran
- „Stahl_01“ 400 t Telekran
- „Stahl_02“ 700 t Telekran
- „Stahl_03“ 500 t Gitterkran
- „Stahl_04“ 900 t Raupenkran
- „Stahl_05“ 900 t Raupenkran

Innerhalb des Modells werden die resultierenden Kosten, je nach ausgewähltem Kran-Typ und in Abhängigkeit der benötigten Krantage (wie zuvor beschrieben) automatisch berücksichtigt.

Abschließend sind bei dem Rückbau von Hybridtürmen zusätzliche Kosten durch die Sprengung der Betonsegmente zu berücksichtigen. Hierzu wurden während der Befragung aus Kapitel 2 verschiedene Preisindikationen eingeholt, wonach sich die resultierenden Kosten zwischen 20.000 bis 30.000 € bewegen. Innerhalb des Modells gehen wir von Kosten je Turmsprengung von 30.000 € (inkl. Aufnahmen und Verladen) des Betons aus.

F.3 Demontage der Fundamente

Die Demontagekosten der Fundamente unterteilen sich in insgesamt drei Kategorien. So sind einerseits Kosten für die Verrichtung der Fundamente, Kosten für das Aufnehmen und Verladen des Materials und Kosten für die Verfüllung der Fundamentgruben mit Füllerde zu berücksichtigen.

Die Verrichtung der Fundamente kann ersatzweise mit Meißelbaggern oder durch eine Sprengung erfolgen. Gemäß den Ergebnissen der telefonischen Befragung aus Kapitel 2 ist hierbei ab einem gewissen Fundamentvolumen davon auszugehen, dass die Sprengung die insgesamt wirtschaftlichere Alternative darstellt. Nachfolgend wird entsprechend von Lockersprengungen der Fundamente ausgegangen. Die resultierenden Kosten basieren gemäß der telefonischen Befragung zwischen 32 bis 38 €/m³. Nachfolgend haben wir einen mittleren Ansatz in Höhe von 35 €/m³ unterstellt.

Nach erfolgter Sprengung sind die Fundamentmaterialien aufzunehmen und auf einen Transporter zu verladen. Hierzu wurden während der telefonischen Befragung aus Kapitel 2 ergänzende Kosten zwischen 10 bis 15 €/m³ benannt. Nachfolgend haben wir, analog zur Verrichtung den Mittelwert dieses Intervalls, spezifische Kosten für das Aufnehmen und Verladen in Höhe von 12,50 €/m³ berücksichtigt.

Abschließend sind die Fundamentgruben mit Material zu verfüllen. Hierbei ist grundsätzlich natürliches Material einzubauen. Innerhalb des Kostenmodells unterstellen wir den Einbau von Füllboden, den wir inkl. Einbau mit Kosten in Höhe von 10 €/m³ berücksichtigen.

F.4 Entsorgung der Materialien

Nachdem die WEA inkl. Fundament vollständig demontiert worden ist, sind die verbleibenden Materialien der Entsorgung zuzuführen.

Auf der Grundlage einer telefonischen Anfrage bei einem Bauunternehmen berücksichtigen wir hierbei grundsätzlich 8,50 €/t zu entsorgendem Material. Der Ansatz basiert auf der Annahme von kurzen Transportwegen und soll insbesondere den Transport von Materialien und Abfällen innerhalb der Baustelle abdecken.

Für die eigentliche Entsorgung werden folgende stoffspezifischen Entsorgungskosten berücksichtigt, welche je nach Region, Marktpreisen für Sekundärrohstoffen und Verfügbarkeit von Behandlungskapazitäten starken Schwankungen unterliegen können. Es handelt sich im Folgenden um grobe aber derzeit plausible Schätzwerte. Dabei handelt es sich hier um Kosten die Erfassung, Vorbehandlung, Transport und finale Behandlung:

- Betonschutt: 10 €/t

Der Ansatz basiert auf einem bundesweit zu erwartendem Mittelwert für Bauschutt mit sehr hohem Beton-Anteil ist jedoch grundsätzlich stark schwankend. So werden, je nach regionaler Zulässigkeit von und Nachfrage nach Recycling (RC)-Beton, teilweise auch Betonschuttabfälle kostenneutral entgegengenommen, wohingegen in einigen Regionen Deutschland für die Annahme von Betonschutt bis zu 25 €/t anfallen.

- GFK: 400 €/t

Für die Entsorgung von GFK-haltigen Materialien werden Kosten in Höhe von 400 €/t unterstellt. Bei diesem Ansatz handelt es sich um einen Mittelwert der während des geführten Interviews eingeholten Preisindikationen (siehe Kapitel 2). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Preisindikationen der Entsorgungsfachbetriebe geringer gewesen sind. Von Rückbaufirmen und Verwertungsanlagen wurden dagegen teilweise auch höhere Preise genannt. Schwankungen ergeben sich hier wahrscheinlich auch durch den Grad der Vorbehandlung, welcher von den Interviewpartnern veranschlagt wurde.

- CFK: 800 €/t

Zur Entsorgung von CFK-haltigen Materialien liegen insgesamt deutlich weniger Preisindikationen vor als bei GFK. Insgesamt gehen alle Befragten jedoch von deutlich höheren Entsorgungskosten für CFK-haltige Materialien aus. Sofern von einzelnen Befragten Indikationen zur Entsorgung von GFK und zu CFK gemacht wurden, lag die CFK-Entsorgung typischerweise im Bereich von 200% im Vergleich zu GFK. Das Bifa-Institut (2012) nennt z.B. Entsorgungskosten von CFK von ca. 500 €/t bei einer Entsorgung in

Sondermüllverbrennungsanlagen. Dieser Wert beinhaltet jedoch nicht die bei Rotorblättern nötige Vorkonfektionierung sowie den Transport. Soll diesen Aspekten ebenso Rechnung getragen werden, erhöhen sich diese Kosten auf bis zu 1250 €/t. Erneut lagen die Preisindikationen der Entsorgungsfachbetriebe unter den hier angesetzten Werten.

➤ Stahl: -200 €/t

Aus der Entsorgung von Stahl können grundsätzlich Gewinne erwirtschaftet werden. Hierbei sind die erzielbaren Markterlöse für Altmetall wie Stahl grundsätzlich sehr volatil und beeinflussen ebenso wie die angesetzten Logistikkosten die Entsorgungskosten beim WEA-Rückbau. Basierend auf dem aktuellen Preisniveau haben wir für Stahl Einnahmen in Höhe von 200 €/t unterstellt (EUWID 2018).

➤ Kupfer: -1.600 €/t

Analog zu Stahl haben wir für Kupfer Recyclerlöse in Höhe von 1.600 €/t berücksichtigt und nehmen nach Befragung verschiedener Entsorger nicht den reinen Ankaufspreis, sondern nehmen weitere Logistikkosten an (EUWID 2018).

➤ Aluminium: -900 €/t

Den Verkauf von Aluminiumschrott berücksichtigen wir, gemäß dem aktuellen Marktniveau, mit Recyclerlösen in Höhe von 900 €/t (EUWID 2018).

➤ Elektroschrott: 100 €/t

Für die Entsorgung von Elektroschrott berücksichtigen wir Kosten in Höhe von 100 €/t

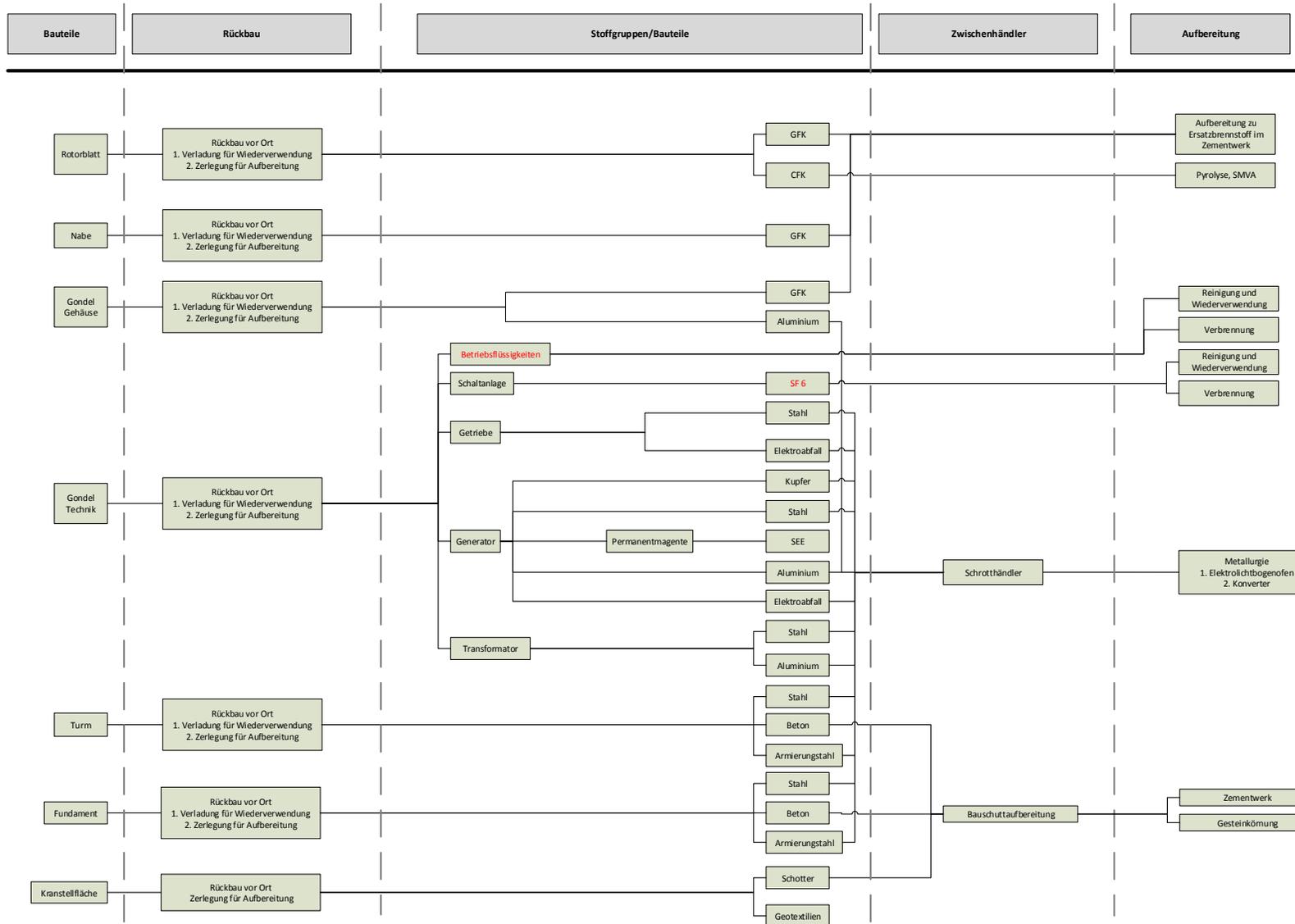
➤ Betriebsflüssigkeiten: 1 €/l

Für die Entsorgung von Betriebsflüssigkeiten (Ölen, Kühlmittel etc.) berücksichtigen wir Kosten in Höhe von 1 €/l

Bei vorstehenden Ansätzen handelt es sich um aktuelle und gemittelte Ansätze, die uns nach der Bearbeitung der bisherigen APs und den gewonnenen Erkenntnissen als grundsätzlich plausibel erscheinen. Mit aller Deutlichkeit ist jedoch darauf hinzuweisen, dass insbesondere während der telefonischen Befragung teilweise von einzelnen Akteuren auch erheblich abweichende Einheitspreise benannt wurden. Zudem wurden teilweise auch lokale Unterschiede (bspw. beim Umgang mit Betonschotter) identifiziert. Weiterhin ist insbesondere für die Recyclingpreise der Metalle (insbesondere Stahl, Kupfer, Aluminium) darauf hinzuweisen, dass diese infolge von globalen Preisschwankungen für Rohstoffe ebenfalls zeitlich lokal stark schwanken können. Folglich sind Kostenschätzungen zum Rückbau von WEA stets mit Unsicherheiten behaftet.

Mit Blick auf Kupfer/Elektroschrott können Dopplungen nicht komplett ausgeschlossen werden. Allerdings definieren wir hier Elektroschrott hauptsächlich als Transformatoren und Steuerungselemente für WEA die i.d.R. kostenpflichtig entsorgt werden müssen. Kupferhaltige Materialien stammen eher aus Kabeln/Leitungen und dem Generator, welche hier nicht unter Elektroschrott fallen würden. Die WEA-Hersteller gehen in den Spezifikationen (häufig) von einer ähnlichen Unterscheidung (d.h. Kupfer / Elektroschrott) aus – dies womöglich insbesondere auch, da die Recyclerlöse für Kupfer hoch sind und eine geringe Rückbaukostenbilanz aus Sicht der Hersteller positiv ist. Da wir insgesamt diese Spezifikationen als Datengrundlage aufgreifen, sind Dopplungen, die zu einem erheblichen Fehler führen würden, zumindest nicht sehr wahrscheinlich

G Vereinfachtes Ablaufdiagramm zu den Verwertungswegen von Bauteilen einer WEA



H Anforderungen an den Rückbau von Windenergieanlagen und Normen, welche gemäß Kapitel 7 angewendet oder auf Anpassung an den Rückbau geprüft werden sollten

Tabelle 35: Anforderungen an den Rückbau von Windenergieanlagen und Normen, welche gemäß Kapitel 7 angewendet oder auf Anpassung an den Rückbau geprüft werden sollten

Anforderungen / Bereiche	Relevanz	Bestehende Norm	Bereits abgedeckt	Zu ergänzen
Standardisierte Informationspflichten	Da aufgrund der langen Betriebsphasen einer WEA nicht sichergestellt werden kann, dass der WEA-Hersteller die notwendigen Informationen zum Rückbauzeitpunkt bereitstellen kann, sollten die Informationen zu Bauteilen zwingend vom Betreiber zur Verfügung gestellt werden können.	VDI 4603 Blatt 2 Betriebsmanagementsysteme für Windkraft- und Fotovoltaikanlagen <i>Entwurf</i>	Informationsmanagement Prozessmanagement Instandhaltungsmanagement	Falls noch nicht in Entwurf vorgesehen: Verpflichtung der Informationsbereitstellung der Hersteller (z.B. Gewicht der Bauteile, Zusammensetzung, Art und Menge, ...)
		DIN EN 61400-25-1 Windenergieanlagen Teil 25-1: Kommunikation für die Überwachung und Steuerung von Windenergieanlagen – Einführende Beschreibung der Prinzipien und Modelle <i>Zurückgezogen</i>	Vorgaben zur Kommunikation zwischen den Komponenten der Windenergieanlage	Verpflichtung der Informationsbereitstellung der Hersteller (z.B. Gewicht der Bauteile, Zusammensetzung, Art und Menge, ...)
Dokumentationsstandards für Besitzer- und Betreiberverhältnisse	Verfügbare Informationen über Besitzer und Betreiber, sowie den Wechsel von Besitzern und Betreibern; Relevant beispielsweise für den Fall der Wiederverwendung an anderen Orten	VDI 4603 Blatt 2 Betriebsmanagementsysteme für Windkraft- und Fotovoltaikanlagen <i>Entwurf</i>	Informationsmanagement Prozessmanagement Instandhaltungsmanagement	Falls noch nicht in Entwurf vorgesehen: Verpflichtung der Informationsbereitstellung über Besitzer, Betreiber, involvierte Unternehmen und Baufirmen
Standardisierte Vorkehrungen zur Entnahme von Betriebsmitteln	Zur Sicherstellung der Anforderungen der Altölverordnung (AltöIV) und	DIN 51750-1 Prüfung von Mineralölen; Probenahme; Allgemeines	Bedingungen und Ablauf von Probenahmen Fokus auf Öle	Vorgaben zum angemessenen Recycling, Aufarbeitung und Zerstörung bestimmter Stoffe (Öle und Gase)

	der EU-Verordnung 517/2014 zu fluorieren Treibhausgasen	DIN EN 60480 VDE 0373-2 Richtlinien für die Prüfung und Aufbereitung von Schwefelhexafluorid (SF ₆) nach Entnahme aus elektrischen Betriebsmitteln und Spezifikation für dessen Wiederverwendung Selbstverpflichtung der Hersteller und Betreiber elektrischer Betriebsmittel	Wiederverwendung, Untersuchungsverfahren, Handhabung, Lagerung und Transport von gebrauchten SF ₆	Norm bezieht sich nur auf SF ₆ ; um auch andere Betriebsmittel, Kühl und Schmiermittel in Windenergieanlagen abzudecken wäre eine Ergänzung sinnvoll
		VDI/GVSS 6202 Blatt 1 Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten	Umgang mit Schadstoffen bei Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten in baulichen und technischen Anlagen. Entfernen, Beschichten und räumliche Trennen von Schadstoffen sowie die Bereitstellung und Übergabe der hierbei anfallenden Abfälle zur Entsorgung	Fokus nicht nur auf Schadstoffe, sondern ebenfalls auf Öle und Gase
Standardisierte Entsorgungsnachweise und Wiegescheine	Standardisierte Verfahren nach Nachweisverordnung (NachwV) sowie Wiegescheine bei der Entsorgung von Abfällen	VDI/GVSS 6202 Blatt 1 Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten	Anforderungen an Beförderer und Entsorger der Abfälle - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit Schadstoffbelastung	Beschreibung der Pflicht des Entsorgungsnachweis und Wiegescheine und bestimmte Voraussetzungen
Seilsägen für den baustellenseitigen Einsatz	Zerteilung der Rotorblätter führt zu Umweltverschmutzung durch CFK- und GFK- Staub	DIN EN 15027 Transportable Wand- und Seilsägen für den Baustelleneinsatz - Sicherheit	Sicherheitsanforderungen und/oder Maßnahmen Nachweis der Sicherheitsanforderungen und/oder Maßnahmen	Sicherstellung, dass Sägen eingehaust sind oder über alternative geeignete Auffangsysteme für Stäube und Abwasser verfügen.

Rotorblattkonstruktion	Weiterverwendung von GFK und CFK	DIN EN 13706 Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profil	Mindestanforderungen für die Qualität, Oberfläche, Toleranzen sowie Festigkeits- und Steifigkeitswerte	Verhinderung, dass Bagger Zerkleinerung vornimmt Vorgaben zur Verwertung: Der Standard soll sicherstellen, dass CFK, Metalle, Aluminium, Holz und ggf. Kupfer entfernt und separat verwertet werden, dass eine Zerkleinerung von GFK bis zu einer festgelegten Siebklassierung erfolgt. Ferner soll der Standard sicherstellen, dass, wenn die Verwertung in Zementwerk das Ziel ist, beim Zuschlag von anderen Abfällen und Spuckstoffen aus der Papierindustrie, keine Metalle und Carbonfasern untergemischt werden, ggf. sind Schadstoffgrenzwerte festzulegen
		DIN EN 61400-23 VDE 0127-23 Windenergieanlagen	Rotorblätter - Experimentelle Strukturprüfung (IEC 61400- 23:2014) Anforderungen für die experimentelle Strukturprüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen und für die Interpretation und die Bewertung der Prüfergebnisse	
Recyclinggerechte Konstruktion von Rotorblättern	Das Ziel ist ein Einsatz von langlebigen, reparierfähigen und recyclingfähigen Rotorblättern mit minimalem Einsatz von Holz und Carbonfasern	DIN EN 13706 Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profil	Mindestanforderungen für die Qualität, Oberfläche, Toleranzen sowie Festigkeits- und Steifigkeitswerte	Vorgaben zum Einsatz von langlebigen, reparierfähigen und recyclingfähigen Rotorblättern; Vorgaben zur Materialwahl: minimalem Einsatz von Holz und Carbonfasern; Kennzeichnungspflicht von Carbonfasern sowie Angaben im Rahmen der technischen Dokumentation
		DIN EN 61400-23 VDE 0127-23 Windenergieanlagen	Rotorblätter - Experimentelle Strukturprüfung (IEC 61400- 23:2014) Anforderungen für die experimentelle Strukturprüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen und für	

			die Interpretation und die Bewertung der Prüfergebnisse	
Wiederverwendungsstandards für SEE-Magneten	Da u.a. der Abbau von Seltene Erden Elemente (SEE) mit Umweltrisiken verbunden ist sollte eine Wiederverwendung vor einem neuen Abbau angestrebt werden	Keine Norm bekannt		Vorgaben, die eine Wiederverwendung von SEE Magneten fördern sowie Vorgaben zur Umsetzung der Wiederverwendung
Rückbau Fundament, Kranstellflächen, Verkabelung	Forderung nach einem ordnungsgemäßen und umweltverträglichen Rückbau Im Falle des vollständigen Rückbaus der Fundamente ist ein Fokus auf das Bodenmaterial zu legen	VDI 6210 Blatt 1 Abbruch von baulichen und technischen Anlagen	Bestimmt Verfahren und Beurteilungsgrundlagen für die Planung und Durchführung des Abbruchs von Bauwerken und technischen Anlagen. Die Richtlinie beschreibt das Planen, Durchführen und Nachbereiten solcher Arbeiten sowie das Gewinnen, Bereitstellen, (Zwischen-)Lagern, Behandeln und Umschlagen der dabei anfallenden Materialien und Abfälle.	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieräder
		DIN 18007 Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche	Vorstellung der unterschiedlichen Abbruchverfahren, Eignung und Auswirkung von Abbruchverfahren	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieräder

		DIN EN 61400-6 Windenergieanlagen - Teil 6: Auslegungsanforderungen an Türme und Fundamente	Anforderungen und allgemeine Prinzipien, die bei der Bewertung der strukturellen Integrität von Tragwerken von Windenergieanlagen auf dem Festland anzuwenden sind (geotechnische Bewertung)	Vorgaben für den Rückbau der Windenergieanlage, sowie des Fundaments, der Kranstellen etc.
		DIN 19731 Bodenbeschaffenheit – Verwertung von Bodenmaterial	Anforderungen an die Verwertung von Bodenmaterial Untersuchung der Verwertungseignung Technische Durchführung der Aufbringung	Fokus nicht nur auf Verwertung von Bodenmaterial sondern auf kompletten Rückbau (z.B. Art des Rückbaus, Lagerung, Verwertung der einzelnen Bauteile) legen
Angewandte Rückbaumethoden (Kran, Sprengung, Umziehen)	Regulierung der Sprengung von WEA Betontürmen	VDI 6210 Blatt 1 Abbruch von baulichen und technischen Anlagen	Bestimmt Verfahren und Beurteilungsgrundlagen für die Planung und Durchführung des Abbruchs von Bauwerken und technischen Anlagen. Die Richtlinie beschreibt das Planen, Durchführen und Nachbereiten solcher Arbeiten sowie das Gewinnen, Bereitstellen, (Zwischen-)Lagern, Behandeln und Umschlagen der dabei anfallenden Materialien und Abfälle.	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieanlagen
		DIN 18007 Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche	Vorstellung der unterschiedlichen Abbruchverfahren, Eignung und Auswirkung von Abbruchverfahren	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieanlagen

Zwischenlagerung von Rückbaumaterialien	VDI 6210 Blatt 1 Abbruch von baulichen und technischen Anlagen	Bestimmt Verfahren und Beurteilungsgrundlagen für die Planung und Durchführung des Abbruchs von Bauwerken und technischen Anlagen. Die Richtlinie beschreibt das Planen, Durchführen und Nachbereiten solcher Arbeiten sowie das Gewinnen, Bereitstellen, (Zwischen-)Lagern, Behandeln und Umschlagen der dabei anfallenden Materialien und Abfälle.	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieanlagen
	DIN 18007 Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche	Vorstellung der unterschiedlichen Abbruchverfahren, Eignung und Auswirkung von Abbruchverfahren	Vorgaben mit spezifischem Bezug auf Windenergieanlagen, Vorgaben zur Zwischenlagerung

Quelle: (Ramboll)

10 Literaturverzeichnis

- (Alku 2018)** Alku GmbH 2018, Trafozerlegung und Wertstoffrückgewinnung, http://www.alku-gmbh.de/fileadmin/user_upload/pdf_download/Imagebroschuere_Transformatoren.pdf, letzter Zugriff am 05.03.2018
- (Anderson 2015)** Niklas Anderson: „Wind turbine end-of-life – Characterization of Waste Material“.
- (AVK Marktbericht 2017)** Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe (AVK)(2017): Composites-Marktbericht 2017; verfügbar unter <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf>, letzter Zugriff 11.12.2018
- (Bauhaus-Universität Weimar)**
- Bauhaus-Universität Weimar (2013 - 2016): Abschlussbericht: Grenzflächen - Aufschluss von Verbundbaustoffen durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen, letzter Zugriff am 20.07.2018.
- (BauNetz Media 2018)** BauNetz Media GmbH (2018): Recyclingbeton | Beton | Betonarten | Baunetz_Wissen. BauNetz Media GmbH. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/recyclingbeton-930267>, zuletzt aktualisiert am 15.07.2018, letzter Zugriff am 15.07.2018.
- (Bifa 2012)** Michael Kümmeth / Anita Gottlieb / Juliane Ramerth / Matthias Seitz / Bernhard Hartleitner / Wolfgang Rommel / Achim Danko / Jakob Wölling, Entwicklungsstudie zur Errichtung einer CFK-Recyclinganlage in Bayern, 2012
- (Bifa 2015)** S. Kreibe / B. Hartleitner / A. Gottlieb / R. Berkmüller / A. Förster / D. Tronecker / B. Reinelt / K. Wambach / W. Rommel, Schlussbericht MAI Recycling – Entwicklung ressourceneffizienter CFK-Recyclingverfahren und Prozessketten für die künftige Bereitstellung qualitativ hochwertiger rC-Halbzeuge, Bifa Institut, 2015.
- (Bipro 2016)** Evaluation der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Wegfalls der Heizwertregelung des § 8 Abs. 3 Satz 1 KrWG, UBA.
- (BMUB 2016)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf; letzter Zugriff 13.11.2018
- (BMU 2018)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2018): Daten zu Elektroaltgeräten, verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/>, letzter Zugriff 20.03.2019
- (BMWi o.J.)** Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (o.J.), verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>; letzter Zugriff 13.11.2018
- (Bokelmann & Hartfeil 2017)** K. Bokelmann; T. Hartfeil; K. Kunkel; M. Binnewies; C. Gellermann; R. Stauber: Neue Methode zur Wert-stoffgewinnung aus primären und sekundären Rohstoffquellen. In: Thomé-Kozmiensky, Goldmann (Hg.) 2017 – Recycling und Rohstoffe, Bd. 10, S. 427–437, letzter Zugriff am 19.07.2018.
- (Böni 2015)** Heinz Böni / Patrick Wägner / Renato Figi, Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung, 2015, http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2015_rur/2015_RuR_443-462_Boeni.pdf, letzter Zugriff am 19.12.2017

- (Bundesnetzagentur 2019a)** Bundesnetzagentur: Statistiken zum Ausschreibungsverfahren für Windenergieanlagen an Land, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Wind_Onshore/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html; letzter Zugriff am 06.03.2019
- (Bundesnetzagentur 2019b)** Bundesnetzagentur: EEG-Registerdaten und -Fördersätze, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html;jsessionid=F3451CA5431874F31A19BFC55D426920; letzter Zugriff am 06.03.2019
- (Bundesregierung o.J.)** Die Bundesregierung (o.J.); verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energiewende-im-ueberblick-229564>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Burkhardt 2017)**A. Burkhardt Projekt ReProMag. Karlsruhe, 2017, verfügbar unter https://www.ressourceneffizienzkongress.de/sites/default/files/2017-10/KONGRESS-BW-17_Forum3_web.pdf, letzter Zugriff am 24.10.2018.
- (Brøndsted & Lilholt 2005)** Brøndsted, Povl; Lilholt, Hans; Lystrup, Aage (2005): COMPOSITE MATERIALS FOR WIND POWER TURBINE BLADES. In: Annu. Rev. Mater. Res. 35 (1), S. 505–538. DOI: 10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.
- (Cherrington et al. 2012)** Cherrington, R.; Goodship, V.; Meredith, J.; Wood, B. M.; Coles, S. R.; Vuillaume, A.; Feito-Boirac, A.; Spee, F.; Kirwan, K. (2012) Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe, Energy Policy, 47, 13–21.
- (CFK Valley Stade)** <http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=27>, letzter Zugriff am 04.01.2018
- (CUTEC 2018)** CUTEC, Redaktion (2018): SEMAREC: Forscher gewinnen Seltene Erden durch Recycling ausgedienter Magneten - BMBF r4-Innovation. Online verfügbar unter <https://www.r4-innovation.de/de/semarec.html>, zuletzt aktualisiert am 16.07.2018, letzter Zugriff am 17.07.2018.
- (DBU 2019)** Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Projektdatenbank – Maschine zum umweltschonenden Rückbau von Spannbetontürmen von Windenergieanlagen, https://www.dbu.de/projekt_34491/01_db_2848.html; letzter Zugriff am 06.03.2019
- (DERA 2016)** Deutsche Rohstoffagentur: “Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016“
- (DIN e.V. 2018)** Deutsches Institut für Normung (2018), verfügbar unter <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/basiswissen>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Dilo 2018)** Reinigung und Aufbereitung von SF₆-Gasmischungen, Dilo GmbH, <https://www.dilo-gmbh.com/produkte/sf6-gashandling/sf6-gasaufbereitung/sf6n2-trennanlage.html>, letzter Zugriff am 04.01.2018
- (Emmerich & Kuppinger 2014)** Rudolf Emmerich / Jan Kuppinger, Kohlenstofffasern wiedergewinnen, 2014, https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/ku/I-PDF%20Fraunhofer%20ICT%20KU_2014_6%20S92.pdf, letzter Zugriff am 15.12.2017
- (EUWID 2018)** EUWID Recycling und Entsorgung (51/52.2018): Großhandelsankaufpreise für Altmetalle und Preisspielgel: Stahlschrott Deutschland, S.17-19
- (Forecycle 2016)** Elisa Seiler: “Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial – ReKomp“; http://www.forcycle.de/sites/default/files/berichte/recycling_von_rotorblattmaterial_aus_windkraftanlagen.pdf; letzter Zugriff am 16.12.2017
- (Fraunhofer 2012)** Fraunhofer-Gesellschaft, Forschung kompakt 10/2012

- (Fraunhofer 2013)** Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aluminiumlegierungen mit Laseranalyse sortieren, https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/jb12/JB12_S126.pdf, letzter Zugriff am 15.12.2017
- (Gaßner/Viezens 2018)** H.Gaßner, L.Viezens (2018): Rechtlicher Rahmen für Recycling und Rückbau von WEA, in Brechen & Sieben, 1.Auflage, November 2018
- (Heinrichs 2018)** S. Heinrichs (2018): Automated LIBS sorting of aluminium alloys. Steinert. SBSC. Aachen, 02.03.2018, letzter Zugriff am 19.07.2018.
- (Hessen Erlass 2013)** Gemeinsamer Erlass des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich (v. 17.10.2011, StAnz. S. 1351, zuletzt geändert am 07.11.2013, StAnz. S. 1454)
- (Holzmüller 2016)** Jürgen Holzmüller: „Weiterbetrieb von Windenergieanlagen“ http://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2016/10/stiftung_umweltenergierecht_vortrag_2016_10_25_windenergieanlagen_holzmuelle_r-1.pdf; letzter Zugriff 09.01.2018
- (Isenburg 2015)** Thomas Isenburg, Recycling von GFK-Giganten, Maschinenmarkt 9/2015, http://www.avk-tv.de/files/pressclip/avk-pc/20150310_recycling_von_gfk-giganten.pdf, letzter Zugriff am 15.12.2017
- (Jarass 2015)** Hans Jarass: Bundesimmissionsschutzgesetz – Kommentar. 11. Auflage München 2015.
- (Jensen 2018)** D. Jensen (März.2018): Keine Luftnummer. In: Entsorga 37, S. 44–45.
- (Kraus 2016)** O. Krauß; T. Werner (2016): Kurzanalyse Nr. 8: Hochwertiges Recycling im Baubereich. Unter Mitarbeit von Dr. N. Becker. 3. Aufl. Berlin: VDI ZRE GmbH, letzter Zugriff am 15.07.2018.
- (Kreibe 2016)** Siegfried Kreibe: „MAI Carbon Nachhaltigkeit: Recycling carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK)“ https://www.baua.de/DE/Angebote/Veranstaltungen/Dokumentationen/Gefahrstoffe/pdf/Vortrag-Innovative-Materialien-2016-10.pdf?__blob=publicationFile&v=2; letzter Zugriff am 13.12.2017
- (Kropp 2010)** Olaf Kropp, „Erzeuger und Besitzer von Bauabfällen“, in: Zeitschrift für Umweltrecht 2010, S. 461.
- (LABO o.J.)** Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), verfügbar unter <https://www.labo-deutschland.de/Startseite.html>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (LAGA o.J.)** Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), verfügbar unter: <https://www.laga-online.de/Startseite-3.html>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (LAI o.J.)** Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI), verfügbar unter: <https://www.lai-immissionsschutz.de/Startseite.html>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Larson & Peterson 2014)** H. Larsen; L. Sonderberg Petersen. (2014): DTU International Energy Report 2014: Wind energy - drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation.
- (LCA G90-2.0)** Gamesa: „Life Cycle Assessment of 1 kWh generated by a Gamesa Onshore Windfarm G90 2.0 MW“ <http://www.siemensgamesa.com/recursos/doc/rsc/compromisos/clientes/certificaciones-ohsas-y-i/informe-analisis-ciclo-de-vida-g90-english.pdf>; letzter Zugriff 17.12.2017
- (LCA V112-3.0)** Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant“ https://www.vestas.com/~/_media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v112_study_report_2011.pdf; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V112-3.3) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.3 MW Wind Plant“

https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/life%20cycle%20assessment_v112-3%203mw_mk2c_version_2_1_210915.pdf; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V117-3.3) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V117-3.3 MW Wind Plant“

<https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lcav11733mwfinal060614.pdf>; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V126-3.3) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V126-3.3 MW Wind Plant“

<https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lcav12633mwfinal060614.pdf>; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V80-2.0) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V80-2.0 Gridstreamer Wind Plant“

https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v802mw_version1.pdf; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V90-2.0) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0 Gridstreamer Wind Plant“

https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v902mw_version1.pdf; letzter Zugriff am 17.12.2017

(LCA V90-3.0) Vestas Wind Systems A/S: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V90-3.0 MW Wind Plant“

https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v903mw_version_1_1.pdf; letzter Zugriff am 17.12.2017

(Li & Englund 2016) Hui Li / Karl Englund, Recycling of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite wastes from the aerospace industry, *Journal of Composite Materials* 51/9: 1265-1273.

(Limburg & Stockschröder 2017a)

M. Limburg; J. Stockschröder; P. Quicker (2017a): Thermal treatment of carbon fibre reinforced polymers. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 77 (5), S. 198–208.

(Limburg & Stockschröder 2017b)

M. Limburg; J. Stockschröder; P. Quicker (2017b): Thermische Behandlung carbonfaserverstärkter Kunststoffe (77), S. 198–208.

(Limburg & Quicker 2016) M. Limburg; P. Quicker (2016): Entsorgung von Carbonfasern - Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung, S. 135–144. DOI: 10.1515/9783110248357-003.

(Mativenga & Shuaib 2016) Mativenga, Paul T.; Shuaib, Norshah A.; Howarth, Jack; Pestalozzi, Fadri; Woidasky, Jörg (2016): High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. In: *CIRP Annals* 65 (1), S. 45–48. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.107.

(Martens 2011) Hans Martens, *Recyclingtechnik*, Heidelberg 2011

(Maslaton 2015) Maslaton, Martin: *Windenergieanlagen – ein Rechtshandbuch*, München 2015.

(Meiners & Eversmann 2014) D. Meiners; B. Eversmann (2014, (2014)): Recycling von Carbonfasern. In: *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 7. Neuruppin: TK (7), S. 371–378. Online verfügbar unter <http://www.vivis.de/fachbuecher/recycling-und-rohstoffe/184-rur7>, letzter Zugriff am 17.07.2018.

- (Milchert 2017)** Lena Milchert, Potentiale und Hemmnisse beim Recycling von Rotorblättern aus Windenergieanlagen. Masterarbeit an der Universität Bremen, 2017
- (Munz 2012)** Munz, Peter (2012): Usancen und Klassifizierungen des Metallhandels. Verband Deutscher Metallhändler e.V. Online verfügbar unter http://www.vdm.berlin/resources/04_Presse/04_Broschueren/2012_Usancen%20des%20Metallhandels_WEB.pdf, letzter Zugriff am 26.07.2018.
- (Netwaste 2018)** Entsorgungstipps Trafoöl, <https://www.wer-entsorgt-was.de/entsorgungstipps/abfall/Trafoel.html>, letzter Zugriff am 05.03.2018
- (NRW Erlass 2015)** Gemeinsamer Runderlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, des Ministeriums für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen sowie der Staatskanzlei des Landes Nordrhein-Westfalen für die Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen und Hinweise für die Zielsetzung und Anwendung (Windenergie-Erlass) vom 04.11.2015.
- (Oliveux & Dandy 2015a)** G. Oliveux; L. Dandy; G. Leeke (2015a): Current status of recycling of fibre reinforced polymers. Review of technologies, reuse and resulting properties. In: Progress in Materials Science 72, S. 61–99. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.
- (Oliveux & Dandy 2015b)** G. Oliveux; L. Dandy; G. Leeke (2015b): Degradation of a model epoxy resin by solvolysis routes. In: Polymer Degradation and Stability 118, S. 96–103. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.016.
- (Panayotova 2012)** Marinela Panayotova / Vladko Panayotov, Review of methods for the rare earth metals recycling, Annual of the University of mining and geology “St. Ivan Rilski” 55/2, 2012.
- (PBnE 2017)** Deutscher Bundestag - Parlamentarischer Beirat für nachhaltige Entwicklung (2017): Impulspapier zur Produktverantwortung im Kontext der Kreislaufwirtschaft, verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/blob/499820/8ae270494012df5f6a547016f072df69/produktverantwortung-im-kontext-der-kreislaufwirtschaft-data.pdf>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Pehlken 2012)** Alexandra Pehlken: „Material Life Cycles in Wind Energy Plants“
- (Pehlken 2017)** Alexandra Pehlken: „Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling“
- (Pestalozzi 2018)** S.F. Pestalozzi: DBU - Stipendiat: Samuel Fadri Pestalozzi | Selektive elektrodynamische Fragmentierung zur Rückgewinnung von Wertstoffen | Stipendien-Datenbank. Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/stipendien_20014/317_db.html, letzter Zugriff am 05.10.2018.
- (Pimenta & Pinho 2011)** S. Pimenta / S.T. Pinho, Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, Waste Management, 31/2: 378–392.
- (Prinçaud & Aymonier 2014)** M. Prinçaud; C. Aymonier; A. Loppinet-Serani; N. Perry; G. Sonnemann (2014): Environmental Feasibility of the Recycling of Carbon Fibers from CFRPs by Solvolysis Using Supercritical Water. In: ACS Sustainable Chem. Eng. 2 (6), S. 1498–1502. DOI: 10.1021/sc500174m.
- (Quicker 2016)** Peter Quicker: „Carbonfasern“ https://www.itad.de/information/studien/160531CFK_Quicker_ITAD.pdf; Aufgerufen am 13.12.2017
- (Rybicka & Tiwari 2016)** J. Rybicka; A. Tiwari; G. Leeke (2016): Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. In: Journal of Cleaner Production 112, S. 1001–1012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.104.

(Resource 2016) Ressourcenschonung – von der Idee zum Handeln, Tagungsband zur Fachtagung im Bayerischen Landtag, 2016. Workshop 5: Faserverbundkunststoffe – Möglichkeiten und Hemmnisse des Ökodesigns und des Recyclings.

(Roux & Eguémann 2016) M. Roux; N. Eguémann; C. Dransfeld; F. Thiébaud; D. Perreux (2016): Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamical fragmentation. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials 30 (3), S. 381–403. DOI: 10.1177/0892705715599431.

(Saeki & Akahori 2014) T. Saeki; T. Akahori; Y. Miyamoto; M. Kyoi; M. Okamoto; T.H. Okabe et al. (2014): Environment-Friendly Recycling Process for Rare Earth Metals in End-of-Life Electric Products. In: Rare Metal Technology, S. 103–106. DOI: 10.1002/9781118888551.ch20.

(Schmidt 2016) K.Schmidt (2016): Die GmbH in Krise, Sanierung und Insolvenz. Otto Schmidt Verlag.

(Schmiedl & Hinrichs 2010) E. Schmidl; S. Hinrichs (2010): Der Kreislauf schließt sich - Fachaufsätze - Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter <https://www.erneuerbareenergien.de/der-kreislauf-schliesst-sich/150/475/28812/>, letzter Zugriff am 15.07.2018.

(Seibert 2019) J.Seibert (2019): Dauerhaft aufgegebene Anlagen: Baurechtswidrigkeit und Rückbaupflichten (Schriften zum Infrastrukturrecht). Mohr Siebeck Verlag

(Seifert & Thome 2014) S. Seifert; V. Thome; C. Karlstetter (2014, (2014)): Elektrodynamische Fragmentierung. In: Recycling und Rohstoffe, Bd. 7. Neuruppin: TK (7), S. 431–438. Online verfügbar unter http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2014_rur/2014_RuR_431_438_Seifert.pdf, letzter Zugriff am 04.10.2018.

(Seiler & Stark 2016) E. Seiler; A. Stark; J. Forberger (2016): Recycling von Textilien aus carbonfaserverstärkten Kunststoff-Bauteilen und deren Produktion. In: Chemie Ingenieur Technik 88 (4), S. 500–505. DOI: 10.1002/cite.201500033.

(Spyra 2010) W. Spyra (2010): Ökologische Prozessbetrachtung - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen). Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung. Unter Mit-arbeit von Dr. A. Mettke und S. Heyn: Brandenburgische Technische Universität Cottbus.

(Technokon) Technokon GmbH: CFKPRO³ Nachnutzung von Rotorblättern aus Windkraftanlagen <https://www.technokon.de/produktbereich-cfk/cfkpro%C2%B3/>, letzter Zugriff am 18.12.2017

(Thome 2018) V. Thome (2018): Blitz, schlag' ein! - Forschung Kompakt Oktober 2012 - Thema 6. Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>, zuletzt aktualisiert am 15.07.2018, letzter Zugriff am 16.07.2018.

(Thome & Karlstetter 2018) V. Thome; K. Karlstetter: Elektrodynamische Fragmentierung. Hg. v. Fraunhofer IBP. Online verfügbar unter https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Informationsmaterial/Abteilungen/BBH/Produktblaetter/IBP_087_PB_Bauchemie_Fragmentierung_03_web_de.pdf, letzter Zugriff am 20.07.2018.

(Thüringer Sprenggesellschaft 2017)

Thüringer Sprenggesellschaft mbH: „Einsatz der modernen Sprengtechnik beim Rückbau von Windenergieanlagen“ http://spreewind.de/windenergiesprengtagung/wp-content/uploads/sites/4/2017/11/26WT0811_F15_1210_Sprenggesellschaft_Hopfe.pdf; letzter Zugriff am 13.12.2017

(UBA 2014a) Altöl, unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallarten/gefaehrliche-abfaelle/altoel>, letzter Zugriff am 4.1.2018

- (UBA 2014b)** Umweltbundesamt (2014). Best Practice Municipal Waste Management. <http://www.umweltbundesamt.de/informationssammlung-best-practice-municipal-waste>; letzter Zugriff am 05.03.2018.
- (UBA 2016)** Umweltbundesamt (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Ein-satzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Umweltbundesamt (65), letzter Zugriff am 17.07.2018.
- (UBA 2018) Umweltbundesamt (2018): Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Altbatterien. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien> letzter Zugriff am 13.05.2019
- (UMK o.J.)** Umweltministerkonferenz (UMK), verfügbar unter: <https://www.umweltministerkonferenz.de/Startseite.html>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Umsicht 2017)** Fraunhofer Umischt: „Studie zur Circular Economy in Hinblick auf die chemische Industrie“ <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/170728-vci-circular-economy-final-gesamtstudie.pdf>; letzter Zugriff am 13.12.2017
- (VEOLIA 2017)** Veolia Umweltservice GmbH: „Rotorblätter entsorgen? Vergraben ist auch keine Lösung!“ http://spreewind.de/windenergetage/wp-content/uploads/sites/4/2017/11/26WT0811_F15_1120_VEOLIA.pdf; letzter Zugriff am 13.12.2017
- (VDE 2007)** Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2007): Dezentrale Energieversorgung 2020, verfügbar unter <https://www.vde.com/resource/blob/792808/db366b86af491989fcd2c6ba6c6f21ad/etg-studie-dezentrale-energieversorgung2020-komplette-studie-data.pdf>; letzter Zugriff am 13.11.2018
- (Weis 2018)** A. Weiß / H.M. Ludwig, Aufschluss von Betonen und anderen Verbundbaustoffen durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen. In: Thomé-Kozmiensky, Goldmann (Hg.) 2017 – Recycling und Rohstoffe, Bd. 9, S. 230–241 letzter Zugriff am 20.07.2018.
- (Weißhaupt 2018)** P. Weißhaupt (2018): Abfallbehandlung carbonfaserverstärkter Kunststoffe, In T. Krampitz, M. Zöllner, H. Lieberwirth: Aufbereitung und Verwertung kohlenstofffaserverstärkter Abfälle, 5. FOREL Akademie im Rahmen des 69. Berg- und Hüttenmännischen Tages 2018, Freiburger Forschungshefte, Technische Universität Freiberg, ISBN 978-3-86012-588-5. siehe auch P. Weißhaupt (2017b): Abfallbehandlung carbonfaserverstärkter Kunststoffe. Umweltbundesamt, 28.09.2017. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj72bDc-a3cAhXH2CwKHTgDCIYQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.carbon-connected.de%2FGroup%2FMAI.UCB%2FDokumente%2FFile%2FDownload%2FB44E16202F1E4A49B2039C95CF5702D6&usg=AOvVaw1ujsym5FBID8GWN11nJ52U>, letzter Zugriff am 20.07.2018.
- (Wieberneit 2015)** J. Wieberneit (2015): Erfassung und Verwertung von Windenergieanlagen. Bachelor. Hochschule Rhein-Main, Wiesbaden Rüsselsheim.
- (WindGuard 2016)** Deutsche WindGuard: „Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020“ <http://www.windguard.de/Resources/Persistent/58833807034c2efc02a1944c7eb61db774a853d8/Weiterbetrieb-von-WEA-nach-2020-kor2.pdf>; letzter Zugriff am 13.12.2017
- (WindGuard 2017)** Deutsche WindGuard: „Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Gesamtjahr 2017“ <http://www.windguard.de/Resources/Persistent/23f0cbcd629af2a24f59e562abbf0d2a936d3abb/Factsheet-Status-Windenergieausbau-an-Land-2017.pdf>; letzter Zugriff am 13.12.2017
- (WP Systems 2019)** WP Systems: „Kranloser Rückbau. Direkt am hängenden Blatt.“ <https://windpowersystems.de/rueckbau-rotorblatt/>; letzter Zugriff am 06.03.2019