

08.21

# Müll und Abfall

Fachzeitschrift  
für Kreislauf-  
und Ressourcen-  
wirtschaft

53. Jahrgang  
August 2021  
Seite 417-480

[www.MUELLundABFALL.de](http://www.MUELLundABFALL.de)

**AK GWS**  
ARBEITSKREIS GRUNDWASSERSCHUTZ e.V.

ÜBERWACHUNGS  
GEMEINSCHAFT  
**U**  
BAUEN FÜR DEN  
UMWELTSCHUTZ

Ingenieurgesellschaft  
Prof. Czurda und  
Partner mbH  
**ICP**  
Geologen und Ingenieure  
für Wasser und Boden

## 31. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar 2021

ABSCHLUSS UND REKULTIVIERUNG VON DEPONIEEN UND ALTLASTEN – PLANUNG UND BAU NEUER DEPONIEEN

**20. und 21. Oktober 2021**

Vor Ort:  
**Gartenhalle (Kongresszentrum)**  
Festplatz 9, 76137 Karlsruhe

Seminar und Fachausstellung  
als Hybridveranstaltung  
(vor Ort und digital)

Abendveranstaltung vor Ort  
(nach geltenden Corona-Bedingungen)

**Programm unter:**  
<https://icp-ing.de/seminare/>

- Veränderungen bei der Deponierung von Abfällen
- Deponie auf Deponie
- Landschaftsbauwerke statt Deponien?
- Freimessung mineralischer Kernkraftwerksabfälle zur Entsorgung
- Digitalisierung des Deponiebetriebs
- Einsatz von Ersatzbaustoffen
- Entsorgung asbesthaltiger Bauschutt
- Klimaschutzmaßnahmen auf Deponien
- neue Abfallgesetzgebung
- Untertagedeponien



# RecycleWind – Konzept eines Verwertungsnetzwerks für langlebige komplexe Produkte unter Berücksichtigung von Betreiber- und Herstellerverantwortungen am Beispiel von Windenergieanlagen

RecycleWind – Concept of a Recycling network for long-life complex products in consideration of operator and producer responsibility using the example of wind turbines

Prof. Dr.-Ing. Henning Albers, Dr. Frauke Germer, Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg, Tobias Brinkmann, Philippe Spring und Dr. Torben Stührmann

## Prof. Dr.-Ing.

### Henning Albers

Bis 2019 Professor an der Hochschule Bremen, Lehr- und Forschungsgebiet „Kreislauf- und Abfallwirtschaft“

### Dr. Frauke Germer

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Fachgebiete: Kreislaufwirtschaft und Erneuerbare Energien an der Hochschule Bremen

### Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg

Projektleiter „Recycle Wind“ beim Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH

### Tobias Brinkmann

Geschäftsführer und Leiter des Bereichs Ökobilanzierung bei der brands & values GmbH

### Philippe Spring

Entwicklungsingenieur für WEA-Rotorblattstrukturen und Materialtechnologie bei TPI Composites Germany GmbH

### Dr. Torben Stührmann

Kommissarischer Teamleiter des Fachgebietes Resiliente Energiesysteme an der Universität Bremen

## Zusammenfassung

Gerade bei langlebigen Produkten stellen sich die entscheidenden Fragen zur fachgerechten Umsetzung und Sicherstellung der Verwertungsziele des Kreislaufwirtschaftsgesetzes oft erst nach Jahrzehnten. Am Beispiel von Windenergieanlagen soll gezeigt werden, wie ein dafür sinnvolles Verwertungsnetzwerk gestaltet werden kann. Dabei wird der Fokus nicht nur auf die technischen Punkte gelegt, sondern es werden in einem sozio-technischen Ansatz auch organisatorische Aspekte sowie Verhaltensmuster der Akteure betrachtet.

Die Schwerpunkte des Projekts liegen in der Erforschung und Entwicklung von wissenschaftlich abgesicherten Methoden zur Selbststeuerung von Akteuren in Stoffstromsystemen, der Simulation von möglichen Anwendungen und der Konzeptentwicklung von geeigneten Strukturen eines derartigen Netzwerkes.

Ziel und Inhalt dieses Artikels ist die Darstellung der bisherigen Ergebnisse des Projektes RecycleWind 1.0, die in dem aktuell laufenden Folgeprojekt RecycleWind 2.0 (8/2020 bis 1/2022) weiter vertieft und zur Umsetzungsreife gebracht werden sollen. Dazu werden zunächst die Vorgehensweise im Projekt erläutert und die erarbeiteten Tools dargestellt.

Auf Basis dieser Grundlagen werden Ansätze für eine standardisierte, um die Recyclingaspekte erweiterte Umweltproduktdeklaration (EPD-plus) beschrieben und eine Gütegemeinschaft als Organisation zur gemeinsamen Wahrnehmung der Verantwortlichkeiten durch die Betreiber und Hersteller für das Produktsystem „Windenergieanlage“ entworfen.

## Abstract

Particularly in the case of durable products, the decisive questions regarding the proper implementation and securing of the recycling targets of the „Closed Substance Cycle Waste Management Act“ often only arise after decades. The example of wind turbines will be used to show how a sensible recycling network can be designed for this purpose. The focus will not only be on the technical aspects, but also on organisational aspects and the behavioural patterns of the players in a sociotechnical approach.

The project focuses on the research and development of scientifically validated methods for self-control in material flow systems, the simulation of possible applications and the concept development of suitable structures of such a network.

The aim and content of this article is to present the results to date of the RecycleWind 1.0 project, which are to be further deepened and brought to implementation maturity in the currently running follow-up project RecycleWind 2.0 (8/2020 to 1/2022). To this end, the approach taken in the project is first explained and the tools developed are presented.

On the basis of these fundamentals, approaches for a standardized environmental product declaration (EPD-plus), extended to include recycling aspects, are described and a quality association is designed as an organization for the joint perception of responsibilities by operators and manufacturers for the product system „wind turbine“.

## 1. Einleitung

Das Gesamtziel des Vorhabens „Verwertungsnetzwerk RecycleWind – resilient und selbstlernend“ ist die Konzeption und Anwendungssimulation eines Verwertungsnetzwerks zur ressourcenschonenden Lenkung der Stoffströme langlebiger Produkte am Beispiel von Windenergieanlagen.

Dieses Ziel stellt insbesondere bei langlebigen Produkten und Altanlagen eine Herausforderung dar, weil deren stoffliche Zusammensetzung oft nicht ausreichend dokumentiert ist. Ein auf ein Recycling abgestimmtes Produktdesign wird kaum praktiziert. Zudem sind gerade bei langlebigen Produkten zum Zeitpunkt der Herstellung Entwicklungen der Recyclingtechnologien im Laufe des Produktlebens nicht absehbar, so dass ein darauf abgestimmtes Produktdesign nur eingeschränkt möglich ist.

Die Anforderungen an das Verwertungsnetzwerk lassen sich wie folgt beschreiben:

- ◆ Die Akteure in dem Verwertungsnetzwerk sollen in der Lage sein, die Stoffströme bei einem Rückbau von Windenergieanlagen (Stilllegung oder Repowering) ressourcenschonend und soweit möglich im Kreislauf zu halten und sie so zu lenken, dass eine möglichst hochwertige Verwertung möglich wird. Sie entwickeln und vereinbaren Festlegungen von Standards innerhalb des Netzwerks auf der Basis von einvernehmlich definierten Grundsätzen und passen sie selbständig an Veränderungen an (selbstlernend). Dabei stützen sie sich auf den bewussten Umgang mit Unsicherheit/Komplexität, d. h. auch bei Änderungen von Rahmenbedingungen und Stresssituationen gesicherte und ausreichend flexible Herangehensweisen zur Sicherstellung eines hochwertigen Recyclings (resilient).

- ◆ Das Verwertungsnetzwerk besteht somit zwingend aus zwei verknüpften Elementen: dem technischen Verwertungssystem aus ressourcenrelevanten Prozessen und Stoffströmen und dem Akteursnetzwerk (sozio-technischer Ansatz).

Dieser sozio-technische Ansatz geht davon aus, dass sich Stoffströme als Ergebnis einer Vielzahl an Interaktionsprozessen zwischen den beteiligten Akteuren des Produktsystems ergeben. Umgekehrt wird auch das Verhalten der Akteure durch Stoffströme gesteuert [Wulf 2018]. Dadurch soll in stärkerem Maß das gemeinsame Akteursverständnis für ein hochwertiges Recycling in den Vordergrund gerückt werden, anstelle einer eher langwierigen und nachlaufenden Anpassung von Quoten und/oder Vorgaben zum Produktdesign durch den Gesetzgeber. Die Anreize zur Verwertung ergeben sich dabei aus aktuellen Marktbedingungen und Akteurskonstellationen sowie den Festlegungen aus

- ◆ der Betreiberverantwortung der Windpark-eigentümer (BImSchG),
- ◆ der erweiterten Herstellerverantwortung (KrWG),
- ◆ der Nachhaltigkeitspolitik der beteiligten Unternehmen

## 2. Grundlagen und Methodenentwicklung für das Konzept RecycleWind

Für die Erarbeitung des Konzeptes RecycleWind wurde der Fokus zunächst auf die als schwierig zu recycelnden bzw. anderweitig zu entsorgenden Rotorblätter gelegt. Hier sollen Hemmnisse anhand der aktuellen Strukturen der Verwertungstechnologien und der Akteure sichtbar gemacht und daraus Lösungen für das gesamte Produktsystem erarbeitet werden.

### 2.1 Ausgangslage bei den Rotorblättern

Die Rotorblätter sowie die Verkleidungen der Nabe und der Gondel bestehen vorwiegend aus Faserverbundkunststoffen (FVK), hauptsächlich glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) auf Epoxidharzmatrix. Diese sind nicht wie Thermoplaste durch Wärmezufuhr wieder verformbar oder als Regranulat zur Primärmaterialezeugung nutzbar.

Bei der Verbrennung von Monochargen an GFK in der klassischen Müllverbrennung kommt es unter Umständen zu Störungen durch auftretende „Gewölle“, die Rauchgassysteme bzw. Filter zusetzen können [Pehlken et al. 2017]. Somit ist in der Regel die energetische Verwertung in großtechnischen Feuerungsanlagen keine nutzbare Option.

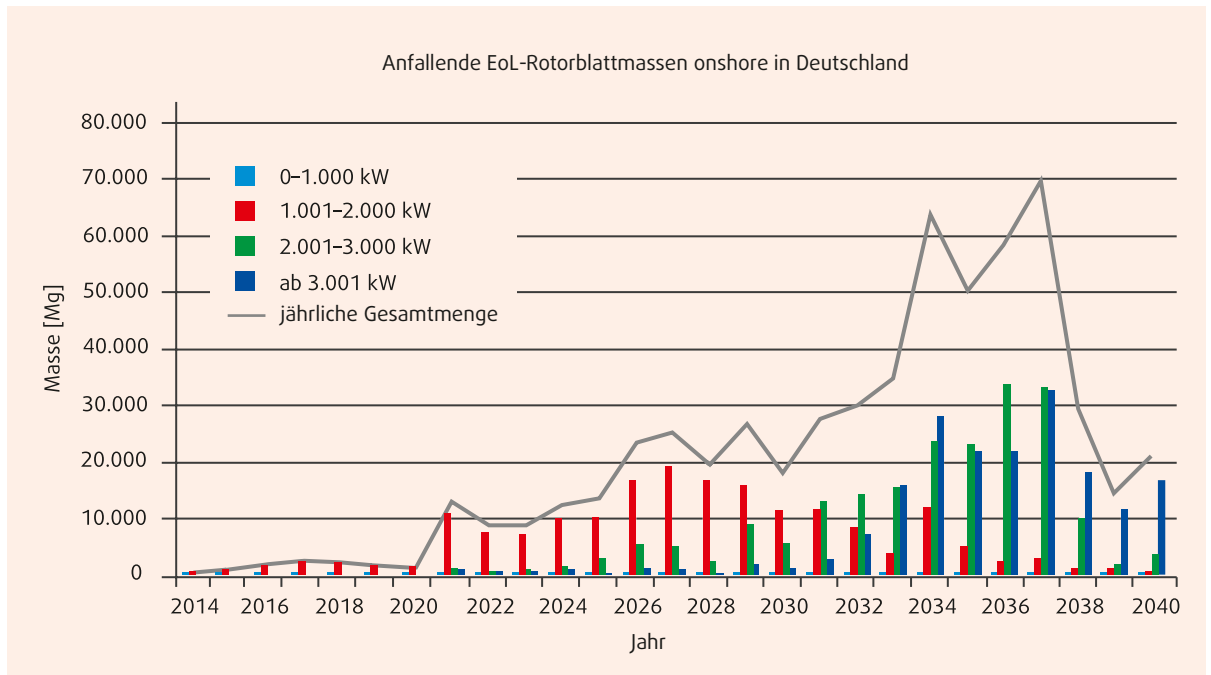
Das Verfahren nach dem Stand der Technik zur Verwertung der GFK-Komponenten von Windenergieanlagen ist heute die Zerkleinerung und die Zuführung zu einem Zementwerk. Bis zu 60 Gew.-% Glas in den GFK-Abfällen der Windenergieanlagen ersetzen als Siliziumträger beim Zementwerk den Einsatz von Quarzsand. Der Kunststoffanteil wird energetisch im gleichen Prozess verwertet. Aufgrund der jeweilig sehr spezifischen Versorgungssituation der Zementwerke mit Primärrohstoffen aus ihren regionalen Lagerstätten besteht allerdings nur bei sehr wenigen Zementwerken in Deutschland Bedarf an dem Einsatz von glas-haltigen Abfällen als Sekundärrohstoffe [Baier 2020].

Durch die Zunahme der Anlagengrößen und der installierten Leistungen kommen sowohl onshore als auch offshore vermehrt zusätzlich carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit noch besseren Materialeigenschaften bezüglich Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte zum Einsatz.

Carbonfasern (CF) stehen im Verdacht, bei Hochtemperaturprozessen wie bei der Verbrennung in Müllheizkraftwerken (MHKW) oder Sondermüllverbrennungsanlagen als auch im Zementwerk lungengängige, sogenannte WHO-Fasern bilden zu können, die wie Asbest cancerogene Wirkungen entfalten könnten. Hierzu finden aktuell noch Studien statt [Stapf 2019 und Bäger et al. 2019]. Zudem sind Produkte und auch Abfälle mit Carbonfasern (CF) elektrisch leitend, dies führt u. a. zum Ausfall von Elektrofiltern bei der Staubabscheidung von MHKW [Limburg, Quicker 2016].

Das Recycling dieser Carbonfasern aus CFK-Bauteilen ist heute großtechnisch über die Pyrolyse möglich. Die gewonnenen Fasern unterscheiden sich von der Ursprungsfaser insbesondere in der Länge und enthalten keine Schlichte mehr. Sie können als Faser zu neuen Vliesen verarbeitet oder auch gemahlen im Spritzguss verwendet werden [Henning et al. 2019]. Ein größerer

Abbildung 1  
Abschätzung des Massenaufkommens an End-of-Life (EoL)-Rotorblättern in Deutschland auf Basis der installierten Onshore-Anlagen (siehe Kap. 2.2.1)



Markt für derartige Sekundär-Carbonfasern (rCF) hat sich allerdings noch nicht entwickelt, so dass großtechnische Umsetzungen, insbesondere auch aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der Carbonfasern und der damit verbundenen besonderen Ansprüche an den Apparatebau und die Maschinenteknik, weitgehend noch fehlen.

Abbildung 1 zeigt die ab 2020 steigenden EoL-Materialmassen aus Rotorblättern der unterschiedlichen Leistungsklassen der Windenergieanlagen an Land unter folgenden Annahmen:

- ◆ zum Repowering (nach 15 Jahren Laufzeit für Anlagen < 1 MW<sub>el</sub> 60%; Anlagen 1–2 MW<sub>el</sub> 10%)
- ◆ zum Second-Life (bei Anlagen < 1 MW<sub>el</sub> 90%; Anlagen 1–2 MW<sub>el</sub> 10%)

- ◆ zu den Laufzeiten (Anlagen < 2 MW<sub>el</sub> 65% mit 25 Jahren, 35% mit 20 Jahren; alle anderen Anlagengrößen mit 20 Jahren Laufzeit).

Aus dem Rückbau von Offshore-WEA werden ab ca. 2030 zusätzlich zu den hier dargestellten Massen rd. 6000–7000 Mg/a an EoL-Rotorblättern zu erwarten sein.

Um den Aufgaben zur Entsorgung dieser Mengen in einer Kreislaufwirtschaft gerecht werden zu können, bedarf es sowohl einer Anpassung der technischen Verwertungssysteme als auch das Zusammenwirken aller betroffenen Akteure miteinander.

### 2.2 Basistools für das Konzept

Ein Verwertungssystem in Form eines Netzwerkes muss eindeutig, transparent und nachvollziehbar be-

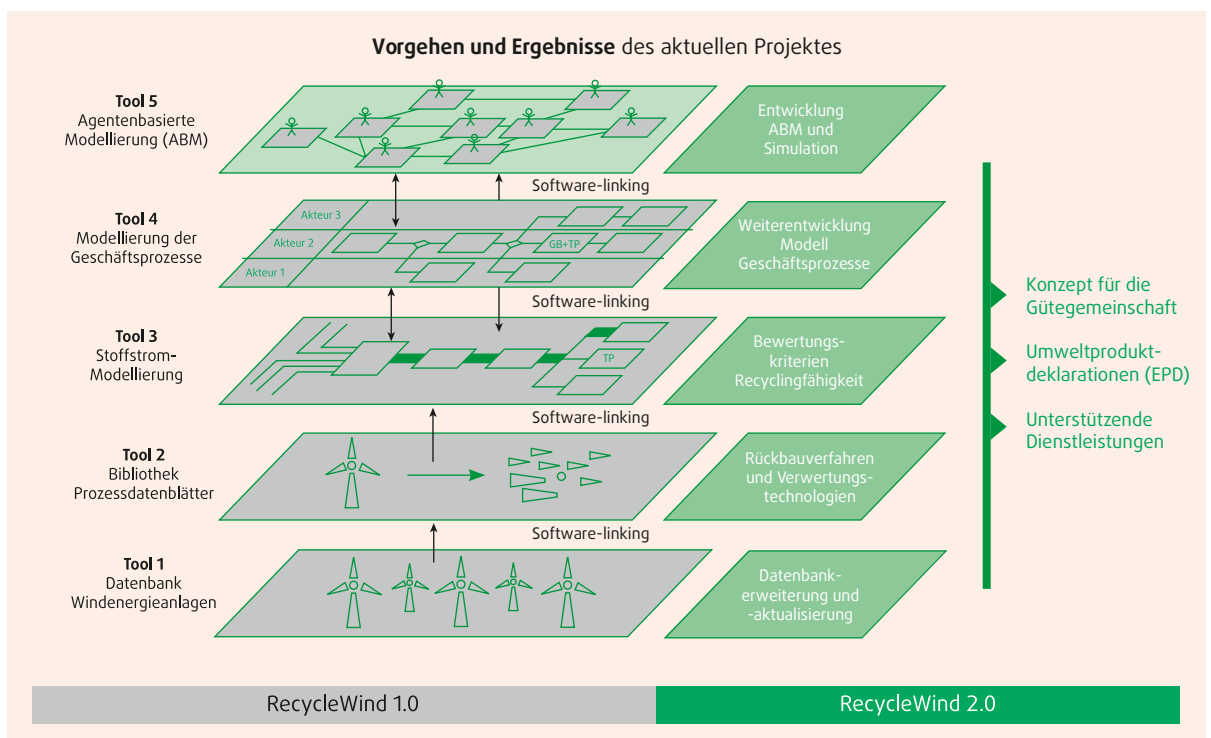


Abbildung 2  
Arbeitselemente (Tools) für das Konzept eines Verwertungsnetzwerks im Vorhaben RecycleWind

geschrieben werden können. Das gilt sowohl für die verwendeten technischen Prozesse als auch für die Geschäftsprozesse der beteiligten Akteure. Der Fokus liegt hier besonders auf den ressourcenrelevanten Prozessen. Zur Konzeptfindung wurden deshalb folgende Tools erarbeitet und in Softwarelösungen genutzt:

Analyse, Beschreibung und Dokumentation der Produkt- und Verwertungssysteme:

- ◆ Tool 1: Massen der Bauteile und Materialien des Produktsystems Windenergieanlage [Erstellung einer WEA-Bestandsdatenbank RecycleWind]
- ◆ Tool 2: Rückbauverfahren und Verwertungswege/-technologien [Erstellung von Prozessdatenblättern für Rückbau-, Erstbehandlungs- und Entsorgungsverfahren]
- ◆ Tool 3: Materialspezifische Stoffstrommodellierungen [Erstellung von Sankey-Diagrammen] inklusive ökobilanzieller Bewertungen der Entsorgungswege

Analyse, Beschreibung und Dokumentation des Akteursnetzwerks:

- ◆ Tool 4: Modellierung der Prozessketten der wesentlichen Akteure entlang des gesamten Produktlebensweges mit Aufgaben, Einflüssen, Verantwortlichkeiten, Interaktionen der Akteure und Handlungsoptionen [Darstellung von Geschäftsprozessmodellen mittels Business Process Model and Notation (BPMN)]
- ◆ Tool 5: Computerunterstützte Simulation zur Abbildung und Visualisierung des Akteursverhaltens und daraus resultierender Stoffströme [Erstellung einer agentenbasierten Modellierung (ABM)]

Abbildung 2 zeigt die strukturelle Verknüpfung der einzelnen Tools und gibt an, dass bisher nur ein Teil der konzeptionellen Überlegungen umgesetzt werden konnte. Neben der Anpassung und Detailierung der Tools 1 bis 4 wird das Tool 5, die agentenbasierte Modellierung, erst im laufenden Vorhaben RecycleWind 2.0 umgesetzt.

Die Tools werden als grundlegende Arbeitsmittel für das zu konzipierende Verwertungsnetzwerk in Form einer Gütegemeinschaft benötigt.

Die Grundlagen und Erkenntnisse zu den Tools werden nachstehend beschrieben.

### 2.2.1 Tool 1: Massen der Bauteile und Materialien des Produktsystems Windenergieanlage

In einem Verwertungssystem müssen der Produkt- und Materialbestand im Produktstatus bekannt sein, um sowohl die eingehenden Materialien als auch die ausgehenden Materialien als wiederverwendungsfähige Produkte oder als Abfall in der Rangfolge des Kreislaufwirtschaftsgesetzes in Form von Stoffflüssen beschreiben zu können.

Zur Abschätzung der Massen und der zu erwartenden Stoffströme ist auf Basis der onshore installierten Anlagen in Deutschland eine Excel-Bestandsdatenbank RecycleWind erstellt worden. Wie eingangs in Kap. 2 dargelegt, wird zur Modellentwicklung des Verwertungsnetzwerkes für Windenergieanlagen in diesem Vorhaben das Recycling von Rotorblättern fokussiert. Strukturell ist eine Erweiterung auf andere Hauptkomponenten angelegt. Jährlich findet ein Update der Bestandsdatenbank über das Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur statt.

In der Bestandsdatenbank RecycleWind sind der Anlagentyp mit den jeweiligen elektrischen Leistungen und den Rotordurchmessern sowie Angaben zum Aufstellort (Postleitzahl PLZ) und Zuordnung zu den Bundesländern erfasst, sodass hierüber Auswertungen für jedes Bundesland getrennt dargestellt werden können.

In Zusammenarbeit mit dem Rotorblatthersteller TPI Composites Germany GmbH (ehemals EUROS Entwicklungsgesellschaft für Windkraftanlagen mbH) und durch weiterführende Recherchen erfolgten

- a) Trendaussagen zu den Rotorblattmassen in Abhängigkeit von den Rotordurchmessern
- b) Zuordnungen von Rotorblättern mit Carbon-Gurten (GFK/CFK) anhand der Anlagentypen der WEA
- c) Trendaussagen über die Materialzusammensetzung für „GFK/CFK“- und „GFK“-Rotorblätter.

Die ersten Abschätzungen bei den Trendaussagen zu Rotorblattmassen und zu den Materialzusammensetzungen „GFK/CFK“ und „GFK“ werden laufend durch zusätzliche verfügbare Daten realer Rotorblatttypen ergänzt.

In Tabelle 1 sind die derzeit angenommenen prozentualen Materialzusammensetzungen für „GFK/CFK“- und „GFK“-Rotorblätter dargestellt. Aufgrund der zurzeit nur geringen Detaildatenbasis für Rotorblät-

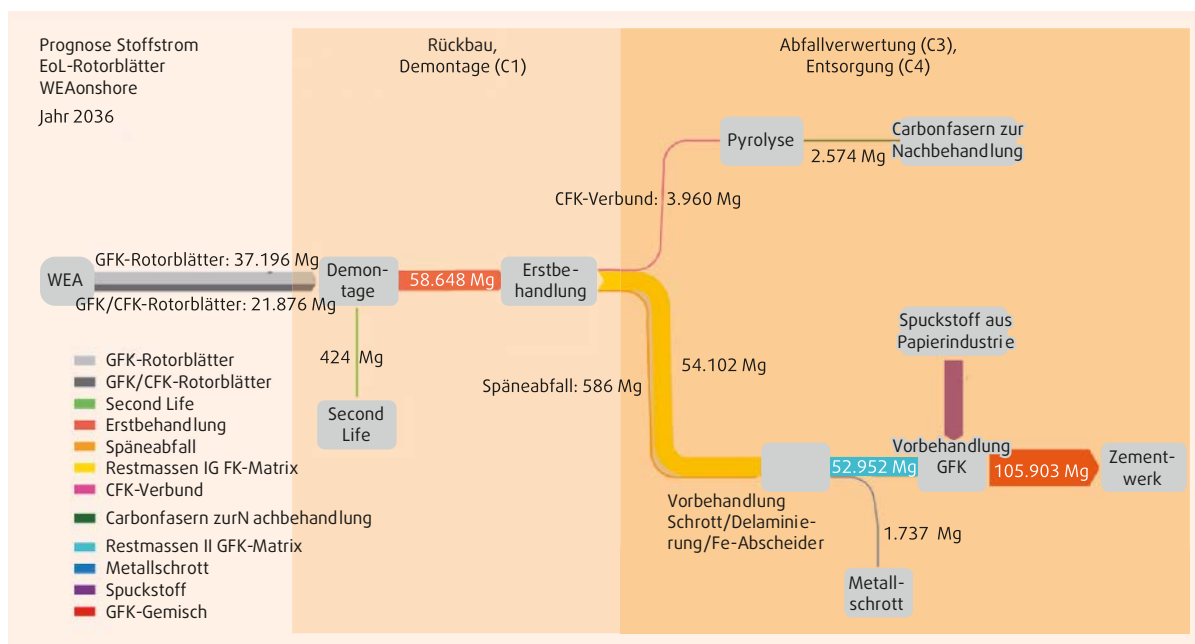
Datenbasis	2 Anlagen	3 Anlagen	4 Anlagen	1 Anlage	1 Anlage	1 Anlage
Blatttyp	GFK	GFK	GFK	GFK/CFK	GFK/CFK	GFK/CFK
MW-Leistungsklasse	< 1 MW	1-2 MW	3 MW	2 MW	2,7 MW*)	7 MW **)
Blattlänge [m]	29	37	57	44	70	81,6
Masse [Mg]	3	6,3	14	6,3	12	32,8
Carbonfasern [Gew. %]	0	0	0	9,5	11	12,6
Glasfasern [Gew. %]	50	52	56	38,4	41	40,9
Harz inkl. Härter [Gew. %]	38	35	32,5	39,6	34	33,3
Hartschaum [Gew. %]	4	6	0,7	3,8	0,7	0,4
Balsaholz [Gew. %]	0	1,1	6	0	8	8,2
PU-Beschichtung [Gew. %]	3,5	2,3	1,2	3,6	1,5	0,7
Blitzschutzkabel [Gew. %]	0,3	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5
Stahl(-bolzen) [Gew. %]	4	3	2,8	4,7	3	3,2
Verschiedenes [Gew. %]	0,2	0,2	0,7	0,1	0,2	0,2

Tabelle 1  
Abschätzung zur prozentualen Materialzusammensetzung für „GFK/CFK“ und „GFK“-Rotorblätter, gestaffelt nach Leistungsklassen in MW<sub>el</sub>

\*) = Daten für Anlage an einem Schwachwindstandort  
 \*\*) = Daten für Offshore-Anlage  
 „GFK/CFK“ = Rotorblätter mit Carbon  
 „GFK“ = Rotorblätter ohne Carbon

## RECYCLING | WINDENERGIEANLAGEN

Abbildung 3  
**Prognose zum Abfallaufkommen und den Stoffströmen Rotorblätter Onshore beispielhaft für das Jahr 2036 mit dem Stand der Technik der Entsorgungsstrukturen 2021**



ter (insgesamt 12 Blatttypen) können diese Angaben nur als eine erste Trendaussage dienen. Als Kernmaterial kommen Balsaholz und strukturelle, geschlossenzellige Hartschaumkerne aus Kunststoff, z. B. aus PET, zum Einsatz.

Diese Vorgehensweise ermöglicht neben Prognosen zur Gesamtmasse eine materialspezifische Auswertung für die Prognose der anfallenden End-of-Life-Rotorblätter.

### 2.2.2 Tool 2: Rückbauverfahren und Verwertungswege/-technologien

Mittels Marktrecherche, Kontaktaufnahme zu den Akteuren und qualitativen Experteninterviews werden die notwendigen Informationen zusammengetragen. Diese unterliegen einer laufenden Anpassung, insbesondere durch neue Marktteilnehmer und -technologien als auch zu neuen Kenntnissen über Stoffflüsse bei den Behandlungsverfahren (u. a. Sortierreste, Rückstände).

Hierfür werden Prozessdatenblätter erstellt, um die Massen- und Energiemengen im In- und Output der Prozesse des Rückbaus, der Demontage, der Erstbehandlung und der Aufbereitungs- und Entsorgungswege erfassen zu können. Die erfassten Daten sind Grundlage für die Stoffstrommodellierungen (siehe Kap. 2.2.3) und für die Lebenszyklusanalysen (siehe Kap. 3.1)

### 2.2.3 Tool 3: Materialspezifische Stoffstrommodellierungen

Auf Basis des derzeitigen Stands der Technik der Verwertungsstrukturen und den ermittelten Daten zu Massenflüssen beim Rückbau werden Stoffflussmodelle in Form von Sankey-Diagrammen erstellt.

Mit den Stoffstrom-Modellierungen lassen sich Auswirkungen von Änderungen bzw. verschiedene Optionen bei den Verwertungsstrukturen schnell abbilden und hinsichtlich notwendiger Kapazitäten bewerten. Darüber hinaus dienen diese Sankey-Visualisierungen als Grundlage für weiterführende Auswertungen von Lebenszyklusanalysen (siehe Kap. 3.1).

In Abbildung 3 sind beispielhaft für das Jahr 2036 die prognostizierten Abfallstoffströme von EoL-Rotorblättern Onshore als Sankey-Diagramm auf Basis der derzeitigen Vorbehandlungs- und Verwertungswege dargestellt. Basis sind der Gesamtbestand der WEA Onshore gemäß der oben erwähnten Datenbank und die geschätzte stoffliche Zusammensetzung, getrennt nach „GFK“- und „GFK/CFK“-Blättern.

Die Darstellung für das Jahr 2036 weist einen Bedarf an Behandlungskapazitäten zur Verwertung allein für die CFK-Komponenten der onshore EoL-Rotorblätter (CFK-Gurtmaterialien) von rd. 3960 Mg aus. Die einzige zurzeit in Deutschland für die Behandlung derartiger Abfälle vorhandene Pyrolyse hat eine Kapazität von derzeit rd. 1000 Mg/a [Rademacker 2021]. Zu berücksichtigen ist ferner, dass zu diesem Zeitpunkt jährlich weitere CFK-Abfälle, z. B. aus dem WEA Offshore-Bereich (siehe Kap. 2.1) oder aus der Behandlung von Altfahrzeugen in Deutschland anfallen [Faulstich et al. 2016]. Zusätzlich werden an Produktionsabfällen für Deutschland rd. 5000 Mg/a prognostiziert [CarboNXT GmbH 2019]. Hiermit wird das derzeitige Defizit an Behandlungskapazitäten zur Verwertung für CFK-Abfälle in Deutschland und der damit verbundene Handlungsbedarf aufgezeigt.

Derartige Darstellungen und Auswertungen dienen als Grundlage einer zukünftigen Diskussion und Lösungsfindung innerhalb der vorgeschlagenen Gütegemeinschaft (siehe Kap. 3.2).

### 2.2.4 Tool 4: Beschreibung des Akteursnetzwerks und Darstellung mittels BPMN

Mit diesem softwarebasierten Tool auf der Basis der Geschäftsprozessmodellierungssprache BPMN (= Business Process Model and Notation) werden folgende Aufgaben umgesetzt:

- ◆ Identifizierung relevanter Akteure der ressourcenrelevanten Prozessketten entlang des gesamten Lebensweges von Rotorblättern
- ◆ Erfassung von Aufgaben, Einflüssen, Verantwortlichkeiten und Interaktionen der Akteure

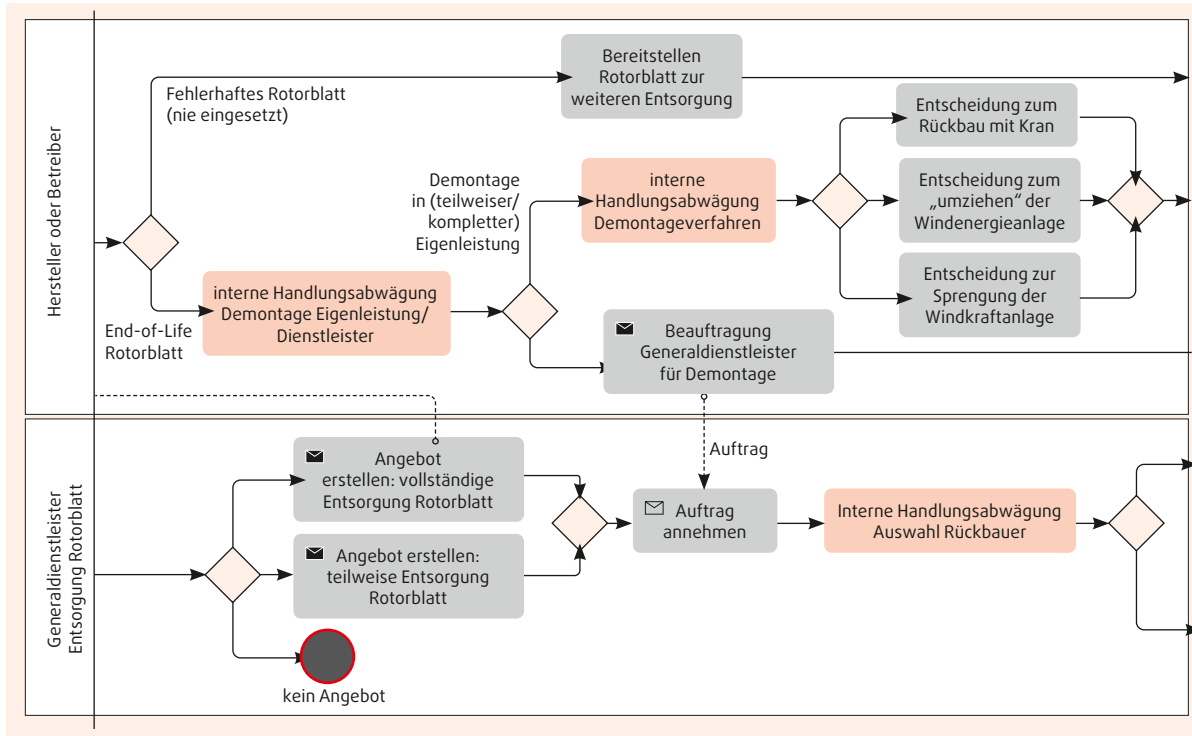


Abbildung 4 Ausschnitt aus der Darstellung der ressourcenrelevanten Geschäftsprozesse bei der Demontage von Rotorblättern mittels BPMN (Business Process Model and Notation), Softwarelösung von intellivate GmbH, Hamburg

- ◆ Aufzeigen von Handlungsoptionen in Bezug auf die ressourcenrelevanten Prozesse
- ◆ Strukturierte Darstellung der Prozessketten in sogenannten „swim lanes“

Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen Prozessabschnitt, modelliert mit BPMN. Die ressourcenrelevanten Geschäftsprozesse und die damit verbundenen technischen Prozesse werden graphisch miteinander in Beziehung gebracht, den Akteuren zugeordnet und in eine Abfolge gebracht. Als ein entscheidendes Hemmnis zur Erzielung einer hochwertigen Verwertung wie beispielsweise des Recyclings von wesentlichen Materialien der Rotorblätter wie Glasfasern, Balsaholz und Kunststoffschäumen stellte sich die bisher fehlende Kommunikation und Interaktion der Akteure aus den unterschiedlichen Betrachtungsebenen heraus. Dieser Befund ist auch aus anderen Produktbereichen wie beispielsweise Verpackungs- und Elektrogeräteabfällen bekannt [Kreibe et al. 2016; Clemm, Lang 2019].

Abbildung 4 zeigt, dass sich diese oft fehlenden Verknüpfungen in einem BPMN-Modell sehr anschaulich auffinden und darstellen lassen. Jeder Akteur erhält eine sogenannte „swim lane“, in der die Abfolge seiner eigenen Prozesse dargestellt ist. Die Schnittstellen zu anderen Akteuren sind immer die Prozessverknüpfungen zwischen mehreren „swim lanes“.

In der BPMN-Prozessdarstellung wird offensichtlich, an welchen Stellen in den Prozessketten stoffstromrelevante Entscheidungen getroffen werden (gekennzeichnet durch Gabelung der Prozesse).

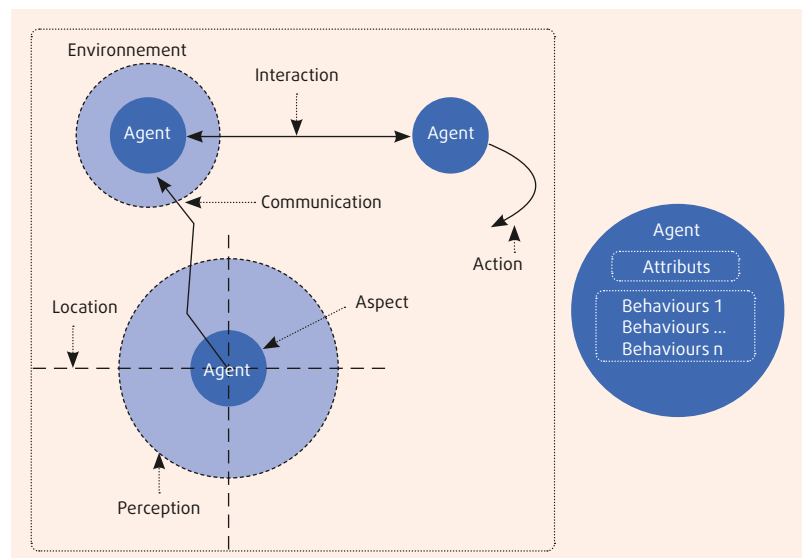
Die BPMN-Darstellung bietet zudem einen Überblick darüber, von welchen Akteuren und in welchen Prozessen wichtige Informationen (wie Datenblätter, Konstruktionszeichnungen, Wiegescheine ...) generiert werden und an welchen Stellen diese Informationen wiederum benötigt werden. Sie ist ein wichtiges Hilfsmittel zum Aufbau von resilienten Prozessstrukturen. Die Aufnahme und die Beschreibung der Akteure mit

deren Handlungsoptionen ist Grundlage für eine agentenbasierte Modellierung (siehe Kap. 2.2.5).

### 2.2.5 Tool 5: Beschreibung des Akteursverhalten durch die Agentenbasierte Modellierung

Im Rahmen von RecycleWind sollen erstmalig Gestaltungselemente von selbstlernenden und resilienten sozio-technischen Systemen auf das Verwertungssystem Windenergieanlage übertragen werden. Resilienz bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem, dass sich das Verwertungssystem flexibel auf sich ändernde Bedingungen einstellen können muss. Dafür kommen grundsätzlich technisch-organisatorische Elemente wie Puffer, Speicher, Modularität, Redundanzen und eine intelligente Vernetzung von Angebot und Nachfrage in Frage [Gößling-Reisemann 2019]. Um die Leistungsfähigkeit der resilienten Gestaltungselemente zu überprüfen, sollen diese in ein dynamisches Modell des Verwertungssystems Windenergie überführt

Abbildung 5 Schematische Darstellung eines agentenbasierten Modells [Gridnard 2017]



werden. Ausgehend vom Status Quo der Verwertungspraxis werden sukzessive innovative Elemente in das System eingebracht, um ihre Wirkung auf die Fähigkeit des Systems zu überprüfen, mit Unsicherheit und Schwankungen umzugehen. Als Modellierungswerkzeug kommen hierfür insbesondere „Agentenbasierte Modelle (ABM)“ in Frage, mit Hilfe derer sich einerseits Verbreitungsdynamiken von technischen und organisatorischen Innovationen und andererseits ihre Wirkung auf Stoffströme abbilden. Die Akteure werden als Agenten bezeichnet und liefern Wissen über ihre Entscheidungspraxis und helfen damit, die Auswirkungen von technischen oder organisatorischen sowie wirtschaftlichen Veränderungen wie z. B. Innovationen oder Erlöseinbrüche in einem fluktuierenden Umfeld realitätsnah abzubilden. Solche Agenten haben Attribute, Verhaltensweisen und Fähigkeiten der Wahrnehmung und Kommunikation, wie in Abbildung 2 dargestellt. Diese Objekte können eine Vielzahl von Phänomenen repräsentieren. Agentenbasierte Modelle zeichnen sich durch ihre Komplexität, ihren dynamischen, heterogenen und multiskaligen Charakter aus. Wir betrachten daher ein Modell als ein Computerprogramm und eine Simulation als die Ausführung dieses Programms [Gridnard 2017]. In Abbildung 5 ist der Ansatz dieser Methode abgebildet.

Die agentenbasierte Modellierung dient zur Abbildung der Handlungsoptionen und deren Auswirkungen unter Berücksichtigung der Interessen der Akteure in Bezug auf die Zielformulierung des Verwertungsnetzwerkes. Sie wird den Akteuren die Auswirkungen ihrer Verhaltensmuster, Handlungsvorschläge und Entscheidungen auf die Stoffströme innerhalb des Verwertungsnetzwerkes verdeutlichen. Das Ziel ist, dass sie ihr Verhalten „selbstlernend“ innerhalb der Gütegemeinschaft in Richtung auf das gewünschte Optimum anpassen.

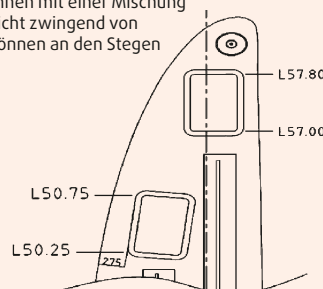
### 3. Ergebnisse zur Konzeptionierung des Verwertungsnetzwerkes

Die Erarbeitung von fachlichen Grundlagen und die darauf aufbauende Entwicklung der softwarebasierten Tools 1 bis 5 wird als essentiell notwendige Grundlage zur Bewältigung der Komplexität und der effektiven Nutzung eines Verwertungsnetzwerkes angesehen. Im Laufe der Entwicklung im Rahmen des Vorhabens RecycleWind 1.0 (Laufzeit 2/2018 bis 10/2019) wurden zwei grundlegende Aspekte identifiziert:

Abbildung 6  
Beschreibung des Aufbaus und der Lage von Strukturelementen eines Rotorblattes, am Beispiel der Ausgleichskammern aus der Entwurfsfassung „EPD-Rotorblatt“

An der Spitze befindet sich mindestens eine Ausgleichskammer (L57.00–57.80) und optional eine von L50.25 bis L50.75. Diese Kammern können mit einer Mischung aus Epoxid-Stahl/Blei-Schrot beladen werden. Sie sind nicht zwingend von außen gekennzeichnet. Zusätzliche Ausgleichsmassen können an den Stegen nahe dem Schwerpunkt (L 17.75) befestigt werden.

Skizze/Abbildung:  
Positionen der Ausgleichskammer



1. Aufgrund des häufigen Mangels an Daten über die stoffliche Zusammensetzung der Hauptkomponenten in bereits abgeschlossenen Stilllegungsprojekten von Onshore-Windenergieanlagen wird die Etablierung einer standardisierten Produktdokumentation als notwendig erachtet. Vorgeschlagen wird hier die Verwendung von Environment Product Declarations (EPD), die in Europa bereits als Umweltzeichen eingeführt wurden. Sie werden derzeit vor allem im Bausektor verwendet.

2. Die Entsorgung der Windenergieanlagen nach der Beendigung des Betriebes liegt in der Verantwortung der Betreiber. Parallel dazu steht zunehmend die erweiterte Herstellerverantwortung im Kontext des Abfallrechts im Fokus, mit der Verantwortung des Herstellers über den gesamten Lebensweg inkl. der Entsorgung eines Produktes. Die Organisation der Entsorgung zum Ende des Produktlebens der WEA sollte daher die Herstellerverantwortung und die Betreiberverantwortung in geeigneter Weise integrieren. Zur konkreten Ausgestaltung dieses Ansatzes wird die Gründung einer Gütegemeinschaft „RecycleWind“ vorgeschlagen, um im Rahmen dieser Selbstorganisation ein hochwertiges Recycling von Windenergieanlagen gewährleisten zu können.

#### 3.1 Umweltbezogene Produktdeklaration (EPD)

Besonders im Zusammenhang mit langlebigen Produkten, wie bei den Rotorblättern von Windenergieanlagen, sind strukturiert aufbereitete Informationen über verbaute Materialien und Konstruktionen für die Recyclingbemühungen am Ende der Produktlebensdauer von enormer Bedeutung, weil unter Umständen auf abgelegte Informationsmaterialien, das Personal als Know-How-Träger oder sogar auf die Hersteller selbst nicht mehr zurückgegriffen werden kann.

Bei den Rückbauvorhaben von Windenergieanlagen zeigen sich deutliche Lücken bezüglich der Dokumentationen zur Spezifikation der verbauten Materialien als auch zu den notwendigen technischen Angaben, wie beispielsweise Gewichte. Dies erschwert die Rückbauplanung als auch eine verlässliche Kostenkalkulation.

Aus diesen Gründen werden für ein effizientes Kreislaufwirtschaftssystem mit hohen Rückführungen an Sekundärstoffen zum Einsatz in der Neuproduktion für die verbauten Hauptkomponenten einer Windenergieanlage Umweltproduktdeklarationen (EPD) gefordert.

Bei einer EPD handelt es um Typ-III-Umweltzeichen, also um eine umfassende und extern verifizierte Beschreibung der Umweltauswirkungen ohne Wertung [ISO 14025]. In diesem Dokument werden die umweltrelevanten Eigenschaften eines bestimmten Produktes in Form von neutralen und objektiven Daten abgebildet.

Hersteller von Produkten bzw. die von ihnen beauftragten Beratungsdienstleister sehen sich bisher mit der Aufgabe konfrontiert, neben den meist in guter Quantität und Qualität vorhandenen Daten für die Produktionsphase und der Nutzungsphase (LCA-Module A und B) auch Daten für die LCA-Module C (Rückbau, Entsorgung) und D (Recyclingpotenzial/Gutschriften) zu erheben und zu bewerten. Für diese Prozesse sind



i.d.R. weit weniger Daten vorhanden. Diese werden daher meist mit generischen Daten gängiger Entsorgungsverfahren abgebildet. Da es bei der Auswahl der Szenarien am Lebensende keine engen Vorgaben gibt, können die dafür verwendeten Annahmen sehr unterschiedlich sein, was die Vergleichbarkeit der Resultate sehr erschwert.

Hier bedarf es grundsätzlich einer Standardisierung bezüglich der notwendigen Angaben zu den Prozessabläufen und den Stoffströmen beim Rückbau, der Demontage und der Aufbereitung nach dem Lebensende der Produkte sowie zu deren Zuführung zu Recycling- oder anderen Verwertungsverfahren.

Im Rahmen von RecycleWind 1.0 ist in einem ersten Teilschritt dazu eine Entwurfsfassung für eine „EPD Rotorblatt“ auf Basis der bisherigen Normung entwickelt worden. In Zusammenarbeit mit dem Rotorblattunternehmen TPI Composites Germany GmbH (ehemals EUROS Entwicklungsgesellschaft für Windkraftanlagen mbH) sind hier folgende Elemente neu eingefügt worden:

- ◆ auf die Recyclingprozesse abgestimmte Dokumentation über die Materialzusammensetzung und
- ◆ Angaben zur Lage und zum Einbau von für ein Recycling potenziell als „kritische Schadstoffe“ einzustufenden Materialien
- ◆ Angaben zur Demontagemöglichkeit für das Recycling relevanter einzelner Baugruppen und Hauptkomponenten.

In Abbildung 6 ist beispielhaft ein Detail bei den Rotorblättern zu den Ausgleichskammern (mit Beschwerungsmitteln zum Ausgleich von Unwucht) dargestellt, wie es sich in der „Entwurfsfassung EPD-Rotorblatt“ wiederfindet.

Die Standardisierung der EPD im Hinblick auf die LCA-Module C und D soll im weiteren Verlauf des Vorhabens RecycleWind 2.0 verstetigt und abgeschlossen werden, insbesondere sollen zusätzlich Kriterien zur Darstellung der Recyclingfähigkeit eines Produktes erarbeitet werden. Diese müssen Angaben zur Demontierbarkeit einzelner Hauptkomponenten und Baugruppen sowie der dabei generierten Stoffströme umfassen, als auch auf die Verfügbarkeit von Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren nach dem Stand der Technik für diese Stoffströme eingehen. Die bisherige Entwurfsfassung „EPD-Rotorblatt“ wird um diese Aspekte in einem eigenen Kapitel „Recyclingfähigkeit“ erweitert und zukünftig als „EPD-plus Rotorblatt“ bezeichnet.

Bei diesem erweiterten EPD-Ansatz ist es wichtig, auf die jeweiligen Hauptkomponenten einer Windenergieanlage

- ◆ Fundament/Gründung
- ◆ Turm
- ◆ Gondel/Maschinenhaus, inklusive der sekundären Aufbauten
- ◆ Antriebsstrang mit Getriebe, Generatoren
- ◆ Rotornabe
- ◆ Rotorblätter
- ◆ Innerparkverkabelung und die interne Verkabelung der WEA-Anlagen

jeweils einzeln abzustellen. Nur diese separate Betrachtung kann einem effizienten Recycling gerecht

werden. Setzt man bei den Recyclingquoten allein auf die Gesamtanlage, so werden aufgrund der Beton- und Stahlkomponenten, die die Hauptmassen einer Windenergieanlage stellen, schon jetzt sehr gute Recyclingquoten von 80–90% erreicht [BWE 2021], wobei dann der Blickwinkel auf „Problemstoffe“ wie die Faserverbundstoffe oder „kritische Rohstoffe“ wie die Permanentmagneten vernachlässigt wird.

Diese geplanten Umsetzungen zu einer EPD-plus decken sich mit den Empfehlungen aus aktuellen Arbeiten zu EPD im Bauproduktbereich [Trinius et al. 2020]. Die Autoren bemängeln dort die bisherigen Auswertungen in den EPDs bzgl. Rückbau, Entsorgung und zum Recyclingpotenzial. In ihrem entwickelten Leitfaden zur Behebung dieses Mangels stellen sie explizit darauf ab, dass für Produkte die Hersteller weiterhin die Daten und Ansätze für die LCA-Module A (Herstellung inkl. Vorstufen) und B (Nutzungsphase) verantworten, die Daten und Ansätze zur Auswertung der LCA-Module C (Rückbau, Entsorgung) und D (Recyclingpotenziale, Gutschriften) von den Akteuren kommen sollen, die diese Prozesse verantworten. Zum anderen beschreibt der Leitfaden, wie diese Informationen in EPDs der Bauprodukthersteller integriert werden können.

Die Erweiterung zu einer EPD-plus und die nach Hauptkomponenten gegliederte Zusammenstellung der notwendigen Informationen erleichtert die Bewertung von Recyclingansätzen in der geplanten Gütegemeinschaft (siehe Kap. 3.2) und unabhängig davon grundsätzlich den Rückbau- und Recyclingunternehmen die Ausführung von optimierten End-of-Life Arbeitsabläufen.

### 3.2 Gütegemeinschaft RecycleWind

Das Verwertungsnetzwerk braucht eine Ausgestaltung, die die Langlebigkeit der Produkte und die Anforderungen von Betreiber- und Herstellerverantwortung besonders in den Fokus nimmt. Mit Hilfe einer zu etablierenden Gütegemeinschaft soll das Ziel eines hochwertigen Recyclings für das Produktsystem Windenergieanlage erreicht werden.

Die Beteiligten lassen sich dabei drei Hauptgruppen entlang des Produkt-Lebenswegs zuordnen:

- ◆ Herstellung (z. B. WEA-Hersteller, Projektentwickler, Genehmigungsbehörden)
- ◆ Betrieb (z. B. Windparkbetreiber, Serviceunternehmen, Überwachungsbehörden)
- ◆ Verwertung (z. B. Rückbauunternehmen, Entsorgungsunternehmen, Verwerter)

Alle Gruppen tragen Teile der Gesamtverantwortung zur Realisierung einer Kreislaufwirtschaft mit anspruchsvollen Recyclingzielen und sollten demnach als Mitglieder in der Gütegemeinschaft vertreten sein. Außerdem ist es sinnvoll die Gruppen „Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen“ sowie „Bundes- oder Landesbehörden“ einzubeziehen, da diese oft Rahmenbedingungen setzen und Entwicklungspotenziale aufzeigen.

#### 3.2.1 Betreiberverantwortung und erweiterte Herstellerverantwortung

Mit der Genehmigung zum Betreiben von Windenergieanlagen, heute ausschließlich auf Grundlage des

## RECYCLING | WINDENERGIEANLAGEN

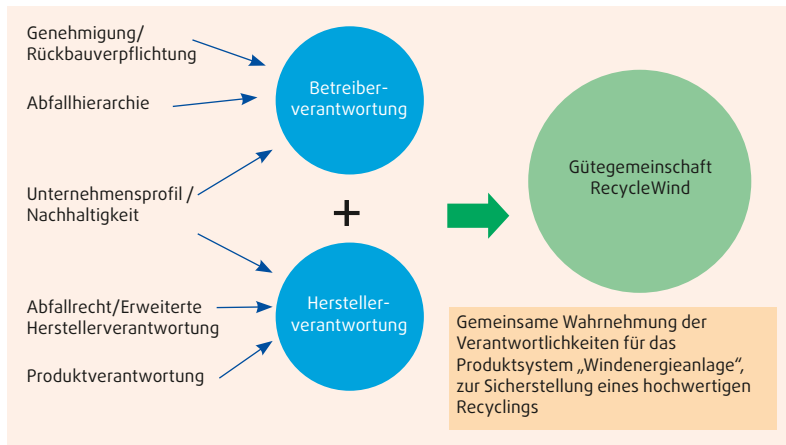


Abbildung 7  
Prinzipieller Ansatz der zu etablierenden Gütegemeinschaft RecycleWind als Bündelung der Betreiber- und Herstellerverantwortung für das Produktsystem „Windenergieanlage“

Bundesimmissionsschutzgesetzes, obliegt nach gängiger Rechtsauffassung der Rückbau und die Entsorgung von Windenergieanlagen am Lebensende gemäß § 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG (Betreiberverantwortung) in Verbindung mit dem § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB ausschließlich den Windparkbetreibern. Unabhängig davon sind in den meisten Genehmigungen selbst Regelungen zum Rückbau inkl. Festlegungen zu Sicherungsleistungen vorhanden.

Bisherige Regelungen des Gesetzgebers zur Herstellerverantwortung am Lebensende von Produkten finden sich vorwiegend in dem Bereich der Post-Consumer Abfälle, u. a. Batterien, Verpackungen und Elektrogeräte. Hier sind Rücknahmeverpflichtungen bzw. Verantwortungen bzgl. des Lebensendes von Produkten durch die Hersteller festgelegt, u. a. Sammel- und Recyclingquoten auf Basis von in den Verkehr bzw. in den Markt gebrachter Mengen, [VerpackG 2021, BattG 2020, ElektroG 2020]. Aus dem Bereich langlebiger Produkte gibt es bisher allein für Altfahrzeuge entsprechende Regelungen [AltfahrzeugV 2020].

Die gesetzlichen Quoten orientieren sich weitgehend am Stand der Technik zur Entsorgung und dem zum Zeitpunkt der Festlegung bekannten stofflichen Zusammensetzungen der zu betrachtenden Produkte. So wurden für Altfahrzeuge aufgrund des bisher sehr hohen Anteils an verbauten Stahl- und Metallkomponenten schon seit 1998 hohe Recyclingquoten vorgegeben. Ab dem 1. Januar 2015 liegen diese bei

- a) Wiederverwendung und Verwertung mindestens 95 Gewichtsprozent,
- b) Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent

Bei den Altfahrzeugen lässt sich aber auch gut verdeutlichen, dass z. B. umweltpolitisch gewünschte Änderungen in der Fahrzeugkonstruktion, u. a. vermehrter Einsatz von Leichtbauelementen zur Gewichtsreduzierung und damit einhergehende Minderungen beim Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß aufgrund von fehlenden flexiblen Regelungen zu den Recyclingvorgaben hinderlich sein können. Durch den vermehrten Einsatz von Verbundkunststoffen heutzutage ist die oben genannte hohe stoffliche Wiederverwendung und Recyclingquote eventuell nicht mehr erzielbar.

Da gerade bei langlebigen Produkten sich diese Ergebnisse erst Jahre später nach Einführung am Markt manifestieren, ist es umso wichtiger, dass sich die Her-

steller bereits bei der Produktplanung Fragen zur Entsorgung stellen und parallel zur Nutzungsphase der Produkte notwendige Recyclingkonzepte und an die neuen Stoffströme angepasste Aufbereitungs- und Recyclingverfahren sowie die Stoffwege von Sekundärprodukten mit entwickeln. Diese Arbeiten sind zentral für die Entwicklung der Gütegemeinschaft RecycleWind und sind zentral für die Entwicklung der Gütegemeinschaft RecycleWind und sind zentral für die Entwicklung der Gütegemeinschaft RecycleWind.

Genau hier setzt mit der Einführung 2018 in die europäische Abfallrahmenrichtlinie [AbfRRL 2018] die erweiterte Herstellerverantwortung (englisch: Extended Producer Responsibility (EPR)) an und erweitert generell die Produktverantwortung der Hersteller auf die Zeit nach der Nutzungsdauer. Die EU verfolgt damit das Verursacherprinzip: Der Hersteller hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Produkt und bringt es in Verkehr. Deshalb soll der Hersteller beim End-of-Life der Produkte auch bei der Entsorgung Verantwortung mit übernehmen.

Die Mitgliedstaaten sollen für relevante Abfallströme dafür geeignete Maßnahmen ergreifen: Zitat EU-Abfallrahmenrichtlinie § 8, Abs. 1; Satz 2 und 3:

„... Diese Maßnahmen können die Verpflichtung umfassen, öffentlich zugängliche Informationen darüber zur Verfügung zu stellen, inwieweit das Produkt wiederverwendbar und recycelbar ist.“

Bei langlebigen Produkten oder Anlagen, wie z. B. den Windenergieanlagen, erscheint eine hohe Recyclingfähigkeit und eine gute Kreislauffähigkeit nur möglich zu sein, wenn die Verantwortung dafür gleichermaßen von den Herstellern und Betreibern in einem Verwertungsnetzwerk getragen wird. Die Ausgestaltung sollte organisatorisch über eine Gütegemeinschaft gebündelt werden und die Akteure der Verwertung einbeziehen. In Abbildung 7 ist ein derartiger prinzipieller Ansatz dargestellt.

### 3.2.2 Konzept einer Gütegemeinschaft RecycleWind

Basiselement einer derartigen Gütegemeinschaft, die im Bereich Abfallwirtschaft u. a. für (mineralische) Recyclingbaustoffe, Kompost oder für Sekundärbrennstoffe bereits existieren, aber auch bei Produkten wie den RAL-gütesicherten Solarenergieanlagen bekannt sind [RAL 2018], ist die Etablierung von selbst erarbeitenden Standards und der Überwachung von deren Einhaltung durch einen Güteausschuss.

Im Gegensatz zu gesetzlich festgelegten Recyclingvorgaben soll der Rahmen einer Gütegemeinschaft ein flexibles Agieren der Akteure in dem Verwertungsnetzwerk ermöglichen, so dass die Kompetenzen und Interessen der einzelnen Akteure Berücksichtigung finden und Ziele, je nach Änderung von Rahmenbedingungen, angepasst und umgesetzt werden können. Vorstellungen des Gesetzgebers zum Beispiel zur Ressourceneffizienz oder zum Verbot bestimmter Materialien fließen als äußere Rahmenbedingungen in das Netzwerk ein und müssen dann im Netzwerk in dem selbst geschaffenen Regelwerk ausgestaltet werden.

Oberste Prämisse aller Tätigkeiten in der Gütegemeinschaft ist ein hochwertiges Recycling unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeit, Klima- und

Ressourcenschutz im Sinne einer effizienten Kreislaufwirtschaft.

### 3.2.3 Aufgaben einer Gütegemeinschaft

Die Hauptaufgabe besteht in der Erstellung bzw. Festbeschreibung von Standards zur Produktdeklaration, zum Rückbau von WEA bzw. der Hauptkomponenten, zur Demontage bzw. Aufbereitung und zur Verwertung der einzelnen Materialien sowie zu eventuellen Stoffsubstitution. Dabei sind die Entwicklungen auf dem Markt (Stand der Technik, alternative Materialien, Schadstoffe, Sekundärprodukte) laufend zu beobachten und zu bewerten.

Diese Arbeit fußt auf der Mit- und Zuarbeit der Mitglieder der Gütegemeinschaft:

- ◆ auf ausreichenden Daten bzw. Produktdeklarationen seitens der Hersteller; wobei im Falle der WEA hier die Hauptkomponenten jeweils getrennt zu betrachten sind. Die noch zu entwickelnde EPD-plus (siehe Kap. 4 Ausblick) bzw. die darin geforderten Daten sollte für Mitglieder der Gütegemeinschaft als Standard gelten.
- ◆ von Betreiberseite ist eine laufende Fortführung dieser Grunddaten, u. a. bei Austausch von Komponenten, Reparaturen, Betriebsstoffe während des Betriebs, sicherzustellen.
- ◆ die Rückbau- und Verwertungsunternehmen aktualisieren fortlaufend die Informations- und Datenlage zu den technischen EoL-Prozessen unter Nutzung von Tool 2 und schreiben damit den Stand der Technik auf der Entsorgungsseite fort. Zur Bewertung der Recycling- und Kreislauffähigkeit der Hauptkomponenten und des Gesamtsystems sind Definitionen zu Recycling- und Verwertungsquoten und daraus abgeleitete Steuerungsgrößen festzulegen und damit eine Bewertung des Gesamtsystems WEA prozessbezogen durchzuführen.
- ◆ Als Steuerungsgröße für das stoffliche Recycling wird hier eine neudefinierte Sekundärstoffquote vorgeschlagen. Die Sekundärstoffquote gibt an, welcher Massenanteil an Sekundärrohstoff der recycelten Mengen in der Neuproduktion von Stoffen und Produkten wieder eingesetzt wird. Die Recyclingmengen werden zum Einsatz als Sekundärrohstoff im Produktionsbetrieb noch weiter aufbereitet; entsprechender Schmutz und störende Bestandteile, nicht nutzbare Anteile (z. B. zu kurze Fasern) werden dabei abgetrennt. Im Metallhandel spricht man bei solchen Massenanteilen von den sogenannten Schuttabzügen.
- ◆ Ferner ist neben der Auswertung der Sekundärstoff- und Verwertungsquote auch die Nutzung von LCA-Auswertungen bzw. des CO<sub>2</sub>-Footprints als Steuerungsgröße mit heranzuziehen.

Daneben ist ein Überblick über den Gesamtbestand aller Windenergieanlagen und deren Kenndaten unter Nutzung von Tool 1 für die Arbeit in der Gütegemeinschaft von großer Bedeutung. Nur darüber lassen sich Stoffflüsse unter Nutzung von Tool 2 und 3 des derzeitigen und des zukünftigen Bestandes abbilden bzw. prognostizieren und damit notwendige Aufbereitungs- und Verwertungskapazitäten abschätzen bzw. aufzeigen.

Im Rahmen der Gütegemeinschaft RecycleWind wären gemeinschaftliche Herstellergruppen-Produktdeklarationen (Branchen bzw. Sektor-EPDs) für die einzelnen Hauptkomponenten, getrennt nach Anlagentypen ähnlicher Leistungsklassen, möglich. Diese könnten dann von den als Mitglieder vertretenden Herstellerunternehmen gemeinschaftlich genutzt werden.

In dem Fall von herstellerübergreifenden EPDs sollte es zusätzlich spezifische „Datenblätter Recycling“ der einzelnen Hersteller geben, die von der Gütegemeinschaft verwaltet werden und bei Bedarf für Rückbauplanungen zur Verfügung gestellt werden könnten.

## 4. Zusammenfassung

Windenergieanlagen werden seit den 90er-Jahren als eine neue und regenerative Art der Stromerzeugung in Deutschland in größerem Maß errichtet. Die erste Generation erreicht aktuell ihr Lebensende, so dass die Bauteile und Materialien zur Entsorgung anstehen. Sie stehen somit als ein Beispiel für die Fragestellungen eines hochwertigen Recyclings langlebiger Produkte.

Seitens des Gesetzgebers und der Vollzugsbehörden fehlen bisher konkretisierende Vorgaben zum Rückbau der Anlagen und zur Verwertung der anfallenden Materialien, inkl. möglicher Regelungen zur erweiterten Herstellerverantwortung für diese Produktgruppe. Oft sind notwendige Informationen und Daten zum konstruktiven Aufbau der Anlagen und zu den verbauten Materialien am Lebensende nicht vollständig vorhanden, schon gar nicht in strukturierter aufbereiteter Form.

In den Anlagen ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Materialien verbaut, die zum Teil nur mit aufwändigen Demontage- und Verwertungsschritten eine hochwertige Verwertung ermöglichen. Dies gilt insbesondere für die GFK- und CFK-Verbünde in den Rotorblättern. Die vorgeschlagene Weiterentwicklung von Umwelt-Produktdeklarationen (EPD) zu EPD-plus mit integrierten Materialangaben und der Beschreibung von geeigneten Demontage- und Verwertungsprozessen nach dem jeweiligen Stand der Technik stellt die oben erwähnte strukturierte Grundlage für die frühzeitige Verzahnung zwischen der Materialauswahl bei Konstruktion und Bau der Anlagen und den späteren Verwertungsoptionen zur Verfügung.

Das FuE-Vorhaben RecycleWind stellt strukturierte Tools zur Verfügung, um die notwendigen Grunddaten für Entscheidungen zur Art der Verwertung und zu den Materialströmen ermitteln zu können.

Die Nutzung der Tools in einer möglichen Gütegemeinschaft schafft eine notwendige Grundlage für ein zielgerichtetes Handeln der Akteure im Sinne von Kreislaufwirtschaft. Die vorgeschlagenen Strukturen liefern die notwendige Unterstützung für die Vielzahl von Akteuren in diesem komplexen Handlungsfeld. Die Hauptaufgabe besteht in der Erstellung bzw. Festbeschreibung von Standards zur Produktdeklaration, zum Rückbau und zur Demontage von WEA, zur Aufbereitung und zur Verwertung der einzelnen Materialien. Dabei sind die Vorgaben des Gesetzgebers und die Entwicklungen auf dem Markt (Stand der Technik, al-

ternative Materialien, Schadstoffe, Sekundärprodukte) laufend zu beobachten und zu bewerten.

Dazu werden Bewertungsinstrumente notwendig. Die Sekundärstoffquote ergänzt die bereits vorliegenden Vorschläge einer Substitutionsquote [KRU 2019, DGAW 2020]. Während die letztgenannte die Steuerung des Sekundärmaterialanteils in einem Neuprodukt adressiert und damit den Einsatz in der Produktionsphase bestimmt, steuert die Sekundärstoffquote in der Entsorgungsphase eines Produktes den in eine (Neu-)Produktion auszuschleusenden Sekundärmaterialanteil am Ende der Abfallbehandlung. Beide Quoten stehen in Abhängigkeit voneinander, wenden sich aber an unterschiedliche Akteure und zwingen diese in der Gütegemeinschaft zu einem abgestimmten Handeln.

### Danksagung

Die Vorhaben RecycleWind 1.0 (Laufzeit 2/2018 bis 10/2019) und RecycleWind 2.0 (Laufzeit 8/2020 bis 1/2022) wurden bzw. werden von der Bremer Aufbaubank GmbH durch Mittel der Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau der Freien Hansestadt Bremen im Programm AUF zur Förderung angewandter Umweltforschung und durch EFRE-Mittel der EU gefördert.

### Literatur

- AbfRRL:** Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union i. d. F. vom 30.5.2018, ABL L15/2018, S. 109
- AltfahrzeugV:** Altfahrzeugverordnung i. d. F. vom 18.11.20, BGBl. I 2020, S. 2451
- Gridnard, A. 2017:** Agent-Based Visualization, veröffentlicht 22. Aug. 2017 (<https://v3.pubpub.org/pub/57ac6dedada4e9002dca9d4a>), letzter Zugriff 15.02.2021
- Bäger, D. et al. 2019:** Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolengängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaser- verstärkten Kunststoffen (CFK); Fachzeitschrift Gefahrstoffe-Reinholdung der Luft, Nr. 79 (2019) Nr. 1/2 – Januar/Februar, VDI-Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf
- Baier, A. 2020:** persönliche Mitteilung Dr. Hubert Baier, WhiteLabel-Tandem-Projects UG, Okt. 2020
- BattG:** Batteriegesetz i. d. F. vom 03.11.20, BGBl. I 2020, S. 2280
- BWE 2021:** Bundesverband Windenergie, Rückbau-Alles gut geregelt, <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/rueckbau/>, letzter Zugriff 15.02.2021
- CarboNXT GmbH 2019:** Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall; Entsorgung faserhaltiger Abfälle Abschlussbericht, Juli 2019
- Clemm, C., Lang, K.-D. 2019:** Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten, UBA-Texte 18-2019, Dessau-Roßlau März 2019
- DGAW 2020:** Stellungnahme des DGAW im Rahmen der Verbändeanhörung zum Referentenentwurf zur Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms III-ProGress III, Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., Januar 2020
- ElektroG:** Elektro- und Elektronikgerätegesetz i. d. F. vom 03.11.20, BGBl. I 2020, S. 2280
- Faulstich, M. et al. 2016:** Umweltschutzgerechte Verwertung nicht etablierter Stoffströme in Abfallverbrennungsanlagen; UBA-Texte 18-2016, Dessau-Roßlau Feb. 2016
- Gößling-Reisemann, S. et al. 2019:** „Das Resilienzkonzept: Von den historischen Wurzeln zum theoretischen Rahmen für das Design kritischer Infrastrukturen“ in Ruth, M and Goessling-Reisemann, S. (Hrsg.): „Handbook on Resilience of Socio-Technical-Systems“, Verlag Edward Elgar Publishing, Jan. 2019
- Henning, F. et al. 2019:** Vom Anfang bis zum Ende gedacht? Herausforderung Recycling, Vortrag auf den Carbon-Workshop, united carbon 3\_2019
- ISO 14025:** DIN EN ISO 14025:2011-10: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011; [www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14025/144319534](http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14025/144319534)
- Kreibe et al. 2016:** Umweltbezogene Bilanzierung von „intelligenten“ und „aktiven“ Verpackungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und Durchführung eines Dialogs mit Akteuren der Entsorgungs- und Herstellungsbranchen; UBA-Texte 22-2016, Dessau-Roßlau März 2017

**KRU 2019:** Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU): Substitutionsquote – Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft; Herausgeber: Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU), Juli 2019

**Limburg, M., Quicker, P. 2016:** Entsorgung von Carbonfasern – Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 13; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 135–144

**Pehlken, A. et al. 2017:** Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling, Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe – Band 10; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2017, S. 251–259

**Quicker, P., Stockschläder, J. 2019:** Auswirkungen carbonfaserhaltiger Abfälle auf die thermische Abfallbehandlung – Siedlungs-, Sonderabfallverbrennungsanlage und Zementdrehrohr; Vortrag Fachtagung: Aufbereitung und Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau; 19. und 20.09.2019

**Rademacker, T. 2021:** persönliche Mitteilung Tim Rademacker (Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH), E-Mail vom 29.3.2021

**RAL 2018:** RAL Gütezeichen 966 Solarenergieanlagen, Fassung März 2018, <https://gg-solar.de/wp-content/uploads/2021/GuetePruef2018.pdf>. Letzter Zugriff 15.2.2021

**Stapf, D. 2019:** Stand der Untersuchungen zum Freisetzungverhalten von Carbonfasern in thermischen Prozessen; Vortrag Fachtagung: Aufbereitung und Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau; 19. und 20.09.2019

**Trinius, W. et al. 2020:** Grundlagen und Empfehlungen zur Beschreibung der Rückbau-, Nachnutzungs- und Entsorgungsphase von Bauprodukten in Umweltprodukt-deklarationen – Ein Leitfaden für Bauproduktindustrie und Normungsgremien zur Ausgestaltung der Module C und D in EPD und PCR; UBA-Texte129/2020, Dessau-Roßlau Juli 2020

**VerpackG:** Verpackungsgesetz i. d. F. vom 27.01.21, BGBl. I 2021, S. 140

**Wulf, K. 2018:** Strategien zur Verknüpfung der Prozesse Produktentwicklung und Verwertung im Produktsystem Rotorblatt, Masterthesis, Hochschule Bremen, Nov. 2018

### Anschrift der Autoren

**Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg**

Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft  
an der Hochschule Bremen GmbH  
Neustadtswall 30, 28199 Bremen  
E-Mail: [d.spuziak-salzenberg@iekrw.de](mailto:d.spuziak-salzenberg@iekrw.de)