

11.22

Müll und Abfall

54. Jahrgang
November 2022
Seite 585-652

www.MUELLundABFALL.de

Fachzeitschrift
für Kreislauf-
und Ressourcen-
wirtschaft



Auch als

eBook

Umweltrecht in der Praxis

Planung und Zulassung umweltrelevanter Vorhaben

Von Dr. jur. Sven Fischerauer

2022, 555 Seiten, mit zahlreichen Übersichten,
Praxistipps und Beispielen, € 74,-

ISBN 978-3-503-20908-8

eBook: € 67,40. ISBN 978-3-503-20909-5

Online informieren und bestellen:

www.ESV.info/20908



Erweiterte Umweltproduktdeklarationen als Basis eines effizienten Recyclings für langlebige Produkte wie Windenergieanlagen

Extended environmental product declarations as the basis of efficient recycling for long-life products such as wind turbines

Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg, Tobias Brinkmann, Dr. Carmen Arndt, Philippe Spring und Michael Steinfeldt

Zusammenfassung

Gerade bei langlebigen Produkten stellen sich die entscheidenden Fragen nach der sachgerechten Umsetzung und Sicherstellung von hochwertigen Recyclingzielen oft erst nach Jahrzehnten. Informationen über die Materialzusammensetzung sind dann meist nicht mehr ausreichend bekannt. Am Beispiel von Windenergieanlagen wurden im Projekt RecycleWind hierzu Grundlagen für ein effizientes Recyclingnetzwerk langlebiger Produkte aufgezeigt. Mit den vorgestellten Empfehlungen für eine erweiterte Umweltproduktdeklaration (EPD) und den damit verbundenen Schritten hin zu einem effizienten Recycling auch langlebiger Produkte können solche Probleme adäquat angegangen werden. Dazu sind zum einen Wissenswerkzeuge zur Sicherstellung eines qualitativ hochwertigen Stoffkreislaufs erforderlich, wie z. B. Datenbanken, in denen installierte Produkte und deren Kennwerte für die eingesetzten Massen und Materialien dokumentiert sind. Darüber hinaus werden Materialflussmodellierungen zur Verfolgung der für das Lebensende von Produkten anfallenden Stoffströme einschließlich Ökobilanzen der Verwertungs- und Entsorgungswege sowie Prognosewerkzeuge für die zu erwartenden Abfallmengen benötigt. Die im Projekt RecycleWind entwickelte Umweltproduktdeklaration (EPD), die für deren Inhalte dafür entwickelten Ansätze und Werkzeuge und insbesondere deren aktive Kombination werden am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen vorgestellt.

Abstract

Particularly in the case of long-life products, the crucial questions about the proper implementation and assurance of high-quality recycling targets often only arise after decades. Information about the material composition is then usually no longer sufficiently known. Using the example of wind turbines, the RecycleWind project demonstrated the

fundamentals for an efficient recycling network for long-life products.

Such problems can be adequately addressed with the presented recommendations for an extended Environmental Product Declaration (EPD) and the associated steps towards an efficient recycling also of long-lived products. This requires knowledge management tools to ensure a high-quality material cycle, such as databases in which installed products and their characteristic values for the masses and materials used are documented. In addition, material flow modeling is needed to track the material flows generated for the end-of-life of products, including life cycle assessments of the recycling and disposal paths, as well as forecasting tools for the expected waste volumes. The Environmental Product Declaration (EPD) developed in the RecycleWind project, the approaches and tools developed for its content and in particular their active combination are presented using the example of wind turbine rotor blades.

1. Einleitung

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

In einem früheren Artikel wurden hierzu bereits die Grundlagen und methodischen Ansätze, sowie erste Ergebnisse vorgestellt [Albers et.al. 2021]

Als ein wesentlicher Punkt für ein effizientes Kreislaufwirtschaftssystem mit hohen Rückführungen an Sekundärstoffen für die verbauten Hauptkomponenten einer Windenergieanlage wurden Umweltprodukt-

Dr. rer. nat. Detlef Spuziak-Salzenberg
Projektleiter „RecycleWind“ beim Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH

Dipl.-Ing. (Fh) Tobias Brinkmann M.Sc.
Geschäftsführer und Leiter des Bereichs Ökobilanzierung bei der brands & values GmbH

Dipl.-Ing. Philippe Spring
Entwicklungsingenieur für WEA-Rotorblattstrukturen und Materialtechnologie bei TPI Composites Germany GmbH

Dr. rer. nat. Carmen Arndt
Senior Consultant des Bereichs Ökobilanzierung bei der brands & values GmbH

Dipl.-Ing. Michael Steinfeldt
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Resiliente Energiesysteme an der Universität Bremen

deklarationen (EPD) gesehen. Im Rahmen von RecycleWind 1.0 ist in einem ersten Teilschritt dazu eine Entwurfsfassung für eine „EPD Rotorblatt“ auf Basis der bisherigen Normung in Zusammenarbeit mit dem Rotorblattunternehmen TPI Composites Germany GmbH entwickelt worden.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens RecycleWind 2.0 wurde diese Entwurfsfassung „EPD-Rotorblatt“ im Hinblick auf die LCA-Module C und D verstetigt und abgeschlossen, insbesondere wurden zusätzliche Kriterien zur Darstellung der Recycling- und Kreislauffähigkeit eines Produktes integriert. Diese im Projekt RecycleWind 2.0 entwickelte erweiterte Umweltproduktdeklaration „EPD-Rotorblatt 2.0“, die dafür erarbeiteten Ansätze und Werkzeuge und insbesondere deren aktive Kombination werden hier vorgestellt.

2. Vorgehensweise

Unser Ansatz für die Erarbeitung von Grundlagen für ein effizientes Recyclingnetzwerk langlebiger Produkte umfasst vier Schlüsselbereiche:

- ◆ Identifizierung relevanter Akteure in den Prozessketten und deren Rollen, Einfluss, Verantwortlichkeiten und Interaktionen
- ◆ Bestandsaufnahme des Recyclingsystems mit quantitativen Daten, Materialqualitäten und Recyclingtechnologien
- ◆ Definition von Indikatoren für Recyclingfähigkeit, Kreislaufwirtschaft und Verwertungsraten
- ◆ Empfehlungen sinnvoller Schritte hin zu einem effizienten Recyclingnetzwerk

Dazu haben wir am Beispiel der Windenergieanlagen bzw. Rotorblätter Wissenstools entwickelt, um einen hochwertigen Materialkreislauf sicherzustellen:

- ◆ zur Analyse, Beschreibung und Dokumentation der Produkt- und Verwertungssysteme
 - ◆ Tool 1: Datenbanken, in denen in Deutschland installierte Windenergieanlagen onshore und offshore und deren Kennwerte für die verwendeten Massen und Materialien dokumentiert werden, inkl. Tools zur Prognose für daraus erwartete Abfallmaterialien mit ihren Mengen
 - ◆ Tool 2: Prozessdatenblätter für den Rückbau der Anlagen, für die Aufbereitung der End-of-Life (EoL)-Materialien, inkl. Darlegung der beim Einsatz von daraus resultierenden Sekundärmaterialien substituierten Stoffe
 - ◆ Tool 3: Materialflussmodellierung zur Verfolgung von Materialflüssen aus dem Rückbau und der Aufbereitung der EoL-Materialien, einschließlich Lebenszyklusbewertungen (Life Cycle Assessments, LCAs) von Recycling- und Entsorgungswegen
- ◆ zur 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)]

In einem zweiten Schritt wurden daraus die notwendigen Daten und inhaltlichen Umsetzungen für ein effizientes Verwertungsnetzwerk erarbeitet, u. a. für die hier vorgestellte erweiterte Umweltproduktdeklaration, das effiziente recycling- und kreislauffördernde Informationen integriert und nutzbar macht.

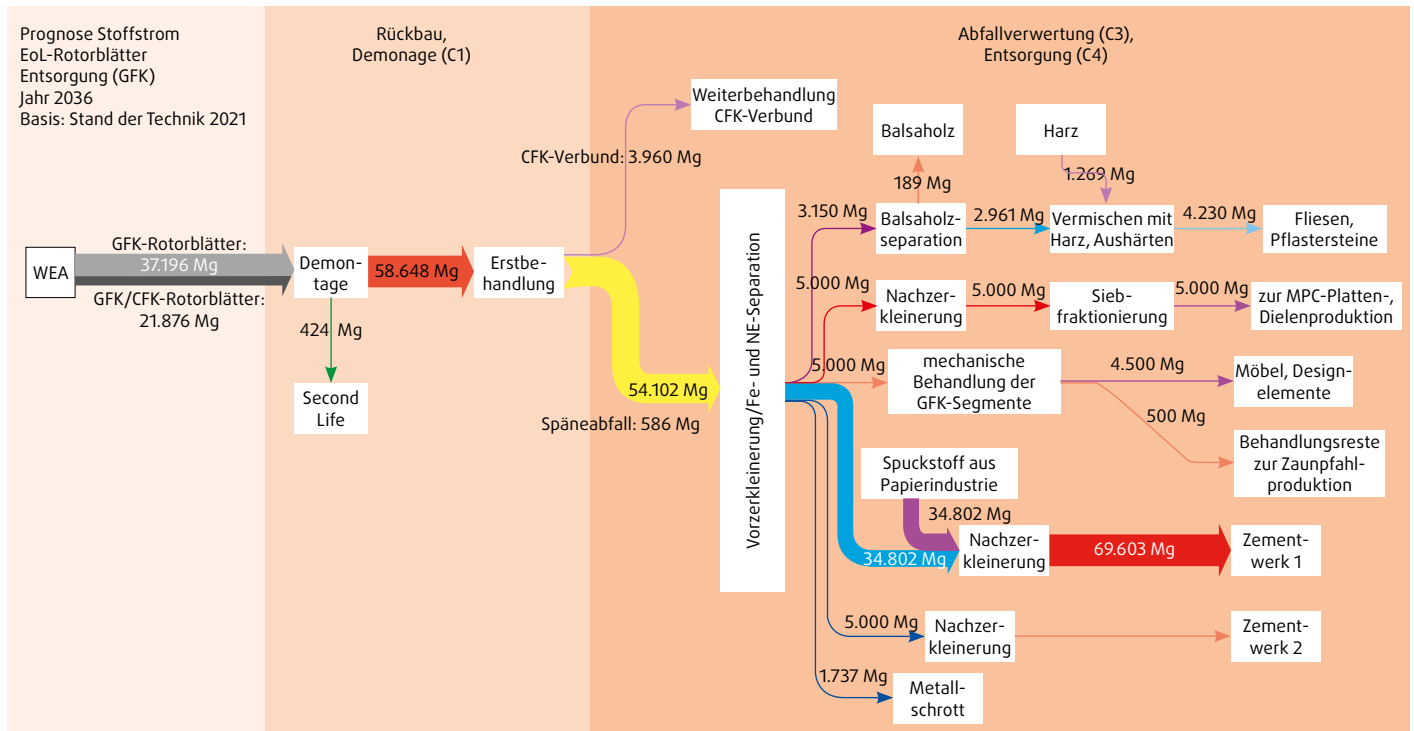
3. Datengrundlage zur Integration recyclingrelevanter Informationen in einer erweiterten EPD Rotorblatt 2.0

Schwerpunkt war hier die Konkretisierung bzw. Vervollständigung der Datenerhebung zu den verbauten Materialien bei den einzelnen Leistungsklassen der Windenergieanlagen und die Kenndaten zu Stoff- und Energieflüssen der Prozesse zu den Rückbau- und Aufbereitungsverfahren. Darüber hinaus waren umfangreiche Recherchen zu dem Verbleib der zurückgewinnbaren Sekundärstoffe notwendig, um die für die LCA-Berechnungen in den EPD's notwendigen Auswertungen bzgl. Rückbau und Entsorgung und den möglichen Gutschriften durch den Wiedereinsatz von Sekundärmaterialien auf eine sichere Basis zustellen.

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, Entsorgungstransporte, Verwertung und Entsorgung) und D (Recyclingpotenzial/Gutschriften) zu erheben und zu bewerten. Für diese Prozesse sind i.d.R. weit weniger Daten vorhanden, um eine aussagekräftige Ökobilanzierung durchführen zu können. 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.

Dieser Sachstand wurde auch bei aktuellen Arbeiten für das Umweltbundesamt zur EPD im Bauproduktbereich [Trinius, W. et al. I-2020] kritisiert. Die Autoren bemängeln dort die bisherigen Auswertungen in den EPDs bzgl. Rückbau, Entsorgung und zum Recyclingpotenzial. In ihrem entwickelten Leitfaden zur Behebung dieses Mangels schlagen sie vor, 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) aber von den Akteuren kommen sollen, die diese Prozesse auch durchführen [Trinius, W. et al. II-2020].

Bei der UBA-Studie aus März 2021 [Hengstler, J. et al. 2021] zur „Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieent-



wicklungen“ sind diese Defizite im Bereich Rückbau, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen ebenfalls sichtbar. So werden bei der Ökobilanzierung u. a. für die Glasfaserverbundstoffe aus den Rotorblättern aufgrund fehlender Daten anderer Entsorgungswege nur die Müllverbrennung als Entsorgungstechnologie angesetzt und mit den daraus resultierenden Gutschriften bewertet. Auch die in den Rotorblättern der immer größer werdenden Anlagen häufig genutzten Carbonfaserverbundkunststoffe (CFK) finden in dieser aktuellen UBA-Studie keine Berücksichtigung.

Durch unsere Arbeiten konnten für den Bereich des Rückbaus von Windenergieanlagen inkl. der weiteren Aufbereitung der Stoffströme für Stahl, Beton und die Rotorblätter hierfür nun Daten im Detail ermittelt werden. Diese werden prozessbezogen in Datenblättern dargestellt. Hierzu liegen derzeit folgende Datenblätter vor:

- ◆ Rückbau der Windenergieanlage (WEA-onshore)
- ◆ Zementpfad Glasfaserverbundkunststoffe (GfK)
- ◆ MPC-Dielenpfad GfK
- ◆ Pflastersteinpfad GfK
- ◆ Pyrolysepfad CFK

Das Datenblatt Rückbau WEA umfasst auch die Aufbereitung der Stahlkomponenten bis zur Stahlwerksgüte, d. h. Zerkleinerung auf Maße von 150cm × 50cm.

Für Beton aus dem Rückbau von WEA's liegen nach der Demontage der Fundamente und etwaiger Betonurmsegmente für die weitere Aufbereitung zu Recycling-Baustoffen oder auch Recycling-Beton bereits detaillierte Analysen bzgl. Massen- und Energieflüssen vor, auf die zurückgegriffen werden kann [Spyra, W. et al. 2010].

Nicht betrachtet wurden die Entsorgungswege für Mittelspannungskabel, Batterien und den Elektroschrott inkl. Transformatoren sowie für Generatoren, für die jeweils etablierte Verwertungswege vorhanden sind und die grundlegenden Kenndaten für diese jewei-

ligen Aufbereitungs- und Verwertungspfade in der Literatur vielfältig beschrieben sind.

Eine gesonderte Betrachtung bedarf es für die Demontage und das Recycling von verbauten Permanentmagneten in den Getrieben und zum Teil in den Türmen. Ein etabliertes Demontageverfahren zur Rückgewinnung von Permanentmagneten existiert noch nicht, insbesondere für die im Falle der WEA doch z. T. sehr großen Massen von mehreren Tonnen an Permanentmagneten pro Anlage. Auch besteht für das Recycling dieser Komponenten noch ein hoher Entwicklungs- und Forschungsbedarf. Aktuell findet hierzu ein Forschungsvorhaben der Deutschen Bundesumweltstiftung statt (Laufzeit 14.6.2021–14.6.2023): WindLoop – Effiziente Rückführung von Selten-Erde- und Nicht-Eisen-Metallen aus Windenergieanlagen in den Stoffkreislauf [WindLoop 2021]. Von daher stehen zum jetzigen Zeitpunkt für diese Materialien keine Daten bzgl. Rückbau, Demontage, Aufbereitung und Verwertung zur Verfügung, die eine Bewertung zulassen würden.

3.1 Stoffflussmodellierungen und LCA-Auswertungen von Entsorgungswegen

Die erfassten Daten in den entwickelten Prozessdatenblättern sind Grundlage für die Stoff- und Energiefluss-Analyse als Basis für die Ökobilanzierung. Dabei werden für die Modellierung der Entsorgungswege nur Verfahren berücksichtigt, die nach dem Stand der Technik am Markt zum Zeitpunkt der Betrachtung auch zur Verfügung stehen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die projizierten Mengen an EoL Rotorblattmassen für den Onshore-Sektor in Deutschland für das Jahr 2036 mit den erwarteten Recyclingpfaden basierend auf dem Stand der Technik und dem Markt im Jahr 2021. Der kohlenstoffverstärkte Kunststoffanteil (CFK) wird mittels Pyrolyse behandelt, um die Kohlefasern zu extrahieren. Der

Abbildung 1
Prognose Stoffstrom Recycling, Verwertung von GfK-Materialien aus EoL-Rotorblätter onshore, beispielhaft für das Jahr 2036 auf Basis Stand der Technik und Markt im Jahr 2021

RECYCLING | WINDENERGIEANLAGEN

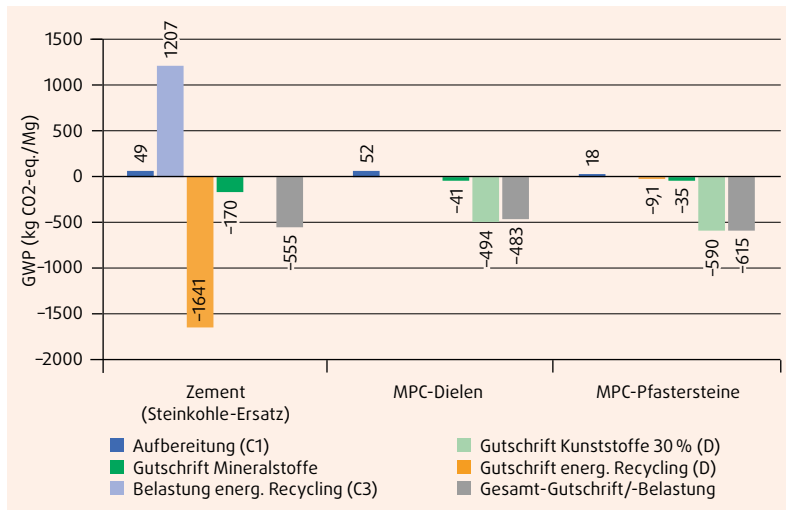


Abbildung 2
Vergleich Treibhausgaspotenzial für die Verwertungswege Zementpfad und MPC-Pfade der GFK-Materialien aus dem Rückbau von Rotorblättern, inkl. Gutschriften durch Substitution von Sand, Ton und Kalkstein sowie Primärenergie beim Zementwerk und Substitution von Kalkstein und Polypropylen beim MPC sowie Kalkstein und Polyester beim Pflasterstein

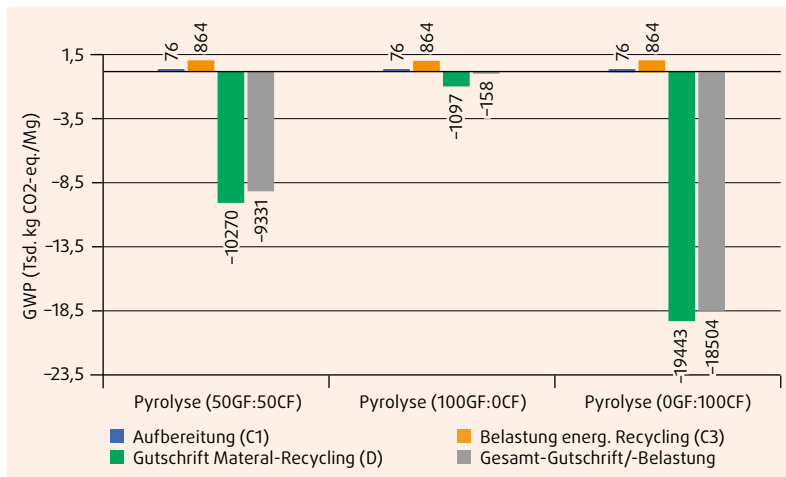


Abbildung 3
GWP-Vergleich für den Verwertungsweg Pyrolysepfad der CFK-Materialien aus dem Rückbau von Rotorblättern, inkl. Gutschriften durch Substitution gegenüber 100 % Primärfasern vCF bzw. vGF und Szenario mit 50 % vGF/50 % vCF

glasfaserverstärkte Kunststoffanteil (GFK) wird energetisch und teilweise in einem Zementwerk recycelt. Das komplette Materialrecycling ist ein weiterer möglicher Weg, wie die Verwendung von GFK in Mineral-kunststoff-Verbundplatten (MPC)-Dielen, Pflastersteinen oder als Möbel.

Für die einzelnen Recyclingpfade wurden die Prozesse anhand der Informationen aus Tool 2 abgebildet. Auf Basis der Prozessdatenblätter wurden Ökobilanzen erstellt, um das globale Erwärmungspotenzial (GWP) zu ermitteln und die möglichen Auswirkungen der jeweiligen Recyclingoptionen zu vergleichen. Die Ökobilanzen wurden in Anlehnung an die ISO 14040/44 [ISO 14040/44 2006] und die DIN EN 15804 [DIN EN 15804 2019] durchgeführt und mittels der GaBi-Software [GABI] erstellt. Für die Berechnung des globalen Erwärmungspotenzials wurden die in der DIN EN 15804 + A2 aufgeführten Charakterisierungsfaktoren nach EG-JRC [EG-JRC] verwendet.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen Vergleich der GWP-Daten für die Nutzung von GFK im Zementwerk gegenüber der Nutzung von GFK in der Produktion von Dielen bzw. Pflastersteinen aus MPC (Mineral-Plastic-Compound). Dargestellt sind die Belastungen in Modul C1 und C3, sowie die Gutschriften in Modul D, die dem folgenden Produktsystem zugerechnet werden. Verrechnet man die Belastungen mit den Gutschriften, so ergeben sich Unterschiede zwischen den Verwertungsmöglichkeiten. Die Zementroute verursacht wesentlich mehr Belastungen durch das energetische Recycling; es ergibt sich jedoch auch eine deutliche Gutschrift durch die Steinkohle-Substitution. Die Pflastersteinroute würde die größte Gesamtgutschrift mit $-615 \text{ kg CO}_2\text{-eq./Mg}$ ergeben.

In einer aktuellen Publikation haben wir Daten zum Treibhausgaspotenzial (GWP) für den GFK-Pfad ins Zementwerk der energetischen Nutzung in einem Müllheizkraftwerk gegenübergestellt [Brinkmann, T. et al. 2022].

Entscheidend bei diesen LCA-Auswertungen ist eine detaillierte Betrachtung bzgl. der tatsächlich zu erwartenden Substitutionsgutschriften von Stoffen und/oder Energien, die je nach Sekundärstoffpfad unterschiedlich hoch ausfallen können. So können im Falle der CFK-Verbundstoffe die über die Pyrolyse zurückgewonnen Carbonfasern (rCF) bei der Wiedernutzung entweder zu 100 % primäre Carbonfasern (0GF:100CF) oder zur weiteren Gewichtsreduzierung eventuell zu 100 % bisher genutzte primäre Glasfasern (100GF:0CF) ersetzen. Daneben ist auch ein Szenario mit einem Mix an Ersatz von 50 % GF und 50 % CF (50GF:50CF) ausgewertet worden. Damit einher gehen deutliche Unterschiede bei den möglichen Gutschriften des GWPs (siehe Abb. 3).

3.2 Kriterien zur Bewertung der Recycling- und Kreislauffähigkeit

Bei der Betrachtung der Recyclingfähigkeit eines Produktes sind neben der Bewertung von Recyclingquoten für das Gesamtprodukt, hier dem Rotorblatt, differenzierte materialspezifische Quoten für die bzgl. Ressourcen- und Klimaschutz relevantesten Materialien und Stoffe heranzuziehen; das heißt für die nach EU-Definition „kritischen“ sowie besonders CO_2 - bzw. energieintensiven Stoffe, soweit diese in mengenmäßig relevanten Massenanteilen verbaut sind.

Neben diesen beiden gesonderten materialspezifischen Betrachtungen zum Recycling sind auch die Separations- oder Eliminierungsmöglichkeiten von eventuell im EoL-Material noch wirkungsrelevant verbauter gefährlicher Stoffe zu beschreiben; zur Stärkung der Recyclingfähigkeit und Verhinderung ubiquitärer Verteilung.

3.2.1 Verbaute „kritische Rohstoffe“ und „energieintensive Stoffe“ sowie eventuell im EoL-Material noch wirkungsrelevant verbaute „gefährliche Stoffe“

Zur Bewertung der Recyclingfähigkeit werden verbaute (Roh-)Stoffe, Halbzeuge und Produkte bzgl. der Einstufung als „kritischer Rohstoff“ und mit ihren GWP-Werten bzw. ihren Daten zum Primärenergiebedarf (Primary Energy Demand = PED) gelistet (siehe Tab. 1).

verbaute Materialien: GWP bzw. PED		Einstufung als kritischer Rohstoff	Masse im Rotorblatt	Energiekennzahl verbauter Materialien
(Lit. GaBi Version 10.5 2021.2)				
verbaute Primärprodukte Rotorblatt	GWP (kg CO ₂ -eq./kg)	PED _{ges.} (MJ/kg)	EU-Klassifizierung, Stand 2/2021*)	Angabe in MJ/kg Rotorblatt**)
			(Gew.-%)	
Carbonfaser	30,2	635,8	indirekt Koks kohle	59,8
E-Glasfaser	1,7	31,0	wg. Anteil Borat	12
Epoxidharz, inkl. Härter	5,85	130,7		47,6
Hartschaum/PVC	2,17	59,42		0,8
Beschichtung PU	4,59	95,7		1,2
Al-Blitzschutz	9,56	169,93	indirekt Bauxit	0,03
Blech				
Cu-Blitzschutz				
Mesh, Kupferdraht	0,82	11,75		0,1
Messing-Blitzschutz				
Blech	0,59	8,58		0,004
Stahl(-bolzen)	2,03	27,5		1
Balsaholz	-1,53	24,7		2

*) = MITTEILUNG DER EU-KOMMISSION: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken; Brüssel 3.9.2020

**) = Summe PED MJ/kg *Gew.-%-Anteil verbauter Stoff;

rot = relevante energieintensive (Ausgangs)Stoffe bzw. energieintensive Produktbestandteile

Bei der Zuordnung als kritischer Rohstoff ist auch auf eine indirekte Betroffenheit zu achten, z. B. Aluminium wg. der Einstufung von Bauxit als kritischer Rohstoff oder bei verbauten Halbzeugen, Produkten auch auf deren Zusammensetzungen und daran anteiligen kritischen Rohstoffen, z. B. E-Glasfaser wg. 5–10%igem Anteil an Boroxid (Borat ist als kritischer Rohstoff eingestuft). Nicht alle E-Glasfasern enthalten allerdings Bor, umso wichtiger ist eine Angabe durch die Hersteller im Rahmen der EPD.

Im Falle der „kritischen Rohstoffe“ wird vorgeschlagen, diese gesonderte Betrachtung unabhängig der verbauten Gew.-% dieser Stoffe vorzunehmen. Diese Vorgehensweise gilt auch für die verbauten gefährlichen Stoffe, soweit diese in den anfallenden EoL-Materialien noch mit ihrem ursprünglichen Wirkungsmechanismen enthalten sind.

Im Falle der energieintensiven Stoffe wird vorgeschlagen, ab einem PED-Wert, der das 2-fache des Heizwertes für Rohöl von 42 MJ/kg übersteigt, diese für eine zusätzliche gesonderte Betrachtung bzgl. der Recyclingfähigkeit einzustufen. Mit dem 2-fachen des Heizwertes für Rohöl soll eine über den Energieinhalt des Stoffes hinausgehende energieintensive Veredelung zum Kunststoff berücksichtigt werden. Für eine gesonderte Betrachtung dieser energieintensiven Stoffe muss aber auch eine mengenmäßige Relevanz im Produkt vorliegen. Um die mengenmäßige Relevanz dieser Materialien bei einem realen Produkt abschätzen zu können, werden die PED-Werte mit den jeweiligen Gewichtsanteilen im Produkt multipliziert. Übersteigt diese Summe, die den spezifischen PED-Anteil dieses energieintensiven Stoffes im Endprodukt beschreibt, einen Wert von 20% an der Summe aller spezifischen PED-Werte des Produktes, wird dies als anteilig relevant eingestuft und eine zusätzliche separate Betrachtung für diese energieintensiven Stoffe durchgeführt.

In Tabelle 1 ist am Beispiel des Rotorblattes CF-Typ aus der EPD Rotorblatt 2.0 eine derartige Auswertung bzw. Zuordnung zusammengefasst.

Im Ergebnis der Auswertung zu den besonders zu betrachtenden Materialien sind bei diesem hier dargestellten Rotorblatttyp

- ◆ bzgl. Einstufung als „energieintensive Stoffe“ die Carbonfasern und das Epoxidharz sowie
- ◆ bzgl. Einstufung als „kritische Rohstoffe“ die Carbonfasern, Aluminium und Glasfasern

dann im Detail zu betrachten.

Noch wirkungsrelevante gefährliche Stoffe sind in den EoL-Materialien dieses Rotorblattes nicht vorhanden.

3.2.2 Kreislauffähigkeit

Neben der Recyclingfähigkeit wird die damit einhergehende Fähigkeit zur Unterstützung einer Kreislauffähigkeit im Rahmen einer zirkulären Ökonomie beschrieben. Dafür wird folgende Definition für eine Kreislauffähigkeit herangezogen:

Kreislauffähige Outputströme stammen aus Recyclingprozessen, die

- ◆ Rezyklatqualitäten generieren, welche materialgleiche Neuware ersetzen können, d. h. als „Substitut Sekundärrohstoff bzw. Rezyklat“ in der Neuware enthalten sind (z. B. Aluminium, PET) oder diese komplett ersetzen (Umformung von Thermoplasten)

und/oder

- ◆ Grundstoffe generieren (Bestandteile von Pyrolyseölen oder -gasen), die zur Herstellung materialgleicher oder anderer Neuware wieder genutzt werden können.

Dem gleichgestellt werden Outputströme bzw. Rezyklate, die nicht materialgleiche Neuware ersetzen, sondern zur Herstellung in anderen Produkten genutzt werden, und nach deren Lebensende diese aber erneut

Tabelle 1
Kenndaten zu GWP/
PED verbauter Materialien Rotorblatt CF-Typ aus der EPD Rotorblatt 2.0

als Rezyklate des Ursprungsstoffes (Weiternutzbarkeit der Ursprungseigenschaften) zurückgewonnen werden können; u. a. Herstellung öffentlichen Mobiliars aus GFK-Segmenten, Nutzung von CFK-Gurten zu neuen Halbzeugen oder rCF aus Rotorblättern in neuen Textilgeweben, die für andere Produkte (nicht materialgleiche Neuware) genutzt werden und bei erneutem Anfall als EoL-Material daraus auch wieder generierbar sind.

Als nicht kreislauffähig im Sinne dieser Definition gelten gemahlene Faserverbundkunststoffe, oder separierte Carbonfasern mit anschließender Mahlung auf ca. < 1 mm und deren nachfolgende Nutzung in neuen Kunststoffprodukten.

4. EPD-Rotorblatt

Auf der Projekt-Homepage www.iekwr.de/recyclewind ist die entwickelte EPD Rotorblatt 2.0 im Download-Bereich abrufbar. Die Ansätze und Inhalte wurden in Zusammenarbeit mit der TPI Composites Germany GmbH, der deutschen Tochter des amerikanischen Rotorblattherstellers TPI Composites, Inc., entwickelt. Die in der EPD Rotorblatt 2.0 verwendeten Daten und Abbildungen, die beispielhaft auch für diese Veröffentlichung genutzt werden, sind geistiges Eigentum der TPI Composites, Inc.

Im RecycleWind Vorhaben sind auf Basis der bestehenden Normen Empfehlungen für einen dem Recyclinggedanken unterstützenden Inhalt einer derartigen Produktdeklaration am Beispiel „Rotorblatt“ erarbeitet worden. Die so erweiterte „EPD Rotorblatt 2.0“ mit integrierten Recyclingbewertungen soll zukünftig als Grundlagendokument zum Recycling für die Hauptkomponenten der WEA dienen und beinhaltet:

- ◆ Informationen vom Hersteller über ein Produkt und dessen Komponenten und zur Demontage, damit Entsorgern und Recyclingunternehmen die Planungen und Ausführung von optimierten End-of-Life Ansätzen erleichtert werden kann
- ◆ Eine Aussage/Bewertung zur Recyclingfähigkeit, die auch das Vorhandensein von Kreislaufsystemen mit einzuschließen hat
- ◆ Eine Auswertung des Produktes anhand von LCA-Analysen (u. a. Carbon Footprint) und Darstellung der Gutschriften aus den Stoffflüssen in Recycling- und/oder Verwertungsverfahren

4.1 Kapitel Demontagehinweise

In einem eigenem Kapitel Demontage wird insbesondere auf recyclingrelevante Aspekte eingegangen. Im Falle des Rotorblatts umfasst das u. a. Angaben zur Lage und der Breite der hauptlasttragenden, sogenannten Gurte anhand von Konstruktionsskizzen und grafischer oder tabellarischer Darstellung der Gurtbreite über die Länge des Rotorblattes. Zudem sind Angaben zur Lage und der genutzten Materialien der Kammern zum Gewichtsausgleich vorhanden. Als relevant werden auch Angaben zum jeweiligen Blitzschutzsystem gesehen, inwieweit Meshgewebe anstelle von Kupfer- oder Aluminiumkabeln verbaut wurde und Angaben zu den verwendeten Materialien der Rezeptorplatten an den Blattspitzen. Zu den Angaben gehören auch

Daten zum Wurzelbereich (Durchmesser, Dicke und Länge) inklusive der Beschreibung der verbauten Systeme zur Verbindung der Rotorblätter zur Nabe. Ferner sind Angaben zu den genutzten Sandwichkernmaterialien im übrigen Blattbereich und deren jeweiligen Lagen über die Länge des Blattes vorhanden.

Hintergrund für diese als notwendig erachteten Angaben sind die zum jeweiligen Zeitpunkt der Erstellung der EPD vorhandenen

- ◆ etablierten Recycling- und Verwertungsansätze und darüber hinaus
- ◆ bereits vorhandene, aber noch in der Entwicklung (technisch als auch marktbezogen) befindliche Recyclingansätze

und die dafür benötigten bzw. abgeschätzten Qualitätsanforderungen an die EoL-Materialien bzw. an die daraus generierten Stoffströme aus deren Aufbereitung.

4.2 Kapitel Recycling- und Kreislauffähigkeit

Zum Thema Recycling- und Kreislauffähigkeit und der Implementierung von diesbezüglichen Aussagen und Daten in EPDs wurden zu den bisher in der klassischen EPD nach DIN EN 15804 genutzten Indikatoren zusätzliche Indikatoren und Kriterien erstellt.

Zur Unterstützung einer Bewertung von Recyclingfähigkeit und Kreislauffähigkeit von im Produkt verbauten Stoffen, werden die in der bestehenden DIN EN 15804 + A2 definierten Output-Indikatoren

- ◆ „Material for Recycling (MFR)“: stoffliches Recycling; im Falle Rotorblatt: Glasfasern als stoffliche Materialien für Neuproduktion Zement, MPC-Dielen, Pflastersteine; Verwendung von rCF im Spritzguss/Vlies
 - ◆ „Material for Energy Recovery (MER)“: energetische Verwertung als qualifizierter Brennstoff mit festgelegten Qualitätsanforderungen; im Falle Rotorblatt: Kunststoffanteil (Epoxidmatrix, Hartschäume), Balsaholz im Zementwerk
- noch um folgende Indikatoren ergänzt:
- ◆ Material for Circularity (MFC) = Material wird im Kreislauf gehalten; im Falle Rotorblatt: GFK/Sandwichmatrix als (Neu-)Möbel, Neugewebe aus rCF, Metalle
 - ◆ Material for Energetic Utilisation (MEU) = energetische Verwertung als nicht-qualifizierter Brennstoff ohne festgelegte Qualitätsanforderungen; im Falle Rotorblatt: Verbrennung von Balsaholz in Altholzkraftwerken bei Verwertungspfad Pflastersteine

Dabei setzt sich der Parameter Material Recycling total (MRT) aus Material for Circularity (MFC) und Material for Recycling (MFR) zusammen; und der Gesamt-Parameter Energetic Recycling total (MERT) umfasst Material for Energy Recovery (MER) und Material for Energetic Utilization (MEU).

Basis dieser Auswertungen sind die potenziellen Recycling-, Kreislauf- und Verwertungswege nach Stand der Technik und Markt zum Zeitpunkt der Erstellung der EPD. Diese Output-Indikatoren werden jeweils zusammenfassend für die betrachteten Rotorblatttypen im Auswerteteil der EPD tabellarisch, wie am Beispiel der entwickelten EPD-Rotorblatt 2.0 in Tabelle 2, dar-

Indikator	Abkürzung	Unit	GF-Typ (PVC)	GF-Typ (PMI)	CF-Typ (PVC)
Material Recycling total	MRT	kg	98,4	97,5	60,2
Material for Circularity	MFC	kg	9,37	9,32	13,9
Material for Recycling	MFR	kg	89	88,2	46,2
Energetic Recycling total	MERT	kg	55,2	54,7	37,8
Material for Energy Recovery	MER	kg	55,1	54,5	37,7
Material for energetic utilization	MEU	kg	0,13	0,13	0,07

GF = Glasfaser; CF = Carbonfaser, PVC = Polyvinylchlorid, PMI = Polymethacrylimid

Tabelle 2
Output-Indikatoren der drei in der EPD-Rotorblatt 2.0 betrachteten Rotorblatttypen pro GWh Stromerzeugung

gestellt. Die Wertigkeit des Recyclings nimmt von oben nach unten in der Tabelle ab. Die Auswertungen in der EPD beziehen sich alle auf eine erzeugte Strommenge von 1 GWh.

Daneben wird zur besseren Visualisierung und Verknüpfung mit den in der Abfallwirtschaft bekannten Quotenbetrachtungen im Kapitel zur Recycling- und Kreislauffähigkeit eine zusammenfassende Übersicht zu potenziellen Recycling-, Kreislauf- und Verwertungsquoten gegeben (siehe Tabelle 3 am Beispiel für den CF-Typ). Dabei wird bei den potenziellen Verwertungspfaden bzgl. eines Marktzugangs für die einzelnen Stoffe eine Unterscheidung nach etabliertem und sich entwickelndem Markt getroffen.

Die Recyclingwege der als relevant eingestuften Stoffe sind in der erweiterten EPD 2.0 jeweils besonders zu betrachten und zu beschreiben.

- Bzgl. der Bewertung der Recycling- und Kreislauffähigkeit wird für die klima- und ressourcenrelevanten Materialien geprüft, ob für diese verbauten Stoffe
- ◆ Demontagehinweise zur Separation und
 - ◆ vorhandene Recyclingverfahren, -wege vorhanden sind sowie
 - ◆ deren Effektivität bzgl. einer realen Kreislaufführung bzw. Kaskadennutzung bewertet.

Im Falle von „gefährlichen Stoffen“ wird geprüft, ob für diese Stoffe bzw. damit belasteten Materialien

- ◆ Demontagehinweise bzw. Hinweise zur Separation der vorhandenen gefährlichen Stoffe vorhanden sind und/oder
- ◆ ob diese bei nachfolgenden Recyclingverfahren effizient ausgeschleust werden können.

5. Fazit

Mit unserem Ansatz der Detailaufnahme in Prozessdatenblättern und zu Substitutionseffekten konnten bei den LCA-Auswertungen die Umweltaspekte beim Rückbau und der Entsorgung von EoL-Rotorblättern sehr gut mit einbezogen werden. Zudem stellen die Ergebnisse dieser Lebenszyklusanalysen eine wichtige Information zur Bewertung bzw. Steuerung beim Recycling hin zur Zirkularität dar.

Bei diesen Gesamtbetrachtungen kommen den von uns geschaffenen Stoffflussanalysen bzgl. vorhandener EoL-Mengen und Recyclingwege und deren abgeschätzten realen Kapazitäten inkl. Visualisierung mittels Sankey-Diagramme eine große Bedeutung zu. Für die als gut im Sinne positiver Umweltauswirkungen erkannten Recyclingpfade müssen aber auch ausreichende Kapazitäten vorhanden sein. So zeigt Abb. 1 für das Jahr 2036 einen Bedarf zur Behandlung von separierten CFK-Gurten aus den EoL-Rotorblättern

deutscher Onshore-Anlagen von rd. 3.960 Mg, für die eine Behandlung in einer Pyrolyse die derzeit einzige Entsorgungsoption nach dem Stand der Technik darstellt. Hierfür besteht in Deutschland aktuell nur eine Kapazität von 1.000 Mg/a [Albers, H. et al. 2021].

Die im Projekt RecycleWind geschaffenen Tools und deren Kombination stellen die Voraussetzung für die LCA-Auswertungen in der erweiterten EPD dar. Auch die Aussagen zur Recycling- und Kreislauffähigkeit in der EPD greifen auf diese Tools zurück.

Die Empfehlungen zur inhaltlichen Erweiterung der bisher bereits obligatorischen Informationen in einer EPD zum Thema Recycling und Entsorgung, hier insbesondere der höhere Detaillierungsgrad im Kapitel Demontage und die neuen Ansätze zur Beschreibung der Recycling- und Kreislauffähigkeit, können in Hinblick auf die benannten Defizite (Datenverfügbarkeit bzgl. Rückbau, Recycling, Verwertung) zu bisherigen EPD's aus dem Baubereich (s. o.) als zielführend angesehen werden.

Zudem ließen sich mittels der EPD's die Umsetzungen der von den Herstellern im Rahmen ihrer eigenen Nachhaltigkeitsprogramme propagierten zero-waste Ziele [Vestas 2021, Siemens 2021] bzw. Zusiche-

Tabelle 3
Zusammenfassung potenzielle Recycling-, Kreislauf- und Verwertungsquoten Rotorblatt CF-Typ; Stand der Technik und Markt 2021

Verwertungsart	Material je nach Entsorgungsweg	Quote ¹⁾ %	Indikator
Recycling		59,2	MRT
	Glasfaser im Zementwerk	27,8	MFR
	Recycelte Carbonfaser (rCF) für Spritzgussanwendung	6,7	46,4 MFR
	GFK/Sandwich-Material für MPC-Platten, Pflastersteine	11,9	MFR
davon als kreislauffähig eingestuft	Nicht-Eisen-Metalle (NE), Stahl	4,3	MFC
	rCF für Thermoplast-Textilgewebe	2,2 ²⁾	12,8 MFC
	GFK/Sandwich-Material als Mobiliar	6,3 ¹⁾	MFC
Energetische Verwertung		35,8	MERT
	Epoxid/Sandwich im Zementwerk	30,8	MER
	Balsaholz zur Verbrennung aus Pflasterstein-Route	5,0	MEU
	Epoxid aus Pyrolyse CFK		MEU
Verlust		5	
Verwertung_{gesamt}		95	

blau = sich entwickelnde Märkte

*)= Basis Gew.-% Zusammensetzung Rotorblatt minus pauschal 5% Verlust durch Aufbereitung

1)= gemäß prozentualen Anteil vom EoL-GFK/Sandwich Material im Verhältnis Kapazität Behandlung Mobiliar zur Gesamtkapazität GFK/Sandwich-Behandlung

2)= da verlässliche Zahlen über Anteil rCF Textilpfad am Gesamtumsatz der rCF-Mengen fehlen, Annahme hier 25% für Thermoplast-Textilgewebe; der überwiegende Teil von rCF wird als Mahlgut < 0,5mm im Spritzguss verwendet (hier nicht als Unterstützung der Kreislaufwirtschaft bewertet)

rungen zu Recyklierbarkeiten [LM 2020] gegenüber der Öffentlichkeit verlässlich dokumentieren.

Im Projekt RecycleWind sind auf Basis der bestehenden Normen Empfehlungen für ein dem Recyclinggedanken unterstützenden Inhalt einer derartigen Umweltproduktdeklaration am Beispiel „Rotorblatt“ erarbeitet worden. Die so erweiterte „EPD Rotorblatt 2.0“ mit integrierten Recyclingbewertungen kann zukünftig als Grundlagendokument zum Recycling von langlebigen Produkten, u. a. für die Windenergieanlagen dienen und beinhaltet:

- ◆ Informationen vom Hersteller über ein Produkt und dessen Komponenten, zur Demontage, damit Entsorgern und Recyclingunternehmen die Ausführung von optimierten End-of-Life Arbeitsabläufen erleichtert werden kann
- ◆ eine Aussage/Bewertung zur Recyclingfähigkeit, die auch das Vorhandensein von Kreislaufsystemen mit einzuschließen hat
- ◆ eine Auswertung des Produktes anhand von LCA-Analysen (u. a. Carbon Footprint) und Darstellung der Gutschriften durch Stoffflüsse in Recycling- und/oder Verwertungsverfahren

Die entwickelten Kriterien können für zukünftige Anpassungen von Standard-EPDs durch die jeweiligen Programmhalter genutzt werden (Weiterentwicklung von Product Category Rules (PCR)).

6. Ausblick

Die Circular Economy zielt darauf ab, den maximalen Werterhalt von eingesetzten Rohstoffen zu gewährleisten. Sie betont damit die Bedeutung höherer Ressourcenproduktivität und letztlich der Entkopplung von Wertschöpfung vom Ressourcenverbrauch.

Für ein effektives Recycling im Sinne von Zirkularität bedarf es neben dem grundsätzlichen Anspruch auf ein Design für Recycling einen transparenten Datenaustausch zwischen allen Akteuren (Hersteller, Nutzer, Sammler, Rückbauer, Erstaufbereiter und letztendlich den Verwertern). Aus diesem Grund wurden und werden in den letzten beiden Jahren verstärkt Forderungen nach der Einführung von Produktpässen in der Fachwelt und nun auch in der Politik aufgegriffen.

So hat die Circular Economy Initiative Deutschland diesbezügliche Handlungsempfehlungen am Beispiel von Traktionsbatterien erarbeitet [Kwade, A. et al. 2020], in dem der Batteriepass und Datenplattformen eine elementare Rolle spielen.

Im Rahmen des Forschungsnetzwerks European Circular Economy Research Alliance (ECERA) wurde ein White Paper „Digital circular economy – a cornerstone of a sustainable European industry transformation“ unter Mitarbeit des Forschungsbereichs Digitale Transformation in der Abteilung Kreislaufwirtschaft am Wuppertal Institut erstellt [Berg, H. et al. 2020], das u. a. auf zirkuläre digitale Zwillinge und Produktpässe setzt, die den Weg eines Materials oder Produkts über seinen Lebenszyklus hinweg verfolgen.

Entscheidend bei der Nutzung von Produktpässen ist die zukünftige Standardisierung der Inhalte, wobei diese eine produktbezogene Anpassung ermöglichen sollten, um so gezielt auf produktspezifische Be-

sonderheiten im Bezug auf die Recyclingfähigkeit eingehen zu können.

Hier bietet unsere Wahl, diese Produktinformationen in Form einer erweiterten umweltbezogenen Produktdeklarationen (EPD) zu gestalten, einen guten Ansatz. Eine EPD ist ein offizielles, transparentes und nicht wertendes Dokument, welches Ergebnisse einer Ökobilanz in einem standardisierten Format über einen Programmhalter veröffentlicht. Es ist als Umweltzeichen Typ III (nach ISO 14025) europaweit eingeführt:

- ◆ Umfassende Beschreibung der Umweltleistung
- ◆ Keine Bewertung
- ◆ Basierend auf der Ökobilanz ISO 14040 und 14044 sowie im Baubereich auf EN 15804
- ◆ alle Material- und Energieflüsse werden systematisch erfasst
- ◆ Es werden Umweltauswirkungen charakterisiert, z. B. der Treibhauseffekt im CO₂-Äquivalent.
- ◆ Unabhängig verifiziert

Eine derartige EPD ließe sich unserer Meinung nach auch als Bestandteil eines Produktpasses bzw. als Basis einer digitalen Lebenslaufakte integrieren.

Im Rahmen des Projektes RecycleWind wurden unsere Ansätze sowohl mit VertreterInnen von Herstellern und Betreibern von Windenergieanlagen als auch mit VertreterInnen der Politik diskutiert. Zumindest Teile unserer zur Sicherstellung eines effektiven Recyclings für sinnvoll erachteten Informationen in der erweiterten EPD Rotorblatt 2.0 finden sich in den 2022 im Rahmen des Projektes „DecomBlades“ erstmals neu kreierten „Product Disposal Specifications“ (PDS) für Rotorblätter der Hersteller Vestas, Siemens-Gamea und LM [Decomblades 2022] wieder.

Die niedersächsische Landesregierung hat unseren Ansatz für ein effektives Recycling langlebiger Produkte mit Hilfe einer erweiterten Umweltproduktdeklaration als positiven Beitrag des Arbeitskreises „Fortentwicklung der Kreislauf- und Abfallwirtschaft“ in den Abschlussberichten zur 8. Regierungskommission „Nachhaltige Umweltpolitik und Digitaler Wandel“ mit aufgenommen [MU Niedersachsen 2022].

Umweltproduktdeklarationen (EPDs) bzw. Produktpässe sollten zukünftig Bestandteil der Anlagendokumentation und explizit auch Bestandteil der Genehmigungsunterlagen sein. Produktdeklaration und Lebenslaufakte der WEA zusammen sind die Grundlage für die Planung eines effektiven kreislauffördernden Rückbau- und Entsorgungskonzeptes.

Für die bereits in Betrieb befindlichen Altanlagen greifen verpflichtende Produktinformationen allerdings nicht mehr. Hier ist eine Branchenvereinbarung (Hersteller/Betreiber) zur Schaffung einer standardisierten rückbau- und recyclingrelevanten Informationsdeklaration für Altanlagen erstrebenswert.

Danksagung

Die Vorhaben RecycleWind 1.0 und RecycleWind 2.0 wurden von der Bremer Aufbaubank GmbH durch Mittel der Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau der Freien Stadtgemeinde Bremen im Programm AUF zur Förderung angewandter Umweltforschung und durch EFRE-Mittel der EU gefördert.

Literatur

- Albers, H. et al 2021:** RecycleWind – Konzept eines Verwertungsnetzwerks für langlebige komplexe Produkte unter Berücksichtigung von Betreiber- und Herstellerverantwortung am Beispiel von Windenergieanlagen, Fachzeitschrift Müll und Abfall 08/2021, S. 420–430, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Berg, H. et al 2020:** Digital circular economy as a cornerstone of a sustainable European industry transformation (White Paper); Hrsg.: ECERA European Circular Economy Research Alliance, 20 October 2020; https://www.researchgate.net/publication/345006900_Digital_circular_economy_as_a_cornerstone_of_a_sustainable_European_industry_transformation
- Brinkmann, T. et al. 2022:** High-quality recycling through self-learning and resilient recycling networks using a combination of agent-based modelling and life cycle assessment; LCM 2021, E3S Web of Conferences 349, 12004 (2022); <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234912004>
- Decomblades 2022:** <https://decomblades.dk>; letzter Zugriff 12.09.2022
- DIN EN 15804:** Sustainability of construction works–Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products; German version EN 15804:2012+A2:2019
- EC-JRC:** European Commission – joint Research Center, <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- GaBi:** Ganzheitliche Bilanzierungssoftware. Database Version 10.5. (2021)
- Hengstler, J. et al. 2021:** Abschlussbericht – Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. UBA-CLIMATE CHANGE 35/2021, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, März 2021.
- ISO 14040:** Environmental management Life cycle assessment Principles and framework-2006
- ISO 14044:** Environmental management Life cycle assessment Requirements and guidelines-2006
- Kwade, A. et al. 2020:** Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben, Hrsg.: Circular Economy Initiative Deutschland, acatech/SYSTEMIQ, München/London 2020. <https://www.acatech.de/publikation/ressourcenschonende-batteriekreislaeufe/>
- LM 2020:** www.offshorewind.biz/2020/09/23/zebra-consortium-to-develop-fully-recyclable-wind-turbine-blade; letzter Zugriff 12.09.2022
- MU Niedersachsen 2022:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz; Veröffentlichung zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses noch nicht erfolgt; unter folgender Adresse wird die Veröffentlichung erfolgen: https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/nachhaltigkeit/8_regierungskommission_nachhaltige_umweltpolitik_und_digitaler_wandel/8-regierungskommission-nachhaltige-umweltpolitik-und-digitaler-wandel-173270.html
- Siemens 2021:** www.siemensgamesa.com/newsroom/2021/07/210721-siemens-gamesa-press-release-launches-new-sustainability-strategy; letzter Zugriff 12.09.2022
- Spyra, W. et al 2010:** Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), Forschungsprojekt: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung (gefördert von der DBU; FKZ: AZ 26101-23), Hrsg. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl Altlasten, Fachgruppe Bauliches Recycling; Cottbus; 02.11.2010
- Trinius, W. et al. I-2020:** Ressourcenschonende Bauwerke – EPD für Bauprodukte: Rückbau- und Recycling-informationen (Modul C und D) sowie Schadstoffangaben; UBA Texte 128/2020, Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Juli 2020
- Trinius, W. et al. II-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-Texte 129/2020, Dessau-Roßlau Juli 2020
- Vestas 2021:** www.vestas.com/en/media/company-news/2021/vestas-underlines-sustainability-leadership-by-outlinin-c3431492; letzter Zugriff 12.09.2022
- WindLoop 2021:** https://www.dbu.de/projekt_37114/01_db_2409.html

Anschrift der Autoren

Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg

Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH, Neustadtswall 30, 28199 Bremen



Große Herausforderungen – starke Unterstützung!

Neben der Kommentierung des europäischen und nationalen Regelungsregimes werden in diesem Kommentar die steuerrechtlichen Vorschriften und die verfassungsrechtlichen Hintergründe instruktiv beleuchtet. Weiterhin werden die interdisziplinären Querschnittsthemen gut verständlich dargestellt, darunter die ökonomischen, naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen.

Dem Tempo der fortlaufenden Neuerungen wird auch ein digitales Add-on gerecht, über das Sie als Nutzerin und Nutzer des Werkes komfortabel weitere aktuelle Informationen abrufen können.

Klimaschutzrecht

EU-Klimagesetz, KSG Bund und NRW, BEHG, Steuerrecht, Querschnittsthemen

Gesamtkommentar

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz
2., völlig neu bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage 2022, L. 1.213 Seiten, fester Einband, inkl. Zugang zu einem digitalen Add-on, € 178,-, ISBN 978-3-503-20686-5. eBook: € 161,90, ISBN 978-3-503-20687-2



Online informieren und versandkostenfrei bestellen:
www.ESV.info/20686

ESV ERICH SCHMIDT VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG
Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin
Tel. (030) 25 00 85-265
Fax (030) 25 00 85-275
ESV@ESVmedien.de · www.ESV.info



Einfach mehrfach nutzen.



Handbuch Kreislaufwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz

Erscheint ca. Dezember 2022, ca. 1.000 Seiten, mit zahlreichen farbigen Abbildungen, Übersichten und Praxisbeispielen, fester Einband, Preis folgt ISBN 978-3-503-20067-2

eBook: Preis folgt, ISBN 978-3-503-20068-9

Vor dem Hintergrund einer weiter anwachsenden Bedeutung der **circular economy** für den **Klimaschutz** und auf Grundlage des **KrWG 2020**, **Green Deal** und der **EU-Kreislaufstrategie**: Das **neue Handbuch** verschafft Ihnen einen umfassenden, interdisziplinären Überblick zum hochaktuellen Thema **Kreislaufwirtschaft**.

Mit vielen Übersichten und Beispielen

Die akuten Problemfelder, mit denen sich Praktiker derzeit konfrontiert sehen, werden notwendigerweise komplex, dabei aber stets gut verständlich und lösungsorientiert erläutert – aus **rechtlicher, wirtschaftlicher und technisch-naturwissenschaftlicher Sicht**.

- ▶ über 30 instruktive Beiträge aus den Bereichen Recht, Technik, Ökonomie und Ökologie
- ▶ umfangreiches Autorenteam aus renommierten Expertinnen und Experten
- ▶ viele Querschnittsthemen wie Umwelt-, Klima- und Ressourcenschutz, Digitalisierung sowie Wettbewerbs- und Vergaberecht
- ▶ wichtige Instrumentarien wie Gebührengestaltung, steuerliche Aspekte, ökonomische Anreize, Information und Ökodesign



Online informieren
und versandkostenfrei bestellen:
www.ESV.info/20067

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Souverän im gesamten Abfallrecht

ESV-Digital Recht der Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Mehr Entscheidungssicherheit in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft: umfassende und fundierte Kommentierungen in einer passgenauen Datenbank – laufend aktualisiert, jederzeit verfügbar, auf einen Klick.

- ▶ **Fachübergreifende Perspektiven** aus den Ministerien auf Bundes- und Landesebene, Anwaltschaft, Abfallunternehmen und Umweltbundesamt zum gesamten Regelwerk einschl. wichtiger EU-Regelungen, aus Umweltrecht und Wirtschaftsordnungsrecht
- ▶ **Alles Wichtige vernetzt:** Kommentare, Vorschriften, Rechtsprechung, LAGA-Mitteilungen u.a. in einer Datenbank

Ihr persönlicher Arbeitsplatz

Perfekt verlinkt und überall mobil: suchen, notieren, markieren, zitieren, exportieren – **mit automatischen Updates.**



Inhalte dieser Datenbank:

- ▶ von Lersner/Wendenburg/Kropp/Rüdiger
Recht der Abfall- und Kreislaufwirtschaft des Bundes, der Länder und der Europäischen Union
Kommentierungen der Abfallrahmenrichtlinie, des KrWG und weiterer abfallrechtlicher Gesetze und Verordnungen
- ▶ **ESV-Rechtsprechungssammlung**
- ▶ **ESV-Vorschriftensammlung**

1 Nutzer 29,- €
Einzellizenz, netto/Monat

3 Nutzer 47,85 €
ESV-Bürolizenz, netto/Monat

Printbezieher 5,80 €
Einzellizenz, netto/Monat

Gleich 4 Wochen gratis testen:

www.ESV-Digital.de/RdA

