

# 10.24

56. Jahrgang  
Oktober 2024  
Seite 541-608

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

# Müll und Abfall

Fachzeitschrift  
für Kreislauf-  
und Ressourcen-  
wirtschaft



## Handbuch Kreislaufwirtschaft

Recht, Ingenieur- und Naturwissenschaften, Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Digitalisierung

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz

2024, 1.326 Seiten, mit zahlreichen farbigen Abbildungen, Übersichten und Praxisbeispielen, fester Einband, € 149,-. ISBN 978-3-503-20067-2  
eBook: € 135,90. ISBN 978-3-503-20068-9

Online informieren und versandkostenfrei bestellen:

[www.ESV.info/20067](http://www.ESV.info/20067)



# Anforderungen an eine Hafeninfrastruktur zur Sicherung der Wertschöpfungsketten aus dem Rückbau von Windenergieanlagen aus dem Offshore Bereich im Sinne der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie

## Requirements for a port infrastructure to secure the value chains from the dismantling of offshore wind turbines in line with the National Circular Economy Strategy

Dr. Steffen Czichon, Annette Schimmel, Niels Ludwig und Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg

### Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat im Juni 2024 ihren ersten Entwurf zur Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie veröffentlicht. Ziel ist die Stärkung von Materialkreisläufen, insbesondere für kritische und strategische Rohstoffe, um einerseits Abhängigkeiten von Importen derartiger Stoffe und daraus hergestellter Halbzeuge/Produkte zu reduzieren. Andererseits sind Materialkreisläufe die Voraussetzung für die notwendige Transformation der deutschen Industrie und des Gewerbes hin zu einer effizienten Ressourcen- und Klimaschutz Rechnung tragenden Wirtschaft. Der Beitrag geht auf die Voraussetzungen ein, um einen derartigen Kreislauf für verbaute Materialien aus dem Rückbau von Windenergieanlagen aus dem Offshorebereich (Offshore-WEA) umsetzen bzw. Mengen dafür auch sichern zu können. Er stellt dabei auf die notwendige frühzeitige Schaffung einer BImSchG genehmigten Zwischenlagerung und Erstbehandlung der anlandenden Anlagenteile und Komponenten der rückgebauten Windenergieanlagen an einem geeigneten Hafenstandort ab. Als Grundlage einer derartigen Genehmigungsplanung werden erste Mengenabschätzungen für die Windparks der Nordsee vorgestellt und auf notwendige Aspekte bei der hafenseitigen Annahme und Erstbehandlung eingegangen.

### Abstract

In June 2024, the German government published its first draft of the National Circular Economy Strategy. The aim is to strengthen material cycles, especially for critical and strategic raw materials, in order to reduce dependencies on imports of such materials and semi-finished products/products made from them. On the other hand, material cycles are the prerequisite for the necessary transformation of German industry and commerce towards an efficient economy that

takes resource and climate protection into account. The article discusses the prerequisites for implementing such a cycle for installed materials from the dismantling of offshore wind turbines (offshore wind turbines) or for securing quantities for them. In doing so, it is based on the necessary early creation of an interim storage and initial treatment of the landfall turbine parts and components of the dismantled wind turbines at a suitable port location. As a basis for such approval planning, initial quantity estimates for the wind farms in the North Sea are presented and necessary aspects of port acceptance and initial treatment are discussed.

### 1. Einleitung

2010 fand mit alpha ventus der erste Aufbau eines Offshore-Windparks in Deutschland statt. Ende 2023 waren insgesamt 1566 Offshore-Windenergieanlagen (Offshore-WEA) am Netz (Windguard, 2024). Nach der 20-jährigen EEG-Förderung stehen für die ersten Anlagen ab 2030, neben dem bereits seit längerem stattfindenden Rückbau von Windenergieanlagen an Land, dann vermehrt auch für diese Offshore-WEA's Rückbaumaßnahmen an. In einer umfassenden Studie zu möglichen Rückbauszenarien für Anlagen in der deutschen Außenwirtschaftszone in der Nordsee im Rahmen des Projekts SeeOff wurden dazu erste Betrachtungen zu aufkommenden Mengen, deren seeseitiger Logistik zu einem Hafen und den landseitig notwendigen Schritten bzgl. Annahme, Zwischenlagerung, Erstbehandlung, etc. anhand eines fiktiven Windparks mit 80 Anlagen der 3,6 MW-Leistungsklasse durchgeführt (SeeOff, 2022). Deutschland besitzt dafür derzeit keinen Hafenstandort mit entsprechender Infrastruktur.

**Dr.-Ing. Steffen Czichon**  
Abteilungsleiter  
Abteilung Rotorblatt  
beim Fraunhofer Institut  
für Windenergiesysteme IWES

**Dipl.-Ökon. Annette Schimmel**  
Projektleitung Green  
Economy bei der BIS  
Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH

**Dipl.-Ing. Niels Ludwig**  
Senior Engineer  
Abteilung Rotorblätter  
beim Fraunhofer Institut  
für Windenergiesysteme IWES

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

Tabelle 1  
Darstellung der abgeschätzten EoL-Massen (kummulierte Gesamtmassen über die betrachteten 5 bzw. 6 Jahreszeiträume) aus dem Rückbau der Deutschland (D) zugeordneten Offshore-WEA in der Nordsee

Offshore-WEA AWZ Nordsee	Einheit	Installation 2010-2015			Installation 2016-2020			Installation 2021-2026 (z.T. noch in Bau)		
Anlagengröße; Inst. el. Leistung	[MW]	4 MW	5 MW	6 MW	4 MW	6 MW	7/8 MW	8 MW	11 MW	15 MW
Anzahl WEA in D Nordsee	[Anzahl]	428	212	48	72	334	176	38	106	64
Material		Rückbau 2030-2035 [Gesamtmenge des Zeitraums]			Rückbau 2036-2040 [Gesamtmenge des Zeitraums]			Rückbau 2041-2045 [Gesamtmenge* des Zeitraums]		
Masse Rotorblatt (FVK)	[Mg]	34.500			41.600			22.500		
Masse Nabe	[Mg]	37.500			44.500			25.000		
davon Stahl/Stahlguss	[Mg]	36.700			43.200			24.250		
davon FVK	[Mg]	800			1.300			750		
Masse Gondel	[Mg]	122.000			155.000			75.000		
davon Stahl/Stahlguss	[Mg]	107.500			139.400			67.000		
davon FVK	[Mg]	4.000			5.300			3.000		
davon Elektrogeräte/Elektronik	[Mg]	10.500			10.300			5.000		
Masse Stahlurm	[Mg]	183.000			180.000			88.000		
Masse Transition Piece	[Mg]	206.000			183.000			88.000		
Masse Fundament Stahl	[Mg]	294.000			277.000			125.000		
Innerparkverkabelung	[Mg]	19.500			17.500			6.700		
Summe Gesamt:	[Mg]	896.500			898.600			430.200		
<b>Summe ohne Fundament und Transition Piece u. Innerparkverkabelung:</b>	<b>[Mg]</b>	<b>377.000</b>			<b>421.100</b>			<b>210.500</b>		
davon FVK	[Mg]	39.300			48.200			26.250		
davon Elektrogeräte/Elektronik	[Mg]	10.500			10.300			5.000		
davon Stahl/Gusseisen	[Mg]	327.200			362.600			179.250		
<b>Summe Fundament, Transition Piece</b>	<b>[Mg]</b>	<b>500.000</b>			<b>460.000</b>			<b>213.000</b>		
*)=wegen nur geringer Datenlage zu 11 und 15 MW Anlagen, Mengen auf Basis 8 MW mit Faktor 1,25 FVK = Faserverbundkunststoff										

Die Stadt Bremerhaven hat sich frühzeitig dieser Thematik gewidmet und das Projekt SeeOff der Hochschule Bremen intensiv mit begleitet. Um die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen am Hafen abschätzen zu können, die bei einer permanenten jährlichen Anlandung von rückgebauten Materialien von Offshore-WEA's ab 2030 vorzuhalten bzw. vorhanden sein müssten, wurden im Auftrag der BIS Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH (BIS) Mengenprognosen erstellt und damit verbundene technische und logistische Infrastrukturen zur Annahme am Hafen und zur notwendigen Erstbehandlung betrachtet (BIS, 2020).

Der folgende Beitrag geht auf Basis dieser grundlegenden Arbeiten auf die notwendigen Schritte ein, um die mit den Rückbauaktivitäten verbundenen finanziellen Wertschöpfungen und insbesondere auch die damit verbundenen Mengen an kritischen Rohstoffen im Sinne der nationalen Kreislaufstrategie auch für Deutschland sichern zu können. Dabei wurden die früheren Mengenabschätzungen adaptiert und auf Basis des heutigen Kenntnisstandes neu bewertet und die aktuelle Entwicklung von Behandlungs- und Verwertungsoptionen mit einbezogen.

## 2. Mengenprognose zum Rückbau von Offshore-WEA aus der Nordsee

Es wurden aus der Perspektive des Hafenstandortes Bremerhaven nur die Offshore-Anlagen in den deutschen Hoheitsgewässern und der deutschen aus-

schließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee betrachtet

Die Kabel von den Umspannwerken zu den Converterplattformen/Systeme zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) und diese Plattformen selbst sind im Eigentum des Netzbetreibers und wurden hier nicht mit einbezogen. Ebenso sind die Umspannplattformen nicht berücksichtigt worden, da diese je nach Nachnutzung der Flächen eventuell wieder mitgenutzt oder an anderen Stellen eingesetzt werden könnten.

Da eine jährliche Zuordnung nur bedingt möglich ist, wurden bei den Prognosen zu anfallenden End of Life-(EoL)-Materialien jeweils 5 bzw. 6 Jahreszeiträume betrachtet; ausgehend von einer Betriebslaufzeit der Windturbinen von 20 Jahren. Auf Basis der bis 2026 installierten WEA-Leistungen in der Nordsee und nach ersten Recherchen bzgl. der verbauten Massen wurden die in Tabelle 1 dargestellten zugeordneten EoL-Massen, die bei einem Rückbau ab ca. 2030 zu erwarten sein werden, abgeschätzt. Beim Kolkschutz wurde davon ausgegangen, dass er auf dem Meeresboden verbleibt. Bei den installierten Monopiles und Pfählen der Tripods (Ramppfähle mit Tiefen bis zu 40m–60m unterhalb des Meeresgrundes) wird von einem Abschneiden bei 1–2m unterhalb des Meeresspiegels ausgegangen. Entsprechend wurden die Massen der Gründung nur zu 50% als EoL-Material berücksichtigt.

### 2.1 Rückbauszenario

Aufbauend auf den oben dargestellten Mengenschätzungen ist ein als realistisch erachtetes Basis-Szenario

Material		Rückbau 2030-2035 [Gesamtmenge pro Jahr*]	Rückbau 2036-2040 [Gesamtmenge pro Jahr*]	Rückbau 2041-2045 [Gesamtmenge pro Jahr*]
Masse Rotorblatt (FVK)	[Mg]	4.000	5.700	5.400
Masse Nabe	[Mg]	4.400	6.100	6.000
davon Stahl/Stahlguss	[Mg]	4.300	5.920	5.820
davon FVK	[Mg]	100	180	180
Masse Gondel	[Mg]	14.200	21.300	18.000
davon Stahl/Stahlguss	[Mg]	12.510	19.140	16.080
davon FVK	[Mg]	460	730	720
davon Elektrogeräte/Elektronik	[Mg]	1.230	1.430	1.200
Masse Stahlurm	[Mg]	21.300	24.800	21.000
Masse Transition Piece	[Mg]	24.000	25.200	21.000
Masse Fundament Stahl	[Mg]	34.200	38.100	30.100
Innerparkverkabelung	[Mg]	2.300	2.400	1.600
Summe Gesamt:	[Mg]	104.400	123.600	103.100
<b>Summe ohne Fundament und Transition Piece u. Innerparkverkabelung:</b>	<b>[Mg]</b>	<b>43.900</b>	<b>57.900</b>	<b>50.400</b>
davon FVK	[Mg]	4.560	6.610	6.300
davon Elektrogeräte/Elektronik	[Mg]	1.230	1.430	1.200
davon Stahl/Gusseisen	[Mg]	38.110	49.860	42.900
<b>Summe Fundament, Transition Piece</b>	<b>[Mg]</b>	<b>58.200</b>	<b>63.300</b>	<b>51.100</b>

\*)=Gesamtmenge als mittleres Gewicht über alle Leistungsklassen und deren jeweilige Anzahl an WEA im betrachteten Zeitraum bezogen auf 80 WEA/a von 2030 bis 2040, ab 2041 bis 2045 bezogen auf 50 WEA/a;  
FVK = Faserverbundkunststoff

Tabelle 2  
Abgeschätzte jährliche EoL-Massen an Anlagenkomponenten bzw. Materialien aus dem Rückbau der Deutschland (D) zugeordneten Offshore-WEA in der Nordsee

zum Rückbau von WEA aus dem Offshorebereich entwickelt worden, das insbesondere die Aufgaben auf der Hafenseite betrachtet. Diese konzentrieren sich auf die relevanten Kernprozesse zur Annahme der demontierten Anlagenteile an einem Hafenstandort und deren notwendigen Erstbehandlung. Unberücksichtigt bleiben die derzeit nur vage absehbaren Rückbau- und Logistikverfahren vor-Ort auf See, insbesondere der in Zukunft dafür dann eingesetzten Arbeitsschiffe und Transporteinheiten.

Es wurde ein notwendiger Zeitaufwand zur Demontage einer WEA von rd. 2 Tagen (ohne Fundament, Transition Piece und Kabelrückbau) und ein wetterbedingtes Zeitfenster von rd. 150 Tagen/a für die Arbeiten auf hoher See zugrunde gelegt. In dem Szenario wird von einem Rückbau von rd. 70–80 Anlagen/a ausgegangen. Dies entspricht weitgehend einem Windpark, wie er häufiger in den Jahren 2010 bis 2020 errichtet wurde.

Im Folgejahr würden die Fundamente der 70–80 Anlagen, für deren Demontage inkl. Transition Piece analog der Zeitspanne zur Errichtung rd. 2 Tage pro Anlage angesetzt wurden, und die Innerparkverkabelung rückgebaut. Parallel dazu findet an einem anderen Windparkstandort der Abbau von weiteren 70–80 WEA statt, die ebenfalls in dem zeitlichen Rahmen des Kalenderjahres angelandet werden. Ein entsprechendes Szenario würde sich auch für die nächsten Jahre bis 2040 so einstellen. Im Zeitraum 2041 bis 2045 wird in Folge der geringeren Installationen in den Jahren 2021 bis 2025 ein jährlicher Rückbau von 40–50 Anlagen per anno unterstellt, auch wenn Riffgrund 3 mit 83 Anlagen a 11 MW oder He Dreihit mit 64 Anlagen a 15 MW hier eine größere Anzahl an Anlagen umfassen.

Es wurde ferner unterstellt, dass beim Rückbau keinerlei Entfernung von Betriebsmitteln auf See erfolgt.

Die Anlagenkomponenten wie Nabe und Gondel sind aufgrund genehmigungsrechtlicher Anforderungen bereits so konzipiert, dass diese die gesamte Menge an vorhandenen Betriebsmitteln im Falle einer Leckage auffangen können.

## 2.2 Abgeschätzte jährlich anlandende Mengen an EoL-Materialien aus dem Rückbau

Windenergieanlagen bestehen aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Bei den nachfolgenden Betrachtungen wurden insbesondere die mengenmäßig relevanten Hauptkomponenten von WEA berücksichtigt:

- ◆ Gondel/Maschinenhaus mit Getriebe, Generatoren inkl. aller Betriebsstoffe, Betriebsmittel und Elektrogeräte
- ◆ Nabe (z. T. inkl. Betriebsmitteln, Pitchmotoren)
- ◆ Rotorblätter (inkl. Sensorik, Metallbolzen, Blitzschutzeinrichtungen)
- ◆ Turm(-segmente)
- ◆ Transition Piece (z. T. inkl. Elektronikgeräte, eventuell Betriebsmitteln)
- ◆ Fundamentbauteile (häufig Monopiles)
- ◆ Mittelspannungskabel aus der Innerparkverkabelung

Ausgehend von den rd. 70–80 Anlagen pro Jahr bzw. ab 2041 von rd. 40–50 Anlagen ergeben sich auf Basis abgeschätzter Massen für die einzelnen Leistungsklassen die in Tabelle 2 zusammengefassten Mengen.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, nimmt ab 2041 die Anzahl an rückgebauten Anlagen per anno ab, doch durch die deutlich größeren Anlagen der 11 bzw. 15 MW-Klasse hat dies hier auf die jährlich anlandenden EoL-Massen keinen größeren Einfluss. Die jährlichen Gesamtmenen liegen ab 2031 (im ersten Jahr mit der parallelen Annahme von Windturbinen und Grün-



# Ihre volle Ladung Energie!



## Handbuch Wind- und Solarprojekte

Herausgegeben von **Thomas Schulz**,  
Rechtsanwalt, Linklaters LLP, Berlin

2., völlig neu bearbeitete und wesentlich  
erweiterte Auflage 2025, LXXII, 1.874 Seiten,  
fester Einband, mit Online-Zugang zu einer  
energierechtlichen Vorschriftendatenbank,  
€ 248,-. ISBN 978-3-503-19932-7  
eBook: € 225,90. ISBN 978-3-503-19933-4

Mit der aktualisierten und erweiterten Neuauflage des **Handbuchs Wind- und Solarprojekte** erhalten Sie das perfekte Rüstzeug, um erneuerbare Energieprojekte zügig, umfassend und vor allem rechtssicher zu realisieren. Im Fokus: rechtlich und steuerlich relevante Themen, die bei Wind- und Solarprojekten zum Tragen kommen.

### Ihr Mehrwert auf einen Blick

- ▶ **praxisgerechte und umfassende Darstellung** dank versierter Fachleute mit langjähriger Erfahrung
- ▶ **praxisrelevante Schwerpunkte:** Regulierung, Planung und Genehmigung, Grundstücksrecht, Projektverträge und Versicherung, Projektfinanzierung und Fonds, Steuern sowie M&A-Transaktionen und Beteiligungsmodelle
- ▶ **topaktuell:** EEG-Novelle 2023, WindBG, Solarpaket I sowie Änderungen im BauGB
- ▶ **Bonus:** laufend aktualisierte **Datenbank** mit wichtigen energierechtlichen Vorschriften (**EU/Bund/Länder**)



Online informieren  
und versandkostenfrei bestellen:  
[www.ESV.info/19932](http://www.ESV.info/19932)

ESV LIZENZEN

Versprochen! Zum eBook finden wir für Sie immer die richtige Lösung.

 (030) 25 00 85-150

 [ESV-Lizenzen@ESVmedien.de](mailto:ESV-Lizenzen@ESVmedien.de)

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder  
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](mailto:ESV@ESVmedien.de) · [www.ESV.info](http://www.ESV.info)

**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

*Auf Wissen vertrauen*

dingsstrukturen inkl. Transition Pieces) in diesem Szenario jeweils zwischen rd. 100.000 bis 120.000 Mg/a.

Mit der hier unterstellten Kapazität an einem Hafenstandort für 50 bis 80 WEA-Anlagen per anno können in dem Zeitraum 2030 bis 2040 nicht alle von 2010 bis 2020 in deutschen Hoheitsgewässern und der deutschen AWZ installierten 1270 WEA's aus der Nordsee verarbeitet werden. Es ist davon auszugehen, dass andere Häfen, u. a. auch in Dänemark und den Niederlanden, sich am Markt ebenso beteiligen werden, so dass der Aufbau einer Kapazität in Deutschland für rd. 70–80 WEA aus der Nordsee in einem ersten Schritt als zielführend angesehen werden kann (siehe auch Kap. 6).

### 3. Notwendige Infrastruktureinheiten und Flächen an einem Hafenstandort

Die im Folgenden dargestellten Punkte stellen eine Zusammenfassung über die Mindestausstattung zur Annahme am Hafen und zur Erstbehandlung dar.

#### 1) Annahme und Transport zur Ablagefläche:

Die Annahme von Komponenten der WEA erfolgt durch Entladung der Schiffe mit geeigneten Kraneinheiten (schiffs- oder landseitige Drehkräne, Mobilkräne) und die Bereitstellung der Komponenten auf der notwendigen Zwischenlagerfläche. Für die Verbringung der Komponenten sind weitere Transportmittel, wie beispielsweise Self-Propelled Modular Transporter (SPMT) mit 6 bis 8 Achsen für die schweren Komponenten sowie Reachstacker (Greifstapler) für die weniger schweren Teile vorzuhalten.

#### 2) Ablagefläche, Zwischenlagerung:

Wie oben in Kapitel 2.1 dargelegt, wird von einem witterungsbedingten Zeitfenster für die Arbeiten auf See von rd. 150 Tagen im Jahr ausgegangen, in dem 80 WEA-Anlagen und 80 Gründungsstrukturen/TP anzunehmen und einer Erstbehandlung zuzuführen sind. Setzt man für diese Erstbehandlung der WEA ohne Gründung/TP zeitlich ca. 1,5 bis 2 Arbeitstage pro WEA an und zur Erstbehandlung der Gründungsstrukturen/TP ca. 3 Arbeitstage (SeeOff, 2022), wird deutlich, dass entsprechende Zwischenlagerungsflächen vorzuhalten sind.

#### 3) Notwendige Erstbehandlungsmaßnahmen

Im Folgenden werden die wichtigsten Maßnahmen einer notwendigen Erstbehandlung aufgeführt:

- ◆ Entfernung und Sammlung sämtlicher Betriebsmittel (neben wassergefährdenden Stoffen auch SF<sub>6</sub>-Schutzgas)
- ◆ Trennung Betriebsstrang (Getriebe, Generatoren etc.), Transformatoren, Mittelspannungsanlagen aus Gondel bzw. Transition Piece
- ◆ Entkernung Turm, Nabe, TP und Gondel u. a. von Schmier-/Fettsystemen, Hydraulikaggregaten, Elektronikgeräten, Schaltanlagen
- ◆ Zwischenlagerung und Bereitstellung der separierten Bauteile, Elektronikgeräte, Batterien, ölschmutzter Betriebsmittel (u. a. Schmier-/Fettsysteme), etc.
- ◆ Zerkleinerung von Stahl-/Gusseisenkomponenten zum Abtransport zur Schrottaufbereitung (Gondelgerüst, Nabe, Turm, Fundament, Transition Piece) durch Brennschneiden, mit Erfassung der Brenn-

schlacken und Emissionen u. a. Brennhauben; alternativ Zerteilung durch hydraulische Schrottscheren oder mittels Wasserstrahlschneiden.

- ◆ Schneiden, Sägen der Rotorblätter und GFK-Komponenten (Gondel- und Nabenverkleidung) zur gezielten Vorbehandlung; Trennung der CFK-Gurte von der GFK-Matrix; Erfassung der Sägespäne und -stäube, u. a. eingehauster Sägebereich
  - ◆ Zerlegung Getriebe, Generatoren (inkl. Entmagnetisierung PM), Transformatoren, Schaltanlagen auf Transportmaße
  - ◆ Zerteilung Mittelspannungskabel auf Transportmaße
- #### 4) Zwischenlagerflächen, Behandlungsplätze sowie Bereitstellungs- und Umschlagsflächen für die Outputströme

Bei der Planung der Größe der benötigten Lagerflächen und Behandlungsplätze sowie der Bereitstellungs- und Umschlagsflächen wird schnell deutlich, dass für die bis zu 80 anfallenden EoL-Anlagen per anno und bis zu 80 Gründungs- und TP-Strukturen angepasste Strategien zur Bearbeitung entwickelt werden müssen. Hier sind die Geschäfts- und Kostenmodelle der potenziell tätigen Unternehmen, die die operative Tätigkeit ausführen, entscheidend:

- ◆ Kosten-/Nutzenanalyse bzgl. Wertschöpfungsketten vor-Ort
- ◆ Durch einen höheren Personaleinsatz und ein Mehrschichtsystem kann die Anzahl der Behandlungsplätze reduziert werden.
- ◆ Durch große Flächen für die Zwischenlagerung von Komponenten können die notwendigen Tätigkeiten zeitlich entzerrt werden.
- ◆ Durch eine geringere Aufbereitungstiefe, beispielsweise direkte Weitergabe von größeren Gussteilen zur externen Behandlung in Fallgruppen etc., können die im Bewertungs- und Entsorgungszentrum durchzuführenden Tätigkeiten deutlich reduziert werden, was den Platzbedarf für die Zwischenlagerung und Behandlung reduziert, da dann nur soweit zerkleinert wird, dass eine Transportfähigkeit hergestellt wird.
- ◆ Durch einen hohen Automatisierungsgrad bei der Zerlegung der Stahlstrukturen und der Rotorblätter lassen sich Personal, Flächenausnutzung und Wertschöpfungsketten optimieren (siehe Kapitel 4).

Letztendlich bestimmt die Geschäftsphilosophie und Kosten-Nutzen-Bilanzierung der operativ tätigen Unternehmen über die bereitzustellende Infrastruktur und die damit verbundenen Flächen.

In dem Projekt SeeOff wurde eine Hafenfläche von 6 ha für diese Tätigkeiten in dem Basisszenario für 80 Windenergieanlagen der Leistungsklasse 3,6 MW angegeben, wobei hier ein 2 Schichtensystem pro Arbeitstag zur Demontage und Zerkleinerung unterstellt ist. Zwischenlagerflächen sowie Rangier- und Umfahungsflächen, inklusive Lagerflächen zum Umschlag der Outputströme sind hier sehr kompakt gehalten. Für 80 Anlagen inklusive Gründungselemente und Transition Piece ergeben sich auf Basis des in Kapitel 1 genannten Gutachten für die BIS benötigte Behandlungsflächen inklusive Rangier-, Umfahungs- und Umschlagsare-

ale für die Outputströme von insgesamt 2,5 ha. Dazu werden je nach seeseitigem Logistikkonzept und der Aufbereitungstiefe bei der Erstbehandlung Zwischenlagerflächen benötigt. Geht man von max. 8–10 Anlagen die gleichzeitig zwischengelagert werden müssen, dann ergibt sich hier ein Flächenbedarf von rd. 2,7 ha für die kleineren 4 MW-Anlagen bis zu 3,5 ha für Anlagen der 8 MW Leistungsklasse. Um zukünftig auch die noch größeren Windenergieanlagen (11 bis 15 MW) annehmen und behandeln zu können, sollte für die Zwischenlagerung und Behandlungsflächen ein zusätzlicher Puffer an Fläche vorgehalten bzw. je nach Bedarf eine Erweiterung möglich sein.

In anderen Publikationen wurden für derartige Lagerungs- und Bereitstellungsflächen je nach Windparkgröße 5 bis 15 ha genannt (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022; Wagner et al., 2013) nach SeeOff, 2022).

#### 4. Optimierte Behandlungskonzepte für die EoL-Materialien

Das Fraunhofer IWES ist in Forschungsprojekten aktiv, die auf die Entwicklung eines umfassenden Recyclingzentrums für Rotorblätter abzielen. Hierbei steht die semiautomatisierte Zerlegung der Rotorblätter mit einer Trennung der Wertstoffe im Vordergrund. Letztendlich sollen die einzelnen Materialien im Faserverbund Rotorblatt wie Glas- und Kohlefaser, Aluminium und Kupfer sowie die Sandwichmaterialien wie Balsaholz und Kunststoffschäum voneinander getrennt zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. So kann aus dem Balsaholz ein Isoliermaterial hergestellt oder zur Produktion von Terrassendielen genutzt werden. Die Trennung der Glas- bzw. Carbonfasern aus dem Faserverbundkunststoff im Rotorblatt erfolgt durch ein thermisches Verfahren (Pyrolyse) oder über eine chemische Matrixauflösung (Solvolyse). Beide Verfahren bieten das Potenzial sie in Zukunft großtechnisch einzusetzen. Für die Glasfaser sind erste Ansätze zum Wiedereinschmelzen gemacht worden. Zukünftig steht im Fokus, die gewonnenen Werkstoffe soweit möglich wieder in Rotorblättern einzusetzen.

Die Firma Leviathan GmbH hat ein innovatives Konzept zur Zerlegung von Schiffsrümpfen mittels Wasserstrahlschneiden entwickelt, welches sich auch auf die Zerlegung von Stahltürmen und der Fundamente inklusive Transition-Pieces (TP) der rückgebauten Windenergieanlagen adaptieren lässt. Dieses Konzept basiert auf automatisierten, emissionsarmen Verfahren mittels Robotern (Leviathan, 2023).

Auch wenn die vorgenannten semi- und vollautomatischen Zerlegungsansätze bzw. -konzepte erst noch einen stabilen Betrieb unter Dauerbetrieb und ihre Wirtschaftlichkeit nachweisen müssen, so sollten aber zumindest dafür Flächen für eine derartige Behandlung abgeschätzt und nach Möglichkeit als potenzielle Ausbaufächen mit eingeplant werden. Dies gilt insbesondere für die mengenmäßig im Vordergrund stehenden Stahl- und Gusseisenmaterialien (siehe Tabelle 2).

Die Integration solcher Konzepte in die Hafenumgebung ist zielgerichtet, um damit die weiterführende Wertschöpfung nach einer Erstbehandlung von WEA

aus dem Offshore-Bereich dann auch vor-Ort umsetzen zu können. Durch die damit verbundene stationäre semi- bzw. vollautomatische Zerlegung und Aufbereitung bis hin zur Sekundärstoffqualität zum Einsatz als Rohstoffsubstituent sind ferner deutliche Vorteile bei den Luftemissionen gegenüber einer ansonsten in der Regel erfolgende dezentralen Zerkleinerung mittels Brennschneiden im Falle der Stahl- und Gussmaterialien bzw. mittels Sägen der Faserverbundstoffe zu erreichen.

#### 5. Notwendige vorbereitende Umsetzungen zur Beteiligung an zukünftigen Ausschreibungen zum Rückbau von Offshore Windparks

Der Betrieb von Offshore-WEA wurde in deutschen Gewässern in der Regel für 25 Jahre genehmigt. Der Vergütungsanspruch für den erzeugten Strom wird gemäß dem zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme geltendem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) jedoch nur für 20 Jahre plus dem Jahr der Inbetriebnahme gewährt. Erfahrungen über realistische Betriebszeiten von Offshore-Windenergieanlagen liegen noch nicht im ausreichenden Maße vor. Ebenso fehlen Erfahrungen zum Repowering, das zu einem frühzeitigeren Austausch von WEA und damit zu einem vorzeitigen Anfall von End-of-Life-Massen zur Entsorgung führt. Die Mengenabschätzungen sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Zudem ist derzeit nicht erkennbar, welche Techniken und insbesondere Logistikkonzepte letztendlich beim Rückbau auf See eingesetzt werden.

Auf der anderen Seite wird es notwendig sein, als potenzieller Anbieter der dafür notwendigen landseitigen Leistungen sich bereits im Vorfeld von zukünftigen Ausschreibungen bzw. Anfragen der Betreiber entsprechende Anlagenkonzepte zur Zwischenlagerung und Erstbehandlung auf geeigneten Flächen an einem Hafenstandort genehmigen zu lassen, soweit nicht bereits bestehende genehmigte Anlagen vorhanden sind.

Letztendlich wird man hierfür eine Vorplanung und eine darauf aufbauende Genehmigungsplanung mit noch offenen Fragen bzgl. eingesetzter Technik erstellen müssen. Eine diesbezügliche lieferantenunabhängige Genehmigungsplanung sollte sich auf Basis der in Kap. 3 und 4 beschriebenen Aufgaben und Behandlungsschritte an einer maximalen Wertschöpfungstiefe für Stahl und Gusseisen als Hauptmaterialstrom vor-Ort mit entsprechendem Maschineneinsatz orientieren. Für alle zur Erstbehandlung benötigten technischen Verfahren liegen in der Regel ausreichende Kenntnisse aus der Behandlung von Stahl, Gusseisen und Faserverbundstoffen und zu den davon ausgehenden Emissionen vor, um damit konkrete Umwelteinflüsse im Rahmen der Genehmigungsantragsstellung nach BImSchG auch abbilden zu können.

Die bauliche Umsetzung und die Festlegung bezüglich der letztendlich zum Einsatz kommenden Verfahren und Techniken wird sicherlich erst nach erfolgtem Zuschlag bei einer Ausschreibung erfolgen. Für diese Umsetzung bedarf es dann einer Änderungsgenehmigung auf Basis der dann vorliegenden Maschinenaufstellpläne und des Betriebskonzeptes.

## 6. Ausblick

Die Bremerhavener Wirtschaftsförderung BIS hat sich bereits Anfang der 2000er Jahre für den systematischen Aufbau der (Offshore-)Windindustrie engagiert. Im Zuge dessen wurden in Bremerhaven im südlichen Fischereihafen schwerlastfähige Infrastrukturen errichtet und Hersteller von Windkraftkomponenten angesiedelt. Auch im Norden von Bremerhaven, auf dem Auto- und Containerterminal, wurden für die Branche geeignete Ertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt, so dass von Bremerhaven aus die ersten deutschen Offshore-Windparks installiert und betrieben werden konnten. Durch die Ansiedlung neuer bzw. Weiterentwicklung bestehender Unternehmen und wissenschaftlicher Einrichtungen wurde in Bremerhaven umfangreiches Know-how aufgebaut.

Nach einer Phase der Konsolidierung der Branche und dem zuletzt stockenden Ausbau der Offshore-WEA wurden in der Region allerdings zahlreiche der dadurch neu entstandenen Arbeitsplätze wieder abgebaut bzw. an andere Hafenstandorte (u. a. Cuxhaven) verlagert.

Für den nun festgelegten massiven Ausbau der erneuerbaren Energien in der Nordsee ist ein deutlicher Ausbau an Hafeninfrasturktur für die Errichtung der zusätzlichen Windparks notwendig. Das Ausbauziel für Windenergie auf See steigt gemäß dem Windenergiegesetz bis 2030 auf mindestens 30 Gigawatt (GW). Bis 2035 sollen mindestens 40 GW und bis 2045 mindestens 70 Gigawatt installierte Leistung erreicht werden. Parallel zu diesem massiven Ausbau vom derzeitigen Ist von 8,5 GW (Stand 31.12.2023) werden ab 2030 dann parallel dazu erste Rückbaumaßnahmen von Windparks einsetzen. Dafür möchte die Stadt jetzt die Chance nutzen, sich für dieses neue Marktsegment frühzeitig aufzustellen. Es gilt also, wie in der Vergangenheit, der Branche geeignete Rahmenbedingungen wie (Hafen-)Infrastrukturen und Industrieflächen zur Verfügung zu stellen.

Die Lage der Flächen wird maßgeblich durch das vorgesehene Logistikkonzept bestimmt: Werden zum Rückbau große Kranschiffe (also die ehemaligen Installationsschiffe) eingesetzt, die die deinstallierten Komponenten auch zum Hafen transportieren, kommen nur Hafeninfrasturkturen in Frage, die direkt am seeschifftiefen Wasser bzw. hinter einer ausreichend großen Schleuse liegen. Die Komponenten werden dann mit dem Schiffskran entladen, zwischengelagert und zu den Behandlungsplätzen gebracht. Hierfür kämen dann Flächen auf dem Container- oder Autoterminal in Frage. Wenn sich der Rückbau am Feeder-Konzept orientiert, bei dem auf hoher See die WEA demontiert und auf kleinere Schiffe verladen werden, kommen auch Hafeninfrasturkturen hinter einer kleineren Schleuse in Frage.

Aufgrund der sich bereits jetzt abzeichnenden Größensteigerungen der Windenergieanlagen auf See müssen die rückzubauenden Offshore-Komponenten langfristig mit großen Kranschiffen an Land gebracht und möglichst in Kajennähe weiterbehandelt werden. Auf dem Container- und Autoterminal sind die für einen kontinuierlichen Betrieb benötigten Flächen zu knapp. Deshalb käme für das (große) Rückbau- und Recyclinggeschäft von Offshore-WEA nur der Bau eines

neuen schwerlastfähigen Hafens direkt am seeschifftiefen Wasser in Frage.

Eine solche Hafeninfrasturktur wird in Bremerhaven unter dem Arbeitstitel „Energy Port“ im Rahmen einer Bedarfs- und Nutzerstudie diskutiert. Der Nutzungsoption „Rückbau und Recycling“ wird in diesem Zusammenhang ein gutes Marktpotenzial für den Standort bescheinigt. Die Verfasser der Studie empfehlen demzufolge, die Kaje so zu entwickeln, dass auch Rückbau und Recycling erfolgen können. Dies bedeutet, dass neben einer entsprechenden Infra- und Suprastruktur auch eine Genehmigung für die skizzierten Erstbehandlungsmaßnahmen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) vorliegen muss, wenn der EnergyPort als Standort für den Rückbau und das Recycling von Offshore-WEA vermarktet werden soll.

Um eine passgenaue Infra- und Suprastruktur inkl. eine Genehmigung nach BImSchG zu erhalten, böte sich also begleitend zum Bau des EnergyPorts eine Kooperation mit folgenden Stakeholdern an:

- ◆ Hersteller der auf See verbauten Windenergieanlagen
- ◆ Betreiber der Windparks in der Nordsee
- ◆ Aufbereitungs- und Entsorgungsunternehmen
- ◆ seeseitige Logistikunternehmen
- ◆ ein möglicher Terminalbetreiber

Über eine gemeinsame Projektgesellschaft ließen sich die notwendigen nicht unerheblichen finanziellen Aufwendungen für die lieferantenunabhängige Genehmigungsplanung breiter streuen.

Nur mit einer bereits vor dem ersten Rückbau eines Offshore-Windparks genehmigten Zwischenlager- und Erstbehandlungsfläche nach BImSchG ist eine Sicherung dieser Materialströme für Deutschland aus dem ab ca. 2030 startenden Rückbau von Offshore-WEA gegeben. Die EoL-Materialien aus den Windenergieanlagen enthalten neben Stahl, Gusseisen und FVK auch nicht unerhebliche Mengen an kritisch und strategisch eingestufte Rohstoffe, wie Aluminium, Kupfer oder Metalle der Seltenen Erden. Die Sicherung dieses Stoffstroms ist insbesondere im Sinne der nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie geboten. Gleichzeitig erhält man mit dieser frühzeitigen Planung und Genehmigung die Chance, die Wertschöpfung in der Region heben zu können. Eine Projektgesellschaft unter Einschluss von Herstellern und Betreibern erhöht dabei zusätzlich die Chancen auf den Zugriff dieser Mengenströme.

### Literatur

- Leviathan 2023:** <https://www.thb.info/rubriken/umwelt/detail/news/leviathan-mit-schiffsrecycling-in-stralsund.html>, letzter Zugriff 27.7.24
- BIS 2020:** windconsultant-Annette Nüsslein; Abschlussbericht „Konzept für den Aufbau eines Verwertungs- und Entsorgungszentrums für Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen in Bremerhaven“ im Auftrag der BIS Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH, Düsseldorf 28.7.2020, unveröffentlicht
- SeeOff 2022:** Eckardt, S. et.al: Handbuch zum Rückbau von Offshore-Windparks – Rahmenbedingungen, Technik, Logistik, Prozesse, Szenarien und Nachhaltigkeit, Hochschule Bremen; <https://doi.org/10.26092/elib/1469>, letzter Zugriff 31.7.24
- Windguard 2024:** Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland – Jahr 2023, Deutsche Windguard GmbH, 30. Jan. 2024

### Anschrift der Autoren

**Niels Ludwig**  
Fraunhofer-Institute für Windenergiesysteme IWES  
Großer Westring 2  
27572 Bremerhaven



# Back to basics!

Rohstoffe sind nicht nur für die industrielle Wertschöpfung unerlässlich; eine nachhaltige Rohstoffnutzung ist auch essenziell für einen effektiven Umwelt- und Klimaschutz.

Das **brandneue** Handbuch von **Prof. Dr. Walter Frenz** und einem interdisziplinären Expertenteam liefert in über 40 Beiträgen eine umfassende Gesamtdarstellung dieses vielschichtigen Arbeits- und Beratungsfelds.

## Ihr Mehrwert im Überblick

- ▶ aktuelle Anwendungsfragen in Praxis und Forschung
- ▶ Beiträge aus den Bereichen Recht, Ingenieur- und Naturwissenschaften, Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Digitalisierung
- ▶ globale Standpunkte zu den USA, Brasilien, Kolumbien, China, Indien, der Mongolei und dem südlichen Afrika

## Handbuch Rohstoffwirtschaft

**Recht, Ingenieur- und Naturwissenschaften,  
Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Digitalisierung**

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz  
2025, 1.145 Seiten, mit zahlreichen farbigen  
Abbildungen, Übersichten und Praxisbeispielen,  
fester Einband, € 149,-. ISBN 978-3-503-23744-9  
eBook: € 135,90. ISBN 978-3-503-23745-6



Online informieren  
und versandkostenfrei bestellen:  
[www.ESV.info/23744](http://www.ESV.info/23744)

ESV LIZENZEN

Versprochen! Zum eBook finden  
wir für Sie immer die richtige Lösung.

 (030) 25 00 85-150  
 [ESV-Lizenzen@ESVmedien.de](mailto:ESV-Lizenzen@ESVmedien.de)

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder  
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](mailto:ESV@ESVmedien.de) · [www.ESV.info](http://www.ESV.info)

**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

*Auf Wissen vertrauen*