HINTERGRUNDPAPIER

FACHAGENTUR
WIND UND SOLAR

WIND

Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen

Status quo, rechtliche Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen

Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen

Status quo, rechtliche Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen

Claudia Bredemann
Peter Rauschenbach, Prometheus Rechtsanwaltsgesellschaft mbH (Kapitel 3)
Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg, Vorstand der RDRWind e. V. (Kapitel 4)

Impressum

Herausgegeben von:
Fachagentur Wind und Solar e. V.
Fanny-Zobel-Straße 11 | 12435 Berlin
www.fachagentur-wind-solar.de
post@fa-wind-solar.de

V. i. S. d. P.: Dr. Antje Wagenknecht

Die Fachagentur Wind und Solar e.V. ist ein gemeinnütziger Verein. Er ist eingetragen beim Amtsgericht Charlottenburg, VR 32573 B.

Autorenschaft: Claudia Bredemann, Peter Rauschenbach, Prometheus Rechtsanwaltsgesellschaft mbH (Kapitel 3), Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg, Vorstand der RDRWind e. V. (Kapitel 4)

Bei Fragen und Anregungen nehmen Sie bitte per E-Mail Kontakt auf: bredemann@fa-wind-solar.de

Stand: Januar 2026

Zitiervorschlag: FA Wind und Solar (2026), Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen.

Haftungsausschluss: Die in dieser Dokumentation enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt. Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

Gestaltung: DreiDreizehn Werbeagentur GmbH, www.313.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **5**

Tabellenverzeichnis **5**

Zusammenfassung **6**

1 Einleitung **7**

2 Grundlagen des Rückbaus und Recyclings von Windenergieanlagen **8**

2.1 Altersstruktur des Anlagenbestands in Deutschland 8

2.2 Aufbau und Komponenten einer Windenergieanlage 9

2.2.1 Fundament 10

2.2.2 Turm und Gondel 10

2.2.3 Rotor 10

2.2.4 Elektrische Komponenten 10

2.3 Gründe für den Rückbau 11

3 Rechtliche Rahmenbedingungen **12**

3.1 Rückbau von Windenergieanlagen 12

3.1.1 Rechtsgrundlagen 12

3.1.2 § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB 12

3.1.3 Rückbauanordnung 18

3.1.4 Reichweite der Rückbauverpflichtung 19

3.2 Recycling von Windenergieanlagen 21

3.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz 21

3.2.2 Sonstige relevante Vorgaben 23

4 E-DIN 4866 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen“ **24**

5 Rückbau und Demontage **26**

5.1 Planung der Rückbauphase 26

5.2 Schritte der Demontage 27

5.2.1 Stilllegung und Trockenlegung 27

5.2.2 Rotorblatt- und Gondeldemontage 28

5.2.3 Turmdemontage 28

5.2.4 Entfernen der Fundamente 28

5.2.5 Rückbau der Wege und der Kranstellflächen 29

6 Wiederverwendungs- und Recyclingmöglichkeiten 30
6.1 Zweitmarkt von Windenergieanlagen 30
6.2 Recycling von Stahl und sonstigen Metallen 31
6.3 Recycling und Weiterverwendung von Beton, Stahlbeton, Schotter 31
6.4 Recycling und Verwertung von Rotorblättern (GFK/CFK-Problematik) 32
6.4.1 Verwertung und Recycling von Glasfaserkomponenten (GFK) 32
6.4.2 Verwertung und Recycling von Carbonfaserkomponenten (CFK) 33
6.4.3 Mengenprognosen 35
6.5 Weitere Komponenten und Materialien 36
6.5.1 Batterien und Akkumulatoren 36
6.5.2 Elektronische Komponenten 36
6.5.3 Generatoren, Antriebsstrang, Kabel 36
6.5.4 Permanentmagnete 36

7 Aktuelle Entwicklungen in Forschung und Innovationen 38
7.1 Einleitung/Überblick 38
7.2 Aktuelle Forschungsprojekte 38
7.2.1 Laufende Projekte 38
7.2.6 Abgeschlossene Projekte 40

Anhang 42

Literatur- und Quellenverzeichnis 43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Installierte Windenergieleistung nach Jahr der Inbetriebnahme (magenta = ausgefördert) 8
Abbildung 2: Quartalsweise stillgelegte Windenergieleistung in Deutschland 9
Abbildung 3: Aufbau einer Windenergieanlage 9
Abbildung 4: Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz 21
Abbildung 5: Zeitablaufplan für den Rückbau eines Windparks 26
Abbildung 6: Kreislaufwirtschaftspfade bereits zurückgebauter WEA 30
Abbildung 7: Prognose Rotorblattmengen (t) GFK-Typ aus dem Rückbau von Windenergieanlagen (Stand installierte Anlagen 31.12.2024) 35
Abbildung 8: Prognose Rotorblattmengen (t) GFK/CFK-Typ aus dem Rückbau von Windenergieanlagen (Stand installierte Anlagen 31.12.2024) 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteile am Gesamtgewicht einer Windenergieanlage 9
Tabelle 2: Ländervorgaben zum Rückbau von Windenergieanlagen 42

Zusammenfassung

Der Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen gewinnen im Zuge der Energiewende zunehmend an strategischer Bedeutung. Während der Schwerpunkt in den vergangenen Jahrzehnten primär auf dem Ausbau der Windenergie lag, rücken heute auch Fragen nach dem nachhaltigen Umgang mit ausgedienten Anlagen in den Fokus. In Deutschland werden bis 2035 tausende Windenergieanlagen das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreicht haben. Dies bringt ökologische, ökonomische und regulatorische Herausforderungen gleichermaßen mit sich.

Der Rückbau einer Windenergieanlage ist ein komplexer, mehrstufiger Prozess, der weit über die reine Demontage hinausgeht. Er umfasst die sichere Stilllegung, die Trennung der Materialien, deren sachgerechte Behandlung sowie die Rückführung in Verwertungs- und Entsorgungssysteme. Besonders relevant ist dabei die fachgerechte Handhabung von Gefahrstoffen wie Ölen, Schmiermitteln oder SF_6-Gas. Auch die Entsorgung und Wiederverwendung großer Materialmengen aus Beton, Stahl, Kupfer und Faserverbundstoffen ist von Bedeutung. Rechtlich bildet ein Geflecht aus Bundes- und Landesvorschriften, Umweltrecht, Abfallgesetzgebung und Genehmigungsauflagen den Rahmen, innerhalb dessen Betreiber und Rückbauunternehmen agieren müssen.

Besondere Herausforderungen bestehen im Bereich der Rotorblätter der zurückzubauenden Anlagen, die überwiegend aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) bestehen und in naher Zukunft auch zunehmend Bestandteile kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) enthalten. Diese Materialien sind leicht, stabil und langlebig, aber vor allem CFK stellen die Recyclingwirtschaft vor große Herausforderungen. Recyclingverfahren wie die Pyrolyse oder Solvolyse eröffnen zwar Perspektiven zur Rückgewinnung von Fasern und Harzen, doch fehlen bislang wirtschaftlich tragfähige, großtechnisch etablierte Verfahren. Hier setzen verschiedene Forschungsprojekte an, die innovative Recyclingmethoden, alternative Materialsysteme und digitale Informationsmodelle, zum Beispiel Materialpässe, erproben. Diese Ansätze zeigen, dass sich technische Innovationen und ökologische Nachhaltigkeit zunehmend verbinden lassen, um einen geschlossenen Materialkreislauf zu erreichen.

Auch auf der Ebene der Verwertungsketten und Datenstrukturen wurden durch Projekte wie *RecycleWind* und *ReSort* Fortschritte erzielt. Ziel ist die Entwicklung intelligenter, selbstlernender Netzwerke, die Stoffströme effizient steuern, Akteure vernetzen und Recyclingpotenziale frühzeitig erkennen. Der Aufbau umfassender Datenbanken und Prognosetools ermöglicht es, den künftigen Rückbaubedarf präziser zu quantifizieren und damit Planungssicherheit zu schaffen. Solche digitalen Werkzeuge sind entscheidend, um den Übergang von einer linearen zu einer zirkulären Windwirtschaft zu gestalten. Darüber hinaus verdeutlichen Projekte wie *WindLoop* die Notwendigkeit, auch bisher vernachlässigte Komponenten – etwa Generatoren oder Permanentmagnete – in die Kreislaufstrategie einzubeziehen. Die Rückgewinnung von Seltenen Erden und anderen strategischen Metallen aus den Magneten der Generatoren stellt nicht nur einen Beitrag zur Ressourcenschonung dar, sondern auch zur geopolitischen Versorgungssicherheit.

Trotz dieser Fortschritte bleibt festzuhalten, dass das Recycling von Windenergieanlagen noch am Anfang einer industriellen Entwicklung steht. Die bislang existierenden Verfahren sind technisch machbar, aber wirtschaftlich häufig nur bedingt tragfähig. Einen Sekundärmarkt für recycelte Materialien zu etablieren, standardisierte Materialpässe und klare rechtliche Vorgaben zur Rücknahmepflicht von Komponenten könnten hier entscheidende Impulse liefern. Ebenso bedarf es verbindlicher Qualitätsstandards und Zertifizierungen, um Vertrauen in Sekundärrohstoffe zu schaffen.

Die DIN SPEC 4866: 2020-08 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“ wurde in eine DIN-Norm überführt und liegt nun als Entwurf E-DIN 4866: 2025-11 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen“ vor. Ziel der Norm ist es, eine einheitliche und vergleichbare Qualität der Arbeitsprozesse sicherzustellen. Die Veröffentlichung wird für das zweite Quartal 2026 erwartet.

Zukünftig wird der Erfolg der Windenergiebranche nicht allein an der installierten Leistung gemessen werden, sondern auch an der Fähigkeit, ihre eigenen Materialien in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Damit wird der Rückbau zur zentralen Komponente einer nachhaltigen Windenergiewirtschaft. Eine systemische Betrachtung des gesamten Lebenszyklus – von der Materialauswahl über die Fertigung bis hin zum Recycling – ist unabdingbar. Nur so lässt sich eine echte Kreislaufwirtschaft verwirklichen, die Ressourcen schont, Emissionen reduziert und wirtschaftliche Chancen für neue Geschäftsmodelle eröffnet.

Insgesamt zeigt sich: Der Rückbau von Windenergieanlagen ist nicht das Ende des Lebenszyklus, sondern der Beginn eines neuen. Er bietet die Chance, aus der Geschichte des Anlagenbaus zu lernen, innovative Materialien zu entwickeln und den Übergang zu einer ressourceneffizienten Energiezukunft aktiv zu gestalten. Entscheidend wird sein, die gewonnenen Erkenntnisse aus Forschung und Praxis zu verstetigen, regulatorisch zu verankern und in industriellen Maßstab zu überführen. So kann die Windenergie – von der Errichtung bis zur Wiederverwertung – zu einem echten Symbol nachhaltiger Technologie werden.

1 Einleitung

Die Windenergie hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einer tragenden Säule der Energiewende entwickelt. Sie leistet einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen Stromerzeugung und zur Reduzierung von CO_2-Emissionen. Mit dem fortschreitenden Ausbau steigt jedoch auch die Zahl der Anlagen, die ihr technisches oder wirtschaftliches Lebensende erreichen. Der Rückbau dieser Windenergieanlagen stellt eine komplexe Aufgabe dar, die technische, wirtschaftliche, rechtliche und ökologische Herausforderungen miteinander vereint.

Mitte November 2025 umfasste der bundesweite Bestand 29.120 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von knapp 67,1 Gigawatt (GW). Fast die Hälfte dieser Anlagen ist seit mindestens 15 Jahren in Betrieb, etwa 9.700 davon sogar bereits länger als 20 Jahre. Seit 2020 läuft die Förderung für ältere Windenergieanlagen schrittweise aus. Zwar werden viele Anlagen weiterbetrieben, doch ein erheblicher Teil wird in absehbarer Zeit das Ende seiner technischen Lebensdauer erreichen. Gleichzeitig beschleunigt das sogenannte Repowering – der Ersatz älterer Anlagen durch leistungsstärkere Modelle – den Rückbauprozess zusätzlich.

Der Rückbau erfordert eine sorgfältige Planung und Durchführung, da Windenergieanlagen meist aus mehreren hundert Tonnen Material bestehen. Besonders anspruchsvoll ist die Verwertung der Rotorblätter, die aus Verbundwerkstoffen gefertigt sind. Hinzu kommt, dass viele ältere Anlagen an abgelegenen oder schwer zugänglichen Standorten stehen, wodurch logistische Herausforderungen entstehen. Auch wirtschaftlich stellt der Rückbau eine erhebliche Belastung dar, da die Kosten je nach Anlagengröße und Standort stark variieren können. Zwar verpflichtet das Gesetz Betreiber zur Bereitstellung finanzieller Sicherheiten, allerdings ist oftmals nicht, klar, ob diese Mittel tatsächlich ausreichen, um einen vollständigen und umweltgerechten Rückbau zu gewährleisten.

Rechtlich unterliegt der Rückbau von Windenergieanlagen verschiedenen Regelungsregimen auf Bundes- und Landesebene. Nach § 35 Abs. 5 Satz 2 Baugesetzbuch (BauGB) sind Betreiber verpflichtet, ihre Anlagen nach endgültiger Stilllegung geordnet zurückzubauen und die Komponenten fachgerecht zu entsorgen Über diese Verpflichtung hinaus bestehen jedoch keine bundeseinheitlichen Standards, und die Regelungen unterscheiden sich zwischen den Bundesländern teilweise deutlich. Dies erfordert eine enge Abstimmung zwischen Betreibern, Fachfirmen und Behörden.

Darüber hinaus birgt der Rückbau potenzielle Umweltbelastungen – etwa durch ölhaltige Getriebekomponenten, elektrische Bauteile oder schwer recycelbare Rotorblätter. Eine nachhaltige Entsorgung und Verwertung der Materialien ist entscheidend, um die positiven Umweltwirkungen der Windenergie nicht durch problematische Rückbau- und Entsorgungspraktiken zu gefährden. Technische Innovationen, wirtschaftliche Absicherung, klare gesetzliche Vorgaben und nachhaltige Recyclinglösungen sind daher erforderlich, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft in der Windenergie zu etablieren. Eine konsequente Kreislaufwirtschaft verbessert die Ökobilanz der Windenergie, stärkt die gesellschaftliche Akzeptanz und ermöglicht langfristig Kosteneinsparungen durch effiziente Materialwiederverwendung.

Dieses Hintergrundpapier gibt einen umfassenden Überblick über die Thematik des Rückbaus und Recyclings von Windenergieanlagen. Es beleuchtet die wichtigsten technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekte und stellt aktuelle Entwicklungen in der Forschung sowie innovative Ansätze zur Kreislaufwirtschaft in der Windenergiebranche vor.

Das Papier richtet sich an Entscheidungsträger in Politik und Verwaltung, Unternehmen der Windenergiebranche sowie interessierte Fachkreise. Es soll als fundierte Informationsquelle dienen, um nachhaltige Lösungen für den Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen zu fördern und eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft in der Windenergie weiterzuentwickeln.

Durch die systematische Betrachtung dieser Thematik soll das Bewusstsein für die Bedeutung eines nachhaltigen Lebenszyklus von Windenergieanlagen gestärkt werden. Nur wenn neben dem Ausbau auch der Rückbau und das Recycling konsequent umweltfreundlich und wirtschaftlich tragfähig gestaltet werden, kann die Windenergie ihr volles Potenzial als nachhaltige Energiequelle entfalten.

2 Grundlagen des Rückbaus und Recyclings von Windenergieanlagen

2.1 Altersstruktur des Anlagenbestands in Deutschland

Die typische Lebensdauer von Windenergieanlagen in Deutschland liegt bei 20 bis 25 Jahren, wobei viele Modelle inzwischen für eine Betriebsdauer von bis zu 30 Jahren zertifiziert sind. Vereinzelt sind auch heute noch Anlagen im Einsatz, die älter als 30 Jahre sind. Von der Windenergieleistung, die vor der Jahrtausendwende installiert wurde, waren Mitte 2025 noch rund 1,8 GW in Betrieb.

Bezogen auf die Anzahl der Mitte 2025 installierten Anlagen ist etwa ein Drittel des Bestands seit mindestens 20 Jahren in Betrieb, bei der installierten Leistung entspricht dies etwa einem Fünftel. Weitere 13 Prozent der Leistung entfallen auf Anlagen mit einem Betriebsalter von 15 bis 20 Jahren. Fast ein Viertel der Kapazität erzeugt seit 10 bis 15 Jahren Strom, und 44 Prozent sind höchstens zehn Jahre alt. Seit Anfang 2025 verfügen 11,3 GW der installierten Leistung über keinen Vergütungsanspruch nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mehr. Das Durchschnittsalter des bundesweiten Anlagenparks liegt bei 15,4 Jahren. Die ältesten Windenergieanlagen befinden sich in Sachsen mit einem mittleren Betriebsalter von 20,5 Jahren. Am jüngsten ist der Anlagenpark im Saarland mit durchschnittlich 11,1 Betriebsjahren.[1]

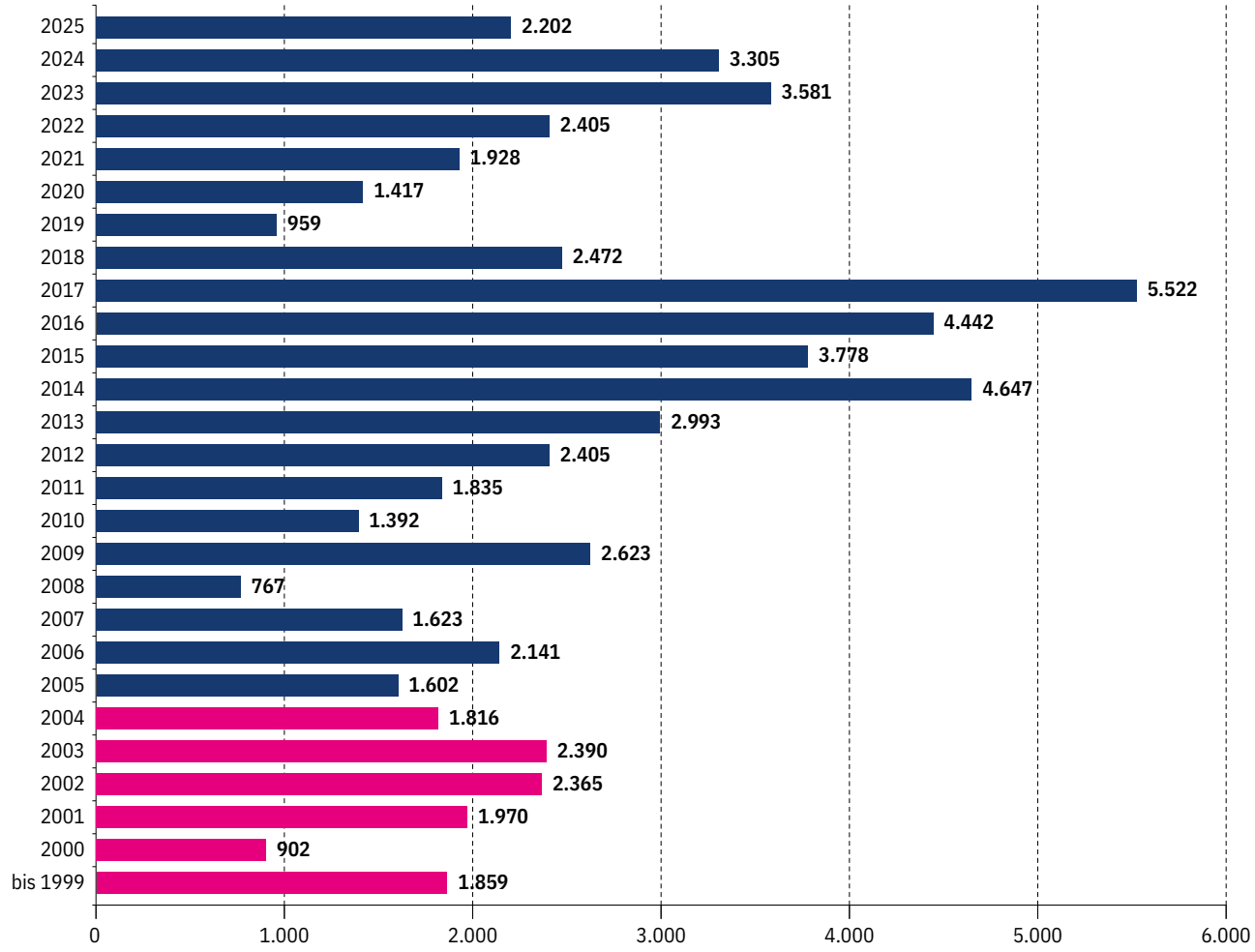

Abbildung 1: Installierte Windenergieleistung nach Jahr der Inbetriebnahme (magenta = ausgefördert)
Daten: MaStR; Angaben in Megawatt

1 FA Wind und Solar (2025a), S. 14.

Stilllegungen

In den ersten sechs Monaten des Jahres 2025 wurden 210 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 326 Megawatt (MW) endgültig stillgelegt. Im Vergleich zum ersten Halbjahr 2024 entspricht dies einem Rückgang von fast 25 Prozent, bezogen auf die Leistung. Eine ausgeprägte Stilllegungswelle, wie sie aufgrund der mittlerweile rund 9.700 ausgeförderten Bestandsanlagen eintreten könnte, ist weiterhin nicht zu erkennen. Vielmehr hängt der Umfang der Stilllegungen eng mit der Entwicklung des Repowerings zusammen, sodass der Schluss naheliegt, dass Altanlagen überwiegend als Ersatz für neue Windenergieanlagen außer Betrieb genommen wurden.

Die im ersten Halbjahr 2025 stillgelegten Anlagen wiesen eine durchschnittliche Betriebsdauer von 22,2 Jahren auf. Die kürzeste Laufzeit betrug knapp neun Jahre, die längste fast 34 Jahre.[2]

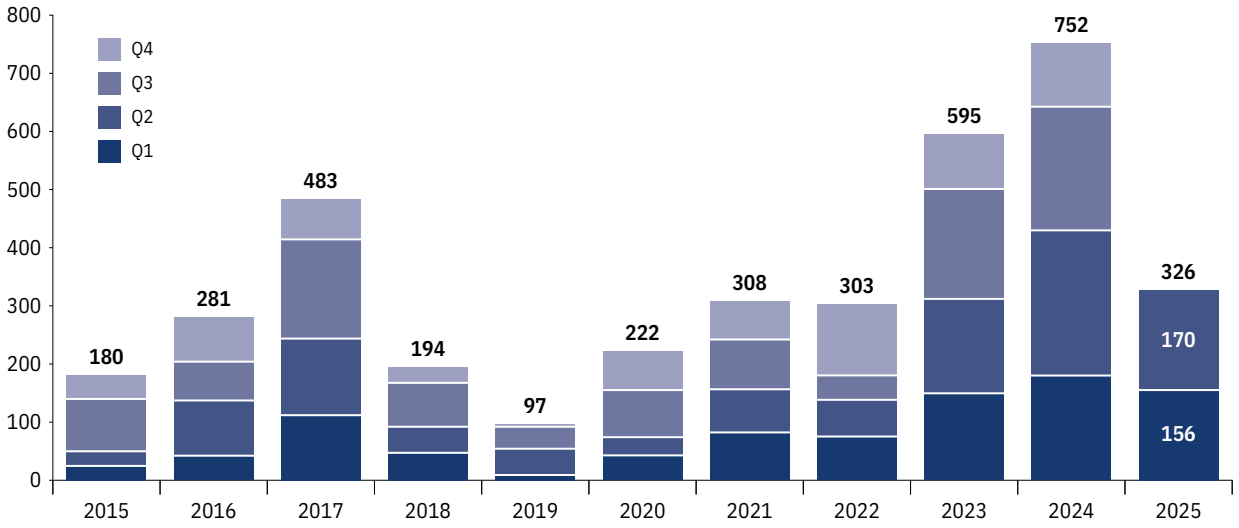

Abbildung 2: Quartalsweise stillgelegte Windenergieleistung in Deutschland
Daten: MaStR; Angaben in Megawatt

2.2 Aufbau und Komponenten einer Windenergieanlage

Windenergieanlagen (WEA) bestehen aus zahlreichen Einzelkomponenten, die nicht nur für den Betrieb, sondern auch für die Demontage und das Recycling von großer Bedeutung sind. Der Aufbau einer WEA bestimmt maßgeblich, welche Materialien wiederverwertet werden können und welche Herausforderungen beim Rückbau entstehen. Durch die gezielte Trennung und Verarbeitung der verschiedenen Materialien können Ressourcen geschont und Umweltbelastungen minimiert werden.

Tabelle 1: Anteile am Gesamtgewicht einer Windenergieanlage[3]

Material/Bestandteil	Anteil am Gesamtgewicht
Beton	60–65 %
Stahl	30–35 %
Verbundmaterialien	2–3 %
Elektrik-Komponenten, Kupfer, Aluminium, PVC, Betriebsflüssigkeiten	jeweils < 1 %

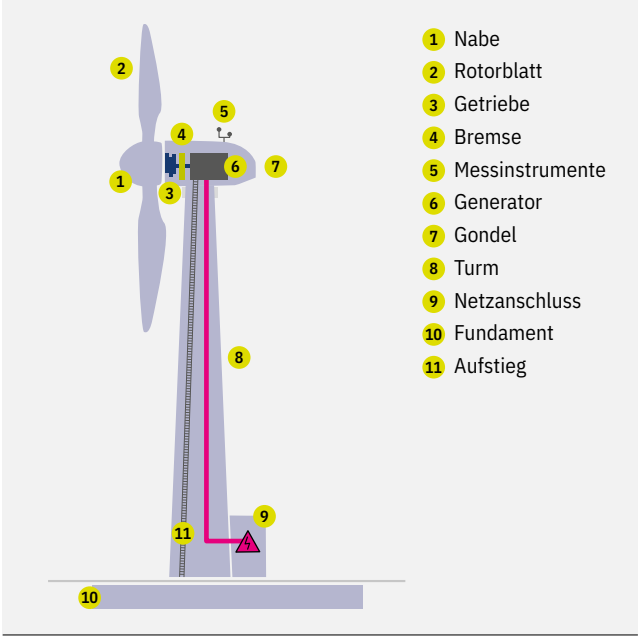

Abbildung 3: Aufbau einer Windenergieanlage
Quelle: FA Wind und Solar, eigene Darstellung

2 FA Wind und Solar (2025), S. 10.
3 BWE (2023a), S. 4.

2.2.1 Fundament

Das Fundament bildet die tragende Basis der WEA und besteht in der Regel aus Stahlbeton. Bei den Fundamenten wird grundsätzlich zwischen Standard-Flachfundamenten und Pfahlgründungen unterschieden. Flachfundamente besitzen – je nach Anlagengröße und Bodenbeschaffenheit – einen Durchmesser von etwa 15 bis 20 m und eine Dicke zwischen 1,5 und 3 m, beispielsweise bei einer WEA mit 2 bis 3 MW Leistung. Sie liegen direkt im Boden und können je nach Standortbedingungen mit oder ohne Auftriebssicherung gebaut sein. Eine Auftriebssicherung ist dann erforderlich, wenn der Grundwasserspiegel sehr hoch liegt und dadurch Auftriebskräfte auf das Fundament wirken. In diesem Fall sind die Fundamente größer und schwerer, um diesen Kräften standzuhalten.

Pfahlgründungen ähneln zwar im Aufbau den Flachfundamenten, sie stehen jedoch nicht direkt auf dem Boden, sondern werden auf tief im Erdreich eingebrachten Pfählen errichtet. Dadurch können die Lasten der Anlage in tiefere Bodenschichten abgeleitet werden. Solche Fundamente sind insbesondere bei schwierigen Bodenverhältnissen, wie in Moorgebieten oder bei Lössböden, relevant.[4]

2.2.2 Turm und Gondel

Der Turm trägt die Gondel und den Rotor. Er besteht aus Stahl, Beton oder einer Kombination beider Materialien (Hybridtürme). Stahltürme bestehen aus konisch geformten, geschweißten Stahlsektionen oder aus Stahlprofilen, die zu Gittermasten verschraubt sind. Sie bilden wohl den größten Anteil am Bestand der älteren Anlagen, da sie vor allem zwischen 1990 und 2005 Verwendung fanden. Gittermasten wurden bei frühen, kleineren Anlagen verbaut und sind im Bestand inzwischen äußerst selten geworden. Reine Betontürme bestehen aus Segmenten von Stahlbeton, also Beton mit eingebetteter Stahlbewehrung. Hybrid-Türme bestehen im unteren Teil aus Stahlbeton-Ringen und im oberen Teil aus Stahlröhren. Beton- und Hybridtürme wurden vor allem in späteren Bauphasen ab Mitte bis Ende der 2000er Jahre genutzt und tauchen bei älteren Anlagen eher selten auf.

Die Gondel beherbergt den Antriebsstrang, bestehend aus Rotorwelle, Getriebe (falls vorhanden), Generator und weiteren Komponenten wie Kühlsystemen und Steuerungselektronik. Die Verkleidung besteht häufig aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK).

2.2.3 Rotor

Der Rotor besteht aus der Nabe und den Rotorblättern. Rotornaben großer Anlagen bestehen zumeist aus Gusswerkstoffen, speziell Kugelgraphitguss. In der Vergangenheit waren auch Bauformen aus Stahlblech oder Schmiedeteilen verbreitet. Die Rotorblätter der älteren Modelle sind aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigt mit den Hauptbestandteilen Epoxid- oder Polyesterharz sowie Glasfasern. In frühen Anlagen fand Balsa-Holz als Kernmaterial Verwendung, das im Laufe der Jahre durch PET-Schaum und andere synthetische Materialien abgelöst wurde. Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) tritt bei älteren Anlagen äußerst selten auf, da er erst nach 2010 vor allem bei sehr großen Rotorblättern Verwendung fand. Ihr Anteil beträgt auch bei neuen Anlagen weniger als ein Drittel, wobei er in den letzten 10 Jahren von 5 bis 10 Prozent auf etwa 20 bis 30 Prozent angestiegen ist.[5]

2.2.4 Elektrische Komponenten

Zu den elektrischen Komponenten zählen Steuerungssysteme (z. B. Sensorik), Leistungselektronik (Wechselrichter, Umrichter), Sicherheitseinrichtungen (USV, Schutzrelais) sowie Kommunikations- und Netzanschlussmodule.

4 UBA (2019), S. 71.

5 Sawal (2025).

2.3 Gründe für den Rückbau

Der Rückbau von Windenergieanlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da ein wachsender Teil des Anlagenbestands das Ende seiner technischen oder wirtschaftlichen Lebensdauer erreicht.

Ein häufiger Grund für den Rückbau ist das Repowering, bei dem ältere Windenergieanlagen durch leistungsfähigere Neuanlagen am selben oder einem benachbarten Standort ersetzt werden. An „attraktiven" Standorten (gutes Winddargebot, vorhandene Erschließung, hohe Akzeptanz bei der anwohnenden Bevölkerung) wird es häufig auch bereits vor Ende der Förderperiode umgesetzt.

Die designierte Lebensdauer älterer WEA liegt in der Regel bei 20 Jahren. Betreiber stehen dann vor der Entscheidung, ob die Anlage zurückgebaut wird oder ob ein Weiterbetrieb möglich ist. Für den Weiterbetrieb über die Entwurfslebensdauer hinaus ist eine umfassende technische Zustandsbewertung gesetzlich vorgeschrieben, die durchaus kostspielig sein kann. Dabei werden z. B. folgende Kriterien geprüft:[6]

- Rissbildung, Materialermüdung oder Korrosion,
- Zustand des Triebstrangs, der Rotorblätter und des Turms,
- Funktionsfähigkeit von Sicherheits- und Steuerungseinrichtungen.

Erfüllt die Anlage den technischen Zustand für einen sicheren und stabilen Weiterbetrieb nicht und ist eine Instandsetzung z. B. aus fehlender Verfügbarkeit von Ersatzteilen oder aus Kostengründen nicht möglich, ist das Ende der technischen Lebensdauer erreicht.

Auch ohne technische Mängel kann der Weiterbetrieb einer Windenergieanlage unwirtschaftlich werden. Anlagen, die vor 2001 in Betrieb gingen, erhalten seit 2021 keine gesetzlich garantierte Einspeisevergütung mehr, sodass sich ein Weiterbetrieb nur dann lohnt, wenn die Strompreise am Spotmarkt oder über eine Direktvermarktung (PPA) ausreichend hoch sind, um die Kosten für Wartung und Betrieb zu decken und eine akzeptable Rendite zu bieten. Diese ökonomischen Überlegungen können zum Rückbau von Altanlagen führen, selbst wenn ein technischer Weiterbetrieb noch möglich wäre.[7]

6 TÜV Süd (o. D.).

7 FA Wind (2021), S. 7.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

3.1 Rückbau von Windenergieanlagen

3.1.1 Rechtsgrundlagen

Für den Rückbau von Windenergieanlagen enthalten weder das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)[8] noch das Baugesetzbuch (BauGB)[9] eine generelle, gesetzliche Rückbaupflicht für dauerhaft aufgegebene Anlagen. Für bestimmte Vorhaben im Außenbereich, darunter auch Windenergieanlagen, trifft § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB allerdings praxisrelevante Regelungen für den Rückbau. Demnach müssen Anlagenbetreiber eine Verpflichtungserklärung zum Rückbau der Anlage sowie zur Beseitigung der Bodenversiegelung abgeben. Die Baugenehmigungsbehörde soll die Einhaltung dieser Rückbauverpflichtung durch eine nach Landesrecht vorgesehene Baulast oder in anderer Weise sicherstellen. Darüber hinaus bestehen in den Ländern unterschiedliche Vorgaben zum Umfang der Rückbaupflicht, den Sicherungsmitteln und zur Höhe der Sicherheitsleistung.[10]

Die Vorschriften in § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB sind nicht auf alle Windenergieanlagen, die im Außenbereich zurückgebaut werden, anwendbar. Die Pflicht zur Abgabe einer Rückbauverpflichtungserklärung gilt nur für Anlagen, die seit dem Inkrafttreten der Vorschrift am 20. Juli 2004[11] genehmigt wurden. Dies folgt aus § 233 Abs. 3 BauGB, wonach auf Grundlage früherer Fassungen des Baugesetzbuchs wirksame oder übergeleitete Entscheidungen fortgelten. Im Folgenden werden zunächst die Rechtsfragen behandelt, die im Zusammenhang mit der Abgabe einer Verpflichtungserklärung sowie der Sicherstellung der Rückbauverpflichtung entstehen (dazu unter 3.1.2). Danach werden praxisrelevante Fragen zum Rückbau von Altanlagen erörtert, die nicht dem Anwendungsbereich des § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB unterfallen (dazu unter 3.1.3). Kapitel 3.1.4 thematisiert den Umfang der Rückbaupflicht. Dort wird insbesondere der Frage nachgegangen, ob es für unterschiedliche Gründungsarten auch unterschiedliche Rückbaupflichten gibt und ob Zuwegungen sowie Leitungen vollständig zurückgebaut werden müssen.

Nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung sind hingegen die Möglichkeiten, eine Rückbaupflicht auf Bauleitplanebene – etwa durch Festsetzungen in einem Bebauungsplan gem. § 9 BauGB – festzulegen, sie in städtebauliche Verträge aufzunehmen oder in privatrechtlichen Verträgen zu vereinbaren.

3.1.2 § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB

Nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB ist bei der Zulassung von Windenergieanlagen im Außenbereich gem. § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB eine Verpflichtungserklärung abzugeben. Darin verpflichten sich die Betreiber, das Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und die Bodenversiegelungen zu beseitigen. Diese Erklärung ist als „weitere Zulässigkeitsvoraussetzung“ konstitutiv und damit für die Genehmigungserteilung erforderlich.[12] Auch ein Repowering setzt eine entsprechende Rückbauverpflichtungserklärung voraus.[13] § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB verpflichtet die Baugenehmigungsbehörde zudem abzusichern, dass diese Erklärung eingehalten wird.

8 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) i. d. F. der Bekanntmachung v. 17.5.2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes v. 24.2.2025 (BGBl. 2025 I Nr. 58).

9 Baugesetzbuch (BauGB) i. d. F. der Bekanntmachung v. 3.11.2017 (BGBl. I S. 3634), zuletzt geändert durch Art. 3 des Gesetzes v. 20.12.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 394).

10 Vgl. BWE (2024).

11 BGBl. 2004 I Nr. 31 v. 30.6.2004, S. 1350 ff.

12 BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 10.

13 FA Wind (2018), S. 8.

Zweck der Regelungen

Nach der gesetzgeberischen Intention soll der Schutz des Außenbereichs gestärkt werden. So soll § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB verhindern, dass aufgegebene Anlagen mit einer begrenzten Nutzungsdauer die Landschaft beeinträchtigen.[14] Daher sind auch Windenergieanlagen nach dauerhafter Nutzungsaufgabe zu entfernen.[15] Die Gesetzesbegründung betont in diesem Zusammenhang, dass das Beseitigungsgebot sowohl der Bodenschutzklausel als auch dem Verursacherprinzip entspricht.[16] § 35 Abs. 2 Satz 3 BauGB soll zudem sicherstellen, dass die Rückbauverpflichtung eingehalten und die Rückbaukosten abgesichert werden.[17]

Rechtsgrundlage für den Rückbau

Nach überwiegender Auffassung begründet § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB keine unmittelbare gesetzliche Rückbaupflicht.[18] Es stellt sich daher die Frage, auf welcher rechtlichen Grundlage diese Pflicht tatsächlich beruht. Dazu werden unterschiedliche Ansichten vertreten,[19] die im Folgenden in gebotener Kürze dargestellt werden:

Woraus resultiert/ergibt sich die Rückbaupflicht?

Ein Teil der Literatur vertritt die Auffassung, dass die Verpflichtungserklärung selbst eine materielle Rückbaupflicht bei dauerhafter Nutzungsaufgabe begründet und eine rechtlich relevante Wirkung entfaltet.[20]

Das Bundesverwaltungsgericht vertritt demgegenüber die von der Praxis häufig kritisierte Auffassung, dass die Verpflichtungserklärung lediglich bewirkt, dass aufgrund des gesetzlichen Grundsatzes von Treu und Glauben (Verbot des widersprüchlichen Verhaltens, § 242 BGB) nicht mit Erfolg gegen eine spätere Beseitigungsanordnung vorgegangen werden kann.[21] Woraus sich die Rückbaupflicht im Einzelnen ableitet, hat das Gericht in dieser Entscheidung nicht festgelegt. Es stellte lediglich fest, dass die Verpflichtungserklärung keinen vollstreckbaren Titel darstellt und keine dingliche Wirkung hat. Gleichzeitig betonte das Gericht, dass der Gesetzgeber mit § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB eine eigene bundesrechtliche Ermächtigungsgrundlage geschaffen hat. Auf dieser Grundlage kann eine Genehmigung mit Nebenbestimmungen versehen werden, die den Rückbau nach dauerhafter Nutzungsaufgabe des Vorhabens sicherstellen.

Diese bislang nicht abschließend geklärte Rechtsfrage ist für die Rückbaupraxis von Windenergieanlagen von geringer praktischer Relevanz. Soweit Teilaspekte dieser Frage beispielsweise für den Umfang der Rückbaupflicht bedeutsam sind, wird an den entsprechenden Stellen darauf eingegangen (siehe 3.1.4).

Wichtig ist vor allem mit Blick auf die Verwaltungspraxis, dass eine Rückbaupflicht, die sich aus der Verpflichtungserklärung ableitet, nach deren verbreiteter Auffassung grundsätzlich selbst vollstreckt werden kann. Es bedarf in diesen Fällen also nicht zwingend einer bauordnungsrechtlichen Rückbauanordnung. Infolgedessen müssen nicht in jedem Fall Ermessens- und Verhältnismäßigkeitserwägungen zum Umfang der Rückbauverpflichtung angestellt werden. Zudem muss an dieser Stelle auch berücksichtigt werden, dass der (erforderliche) Rückbau in den meisten Fällen mit einem Repowering verbunden ist, also der Errichtung einer neuen, leistungsstärkeren Windenergieanlage unter der Bedingung des Rückbaus von Altanlagen. Maßgeblich hierfür sind unter anderem die Regelungen des § 249 Abs. 8 BauGB oder des § 16b Abs. 1 und 2 BImSchG. Nach § 16 b Abs. 2 Satz 2 Nr. 1 BImSchG muss sichergestellt werden, dass die neue Anlage erst errichtet werden darf, wenn die alte Windenergieanlage vollständig zurückgebaut ist. Vor diesem Hintergrund spielt es aus Sicht der Betreiber der Bestandsanlage keine Rolle, woraus die Rückbaupflicht konkret abgeleitet wird. Vielmehr ist es in ihrem ureigensten Interesse, dass die Altanlage zurückgebaut wird.

Dies wäre nur dann der Fall, wenn der Rückbau aufgrund einer behördlichen Rückbauanordnung vollzogen wird, etwa weil der Anlagenbetreiber den Rückbau der Windenergieanlage innerhalb eines angemessenen Zeitraums nicht selbst durchführt und die zuständige Aufsichtsbehörde daher aufsichtsrechtlich tätig wird. In einem solchen Fall ist eine behördliche Ermessensausübung erforderlich, wie sie bei jeder behördlichen Anordnung vorgesehen ist.[22] Dies gilt auch dann, wenn – wie

14 BT-Drs. 15/2250, S. 33.

15 Vgl. Mitschang, Reidt in: Battis, Kratzberger, Löhr, BauGB, 16. Aufl. 2025, § 35 Rn. 180; BT-Drs. 15/2250, S. 56.

16 BT-Drs. 15/2250, S. 56.

17 Den Zweck der Absicherung des Liquiditätsrisikos leitet das BVerwG aus den Gesetzesmaterialien ab, in denen das Verursacherprinzip betont wird: BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 15; BT-Drs. 15/2250, S. 56.

18 Vgl. hierzu etwa Seibert (2019), S. 158 f.; siehe zudem mit weiteren Nachweisen: FA Wind (2021), S. 6.

19 Siehe hierzu ausführlich: Seibert (2019), S. 160 ff.

20 Seibert (2019), S. 160 f.

21 BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5.11, Rn. 11.

22 Vgl. Sittig-Behm (2020), S. 313 ff.

in den meisten Genehmigungen – die Rückbauverpflichtung als Nebenbestimmung oder Inhaltsbestimmung festgelegt ist. In diesem üblichen Fall stellt sich nicht die Frage, auf welcher gesetzlichen Grundlage eine Rückbauanordnung erlassen werden kann, da der Rückbau direkt aus der im Regelfall bestandskräftigen Genehmigung vollstreckt wird. Häufig wird in der Praxis nur unzureichend berücksichtigt, dass ein unterlassener oder nicht genehmigungsgemäßer Rückbau durch den Anlagenbetreiber strafrechtliche Relevanz haben kann. Hier können möglicherweise Tatbestände des Umweltstrafrechts gem. §§ 324 ff. Strafgesetzbuch (StGB) erfüllt sind.

In den Gesetzesmaterialien zu § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB wird ausdrücklich betont, dass Rückbaupflichten aufgrund anderer Regelungen, z. B. fachgesetzliche Regelungen in den Landesbauordnungen, unberührt bleiben.[23] Bauaufsichtliche Anordnungen sind daher auch dann möglich, wenn bereits eine Rückbaupflicht nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB besteht.[24]

Sicherung der Rückbauverpflichtung

Die Baugenehmigungsbehörde hat gem. § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB sicherzustellen, dass die Rückbauverpflichtung eingehalten wird. Zudem soll die Regelung das Risiko minimieren, dass die Rückbaukosten von der öffentlichen Hand zu tragen sind, weil Betreiber ihrer Rückbauverpflichtung nicht nachkommen und hinsichtlich der Rückbaukosten nicht in Anspruch genommen werden können (bspw. wegen Insolvenz).[25]

Für den Fall, dass ein Betreiber eine Windenergieanlage nicht zurückbaut, kommt im Rahmen der Verwaltungsvollstreckung insbesondere eine Ersatzvornahme in Betracht, um den Rückbau sicherzustellen.[26] In diesem Fall führt die Behörde den Rückbau auf Kosten des Pflichtigen selbst durch.[27] Das Bundesverwaltungsgericht hat in diesem Zusammenhang betont, dass die Durchsetzung der Rückbaupflicht nicht daran scheitern dürfe, dass nicht ausreichend öffentliche Mittel für eine Ersatzvornahme zur Verfügung stehen. Zwar werde das Liquiditätsrisiko in den Gesetzgebungsmaterialien nicht explizit genannt, der Gesetzgeber habe aber das Verursacherprinzip hervorgehoben. Damit habe er klargestellt, dass die Kostentragung durch den Vorhabenträger bzw. seinen Rechtsnachfolger sichergestellt werden müsse.[28]

Im Folgenden werden daher zunächst mögliche Sicherungsmittel dargestellt, wobei der Fokus auf den in der Praxis gängigen Sicherheiten liegt und somit nicht abschließend ist. Anschließend folgt ein Blick auf die Berechnungspraxis der Länder zur Höhe der Sicherheitsleistung sowie eine Analyse der Auswirkungen für die Anlagenbetreiber.

Wahl der Sicherungsmittel

Die Baugenehmigungsbehörde soll gem. § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB die Einhaltung der Rückbauverpflichtung

> *„[…] durch nach Landesrecht vorgesehene Baulast oder in anderer Weise […]“*[29]

sicherstellen. Die Absicherung kann also mit unterschiedlichen Sicherungsmitteln erfolgen. Der Behörde steht bei der Wahl des Mittels ein weites Auswahlermessen zu.[30]

Die Baulast wird in § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB ausdrücklich als Sicherungsmittel genannt. Nach § 85 Abs. 1 Satz 1 der Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NRW) oder § 81 Abs. 1 Satz 1 der Niedersächsischen Bauordnung (NBauO) können Grundstückeigentümer durch Erklärung gegenüber der Bauaufsichtsbehörde zu einem ihre Grundstücke betreffenden Tun, Dulden oder Unterlassen verpflichtet werden, sofern sich die Verpflichtung nicht bereits aus öffentlich-rechtlichen Vorschriften ergibt.

23 BT-Drs. 15/2250, S. 94.

24 Vgl. Seibert (2019), S. 160.

25 UBA (2023), S. 29; den Zweck der Absicherung des Liquiditätsrisikos leitet das BVerwG aus den Gesetzesmaterialien ab, in der das Verursacherprinzip betont wird: siehe BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 15.

26 Vgl. Söfker, Kment in: Ernst, Zinkahn, Bielenberg, Krautzberger, Baugesetzbuch, Werkstand: 158. EL Februar 2025, § 35 Rn. 1051; Mitschang, Reidt in: Battis, Krautzberger, Löhr, BauGB, 16. Aufl. 2025, § 35 Rn. 183.

27 Mosbacher in: Engelhardt, App, Schlatmann, VwVG/ VwZG, 13. Aufl. 2025, Rn. 1.

28 BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 15.

29 § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB.

30 FA Wind (2018), S. 13.

Ist die Baulast als Sicherungsmittel geeignet?

Die Baulast ist grundstückbezogen und verpflichtet allein den Grundstückseigentümer und dessen Rechtsnachfolger (vgl. § 85 Abs. 1 Satz 1 BauO NRW). Sie bietet daher in der Praxis meist keine Möglichkeit, den Rückbau durch den Betreiber bzw. Bauherrn der Windenergieanlage zu fordern, wenn dieser nicht zugleich Grundstückseigentümer ist.[31]

Wird ein Grundstückseigentümer durch eine Baulast verpflichtet, den Rückbau selbst vorzunehmen, wären damit grundsätzlich auch die Kosten für eine Ersatzvornahme abgesichert. Diese entstehen nach § 10 Verwaltungs-Vollstreckungsgesetz (VwVG), wenn die Verpflichtung, den Rückbau vorzunehmen, nicht erfüllt wird. Problematisch ist jedoch, dass Windenergieanlagen nach der Rechtsprechung des Bundesgerichtshofs (BGH) lediglich einen Scheinbestandteil gem. § 95 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) des Grundstücks darstellen. Sie gehen also nicht durch Verbindung mit dem Grundstück in das Eigentum des Grundstückseigentümers über.[32] Dies ist nachvollziehbar, da Windenergieanlagen in der Regel über erhebliche Fremdmittel finanziert werden und die finanzierenden Banken ein Interesse daran haben, dass das Eigentum beim Betreiber verbleibt. Damit ist der Grundstückseigentümer nicht berechtigt, auf die Windenergieanlage zuzugreifen und diese zurückzubauen. Andernfalls bestünde die Gefahr eines strafrechtlich relevanten Handelns, beispielsweise in Gestalt einer Sachbeschädigung gem. § 303 StGB oder einer Zerstörung von Bauwerken, § 305 StGB. Folglich ist die Baulast nach hier vertretener Auffassung nur bedingt als Sicherungsmittel für den Rückbau geeignet – und zwar in der nachfolgenden Konstellation:

Anders verhält es sich, wenn die Baulast die Verpflichtung enthält, dem Rückbau einer Windenergieanlage zuzustimmen. In diesem Fall stellt sie grundsätzlich ein geeignetes Sicherungsmittel dar. Allerdings sichert sie nicht die finanzielle Liquidität des Grundstückseigentümers. Kosten, die einer Behörde durch den Rückbau entstehen könnten, wenn der Betreiber der Rückbaupflicht nicht nachkommt, wären somit nicht gedeckt. Die Baulast kann also nur insoweit absichern, als der Grundstückseigentümer von vornherein verpflichtet wird, dem Rückbau – und damit auch der Nutzung seines Grundstücks durch Dritte – zuzustimmen.

Anstelle einer Baulast kommt auch eine grundbuchliche Absicherung in Betracht, konkret etwa durch eine beschränkte persönliche Dienstbarkeit nach § 1090 BGB zugunsten der Baugenehmigungsbehörde.[33] Dabei kann ein Grundstück in der Weise belastet werden, dass einer Person das Recht eingeräumt wird, ein Grundstück in einzelnen Beziehungen zu nutzen oder eine sonstige Befugnis auszuüben, ohne Eigentümerin des Grundstücks sein zu müssen. Dieses Sicherungsmittel bietet sich in Bundesländern an, in denen – wie derzeit in Bayern und Brandenburg – das Rechtsinstitut der Baulast nicht existiert.[34] Das finanzielle Risiko für die Behörde, das entsteht, wenn der Pflichtige den Rückbau nicht vornimmt, lässt sich durch eine Grunddienstbarkeit jedoch ebenfalls nicht absichern.[35]

Des Weiteren kommt eine Absicherung in Form einer Bürgschaft oder einer Hinterlegung in Betracht.[36] Eine Bürgschaft gem. §§ 765 ff. BGB kann insbesondere als selbstschuldnerische Bank- oder Konzernbürgschaft bestellt werden. Der Bürge verpflichtet sich dabei gegenüber dem Rechtsträger der zuständigen Behörde, die Rückbaukosten zu übernehmen. Die Bürgschaft kann so ausgestaltet werden, dass sich die Behörde unmittelbar an den Bürgen wenden kann, ohne zuvor Klage erheben zu müssen (vgl. Verzichtserklärung gem. § 773 Abs. 1 Nr. 1 BGB)[37]. Nach dem Abschlussbericht zum Projekt des Umweltbundesamtes (UBA) aus dem Jahr 2023 zur Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen sind Konzern- und Bankbürgschaften als bevorzugte Sicherungsmittel zu erkennen.[38]

31 Vgl. FA Wind (2018), S. 14.

32 Vgl. BGH, Urt. v. 7.4.2017 - VZR 52/16; zudem besprochen in FA Wind (2017), S. 8.

33 FA Wind (2018), S. 14.

34 Vgl. Ekardt, /Beckmann (2007), S. 455.

35 BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 15.

36 Mitschang, Reidt in Battis, Krautzberger, Löhr, BauGB, 16. Aufl. 2025, § 35 Rn. 183; UBA (2023), S. 74.

37 FA Wind (2018), S. 14.

38 UBA (2023), S. 53.

Ist neben einer Bürgschaft eine zusätzliche Sicherung durch Baulast zulässig/notwendig?

In einigen Bundesländern scheint es gängige Praxis zu sein, die Rückbauverpflichtung doppelt abzusichern: Neben einer Bürgschaft wird zusätzlich eine Baulast eingetragen. Nach dem o. g. UBA-Abschlussbericht von 2023 gaben viele befragte Behörden an, dass sie diese Kombination regelmäßig nutzen.[39] Daraus ergibt sich die Frage, ob eine solche „Doppelbesicherung" tatsächlich erforderlich ist.

Im Sinne des § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB soll die Baugenehmigungsbehörde den Rückbau entweder durch eine Baulast oder auf andere Weise absichern. Schon der Wortlaut wirft die Frage auf, ob die Kombination einer Baulast mit anderen Sicherungsmitteln zulässig ist. Das Bundesverwaltungsgericht hat dies bejaht. Es stellte klar, dass die Eintragung einer Baulast andere geeignete Maßnahmen nicht ausschließt. Die Formulierung *„durch [...] Baulast oder in anderer Weise"* sei nicht so zu verstehen, dass nur eine Möglichkeit zulässig wäre. Vielmehr stehe der Behörde eine Bandbreite möglicher Maßnahmen zur Verfügung, um den Rückbau sicherzustellen.

Zudem betonte das Gericht: Durch eine Baulast werden die Kosten des Rückbaus bei Ausfall des Pflichtigen nicht abgesichert.[40]

Höhe der Sicherheitsleistung

Die Rahmenbedingungen der Sicherheitsleistung werden in der Regel im Genehmigungsbescheid als Nebenbestimmung aufgenommen.[41] Die Höhe des Sicherungsmittels muss dabei nachvollziehbar und verhältnismäßig sein.[42]

Zwischen den Bundesländern gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen:[43] In Baden-Württemberg, Bayern und Schleswig-Holstein wird die Sicherheitsleistung anhand der tatsächlichen Rückbaukosten berechnet. In den anderen Bundesländern werden dafür alternativ die Investitionskosten, die Anlagenleistung oder die Nabenhöhe als Eingangsgröße herangezogen. Insbesondere die Nabenhöhe ist als Berechnungsfaktor kritisch zu sehen, da sie keinen direkten Bezug zu den Rückbaukosten erkennen lässt. Gleichzeitig muss eine anwenderfreundliche und praxisgerechte Methode gewählt werden, mit der Vorhabenträger frühzeitig planen können.

Die Berechnungsformeln sollen die Rückbaukosten möglichst genau abbilden und dabei mit geringem Aufwand überprüfbar sein. Das UBA hat in seinem o. g. Abschlussbericht von 2023 die einzelnen Berechnungsergebnisse untersucht und dabei festgestellt, dass sich mit den Investitionskosten als Eingangsgröße die beste Annäherung an die tatsächlichen Rückbaukosten erzielen lässt. Nordrhein-Westfalen (NRW) nutzt sie deshalb als Bemessungsgrundlage.

Eine weitere Frage betrifft mögliche Verwertungserlöse, zum Beispiel Einnahmen aus dem Recycling oder aus dem Weiterverkauf von Anlagen(-teilen). Das Verwaltungsgericht Halle (Saale) hat entschieden, dass solche Erlöse nicht berücksichtigt werden dürfen. Zur Begründung führte das Gericht an, dass solche Vermögenswerte von der Behörde nicht verwertet oder einbehalten werden könnten.[44]

Bei der Höhe der Sicherheitsleistung ist zudem zu beachten, dass die Nutzungsdauer einer Windenergieanlage in der Regel 20 Jahre beträgt. Da die Rückbaukosten erst nach der dauerhaften Nutzungsaufgabe anfallen, muss ein Inflationsausgleich berücksichtigt werden.[45] Aus dem Urteil des OVG Münster, Urteil vom 25. September 2024 – 7 D 117/23.AK ergibt sich, dass ein Inflationsausgleich in der Kostenschätzung des Herstellers vorhanden sein kann, oder wie in Ziffer 5.2.2.4 der Regelung des Windenergieerlasses des Landes NRW vom 8.5.2018 eine pauschalierte Sicherheitsleistung enthalten sein kann: Der Windenergieerlass beziehe im Rahmen der pauschalierten Sicherheitsleistung von 6,5 Prozent der Sache nach bereits einen pauschalen Inflationsausgleich ein. Das ergebe sich aus der Formulierung, wonach die Sicherheitsleistung den Rückbau der Windenergieanlage am Ende ihrer voraussichtlichen Lebensdauer vollständig abdecken muss. Ebenso sei der Beklagte im Hinblick auf die vorgenannte Zielsetzung des § 35 Abs. 5 BauGB aus Gründen der Verwaltungspraktikabilität der Sache nach berechtigt, schon jetzt einen pauschalierten Inflationsausgleich einzubeziehen, anstatt die aktuellen

39 UBA (2023), S. 53; [Hinweis: Im Abschlussbericht wurde hinsichtlich der Ergebnisse der Behördenbefragung darauf hingewiesen, dass die erfassten Rückmeldungen jeweils nur die Erfahrungen und Erwartungen der einzelnen Behörden wiedergeben und die Antworten daher nur eingeschränkt verallgemeinerungsfähig sind].

40 Vgl. BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, Rn. 15.

41 UBA (2023), S. 45.

42 Mitschang, Reidt in Battis, Krautzberger, Löhr, BauGB, 16. Aufl. 2025, § 35 Rn. 183.

43 Vgl. hierzu UBA (2023), S. 57 ff.

44 VG Halle (Saale), Urt. v. 12.7.2011 – 4 A 29/10, Rn. 43; OVG Lüneburg, Beschl. v. 12.10.2022 – 12 MS 188/21, zudem besprochen in FA Wind (2023), S.9 ff.; OVG Münster, Urt. v. 25.9.2024 – 7 D 117/23.AK, Rn. 63 ff., zudem besprochen in FA Wind und Solar (2025b), S.25 ff.

45 Vgl. UBA (2023), S. 74.

Rückbaukosten zu ermitteln und eine Anpassung etwa nach Maßgabe von Preissteigerungsindizes zu bestimmten Zeitpunkten zu verlangen.[46]

In der Praxis wird dies häufig so gelöst, dass die Genehmigungen der Windenergieanlagen Nebenbestimmungen enthalten, wonach die Höhe der Rückbausicherheit in regelmäßigen Abständen durch Vorlage aktualisierter Unterlagen überprüft und bei Bedarf angepasst wird. Finden die betreffenden Windenergieanlagen ihre bauplanungsrechtliche Zulässigkeit in einem Bebauungsplan gem. § 30 BauGB, so werden diese Pläne in der Regel durch einen städtebaulichen Vertrag im Sinne des § 11 BauGB zwischen der planenden Gemeinde und dem Vorhabenträger bzw. der Vorhabenträgerin flankiert. Auch in diesen Verträgen können städtebauliche Regelungen getroffen werden, die eine regelmäßige Überprüfung der Höhe der Rückbausicherheit gewährleisten. Eine derartige Überprüfung sollte jedoch mit Augenmaß erfolgen. Einige Behörden oder Gemeinden sehen Überprüfungsintervalle von fünf Jahren vor, was nach begründeter Auffassung unverhältnismäßig ist. In diesem Zusammenhang muss vor allem die Regelbetriebszeit von Windenergieanlagen berücksichtigt werden. Sowohl die zivilrechtlichen Nutzungsverträge als auch die Wirtschaftlichkeitsbewertungen gehen regelmäßig von einer Betriebsdauer von 20 Jahren aus. Vor diesem Hintergrund erscheint es schon aus rein praktischen Erwägungen wenig sinnvoll, alle fünf Jahre – also mindestens viermal während der Regelbetriebszeit – derartige Überprüfungen und Anpassungen vorzunehmen, zumal in der Regel nicht mit einem früheren Rückbau zu rechnen ist. Es sollte daher ausreichend sein, die Überprüfung erstmals nach zehn Jahren und ein weiteres Mal nach 20 Jahren durchzuführen und die Sicherheitsleistung gegebenenfalls anzupassen.

Unabhängig vom zeitlichen Intervall gilt: Die Rückbaukosten sind Teil der Investitionskosten. Daher haben auch die Betreiber ein Interesse daran, diese Kosten und damit auch die Höhe der Sicherheitsleistung entsprechend aktuell zu halten.

Wann entsteht die Rückbaupflicht?

Es stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt die Rückbaupflicht entsteht. Nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB ist die Verpflichtungserklärung darauf gerichtet, das Vorhaben

> *„[…] nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung […]“*

zurückzubauen und die Bodenversiegelung zu beseitigen. Maßgeblich ist also der Zeitpunkt der dauerhaften Nutzungsaufgabe.

In der Kommentarliteratur wird ausgeführt, dass die Rückbauverpflichtung wirksam wird, sobald die zulässige Nutzung endgültig aufgegeben wird. Voraussetzung ist, dass die nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB genehmigte Nutzung – hierzu zählen auch Windenergieanlagen (§ 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB), die als privilegierte Außenbereichsvorhaben zugelassen wurden – eingestellt ist und nach der Verkehrsauffassung nicht mehr mit einer Wiederaufnahme zu rechnen ist. Dabei wird teilweise auf die Grundsätze zum Verlust des Bestandsschutzes durch Nutzungsaufgabe oder -änderung verwiesen:[47] Der bauplanungsrechtliche Bestandsschutz endet mit der vollständigen Nutzungsaufgabe.

Agatz verweist darauf, dass der maßgebliche Zeitpunkt , ab dem der Rückbau gefordert werden darf, für die heute üblichen, immissionsschutzrechtlich genehmigten Windenergieanlagen mit mehr als 50 m Gesamthöhe eindeutig bestimmt sei: Nach § 18 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG erlischt die immissionsschutzrechtliche Genehmigung, wenn die Anlage drei Jahre lang nicht betrieben wurde.[48] Über § 67 Abs. 9 BImSchG gilt dies auch für ursprünglich „lediglich“ baugenehmigte Anlagen, da diese weiterhin als immissionsschutzrechtlich genehmigt fortgelten.

Allerdings verwies der VGH Kassel in einem Beschluss vom 30. Juni 2023 darauf, dass sich für das Erlöschen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung und der darin gem. § 13 BImSchG eingeschlossenen Genehmigungen unterschiedliche Zeithorizonte ergeben können.[49] In Anwendung dieser Rechtsprechung würde das für die Praxis bedeuten, dass es nicht ausreicht, „nur“ die immissionsschutzrechtliche Genehmigung zu verlängern. Vielmehr müssen gegebenenfalls auch die ursprünglich einkonzentrierten Genehmigungen – etwa die Baugenehmigung oder eine denkmalrechtliche Genehmigung – gesondert verlängert werden. Dieser Auffassung sind die anderen Obergerichte allerdings bislang nicht gefolgt.

Trotz bestehender Unsicherheiten spricht vieles dafür, dass eine Rückbaupflicht erst drei Jahre nach endgültiger Betriebseinstellung entsteht. Ein früheres Erlöschen würde faktisch zu einem Entzug der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung führen. Diese Frage stellt sich nicht, wenn der Zeitpunkt der dauerhaften Nutzungsaufgabe eindeutig in einer Nebenbestimmung geregelt ist oder der Bauherr die dauerhafte Nutzungsaufgabe ausdrücklich erklärt.[50] In letzterem Falle dürfte der Aspekt des Bestandsschutzes praktisch keine Rolle spielen, da der Betreiber durch die Erklärung unmissverständlich zu erkennen gibt, dass er kein rechtliches Interesse mehr an der Schutzwirkung hat.

46 OVG Münster, Urt. v. 25.9.2024 – 7 D 117/23.AK, Rn. 73., zudem besprochen in FA Wind und Solar (2025b), S.25 ff.

47 Söfker in: Ernst, Zinkahn, Bielenberg, Krautzberger, Baugesetzbuch, 157. EL November 2024, § 35 Rn. 165b.

48 Agatz (2023), S. 215; so auch bereits Sittig-Behm (2020), S. 315.

49 Vgl. hierzu VGH Kassel, Beschl. v. 30.6.2023 – 9 B 2279/21.T, Rn. 52 ff., zudem besprochen in FA Wind (2023) Rundbrief Windenergie und Recht (3/2023), S.25 f.

50 Vgl. Mitschang, Reidt in: Battis, Kratzberger, Löhr, BauGB, 16. Aufl. 2025, § 35 Rn. 181.

Wichtig:

Rückbau und Stilllegung der betreffenden Windenergieanlage müssen dem Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur (BNetzA) gemeldet werden. Wer dies fahrlässig oder vorsätzlich unterlässt, handelt gemäß § 21 Marktstammdatenregisterverordnung (MaStRV) ordnungswidrig. Es drohen nach § 95 EnWG in diesem Fall empfindliche Bußgelder.

Was ist bei einem Betreiberwechsel zu beachten?

In der Praxis kommt es häufig vor, dass der Betreiber einer Anlage wechselt. Mit Blick auf die Rückbausicherheit stellt sich dabei die Frage, ob sich daraus besondere Probleme ergeben. Denn nicht jede Sicherheitsleistung lässt sich ohne Weiteres auf einen neuen Betreiber übertragen.

Der Hessische Rückbauerlass sieht deshalb vor, dass bereits in der Verpflichtungserklärung des ursprünglichen Betreibers zugesichert wird, dass etwaige Rechtsnachfolger über die Rückbauverpflichtung informiert werden und diese auch übernehmen. Zusätzlich wird in einer Auflage zur Sicherstellung der Rückbauverpflichtung geregelt, dass im Falle eines Betreiberwechsels eine Anzeigepflicht besteht. Der neue Betreiber muss dann innerhalb einer bestimmten Frist eine eigene Rückbauverpflichtungserklärung i. S. d. § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB abgeben und ggf. eine eigene Sicherheitsleistung erbringen.[51] Ob eine solche Regelung im Hessischen Rückbauerlass tatsächlich erforderlich ist, kann hinterfragt werden. Denn letztlich tritt der neue Betreiber in die Rechtsposition des bisherigen Betreibers ein und übernimmt damit auch dessen Rechte und Pflichten – einschließlich der Rückbaupflicht.

3.1.3 Rückbauanordnung

Für Anlagen, die vor dem 20. Juli 2004 genehmigt wurden, ist § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB nicht anwendbar (siehe hierzu bereits unter 3.1.1). Damals war weder die Abgabe einer Verpflichtungserklärung für den Rückbau im Zulassungsverfahren vorgesehen, noch war die Baugenehmigungsbehörde verpflichtet, die Einhaltung der Rückbauverpflichtung durch Baulast oder in anderer Weise sicherzustellen. Dies bedeutet allerdings nicht, dass in diesen Fällen kein Rückbau erfolgen muss. Das Bundesverwaltungsgericht hat entschieden, dass mit der endgültigen Aufgabe einer genehmigten Nutzung auch der Bestandsschutz einer baulichen Anlage endet.[52] Die Rückbaupflicht folgt somit auch ohne Verpflichtungserklärung aus der dauerhaften Nutzungsaufgabe.[53]

Die Verpflichtung zum Rückbau ergibt sich für Anlagen, die vor dem 20. Juli 2004 genehmigt wurden, in der Regel nicht bereits aus der Genehmigung selbst. Sie muss daher durch eine behördliche Rückbauanordnung durchgesetzt werden. Es gibt allerdings auch Genehmigungen, in denen bereits Nebenbestimmungen zum Rückbau enthalten sind. Fragen zur Rechtmäßigkeit solcher Nebenbestimmungen stellen sich heute meist nicht mehr, da die entsprechenden Regelungen mittlerweile bestandskräftig sind.[54]

Rechtsgrundlagen für eine Rückbauanordnung

Die Ermächtigungsgrundlagen für den Erlass einer bauordnungsrechtlichen Rückbauanordnung (Beseitigungsanordnung) finden sich in den entsprechenden Landesbauordnungen, z. B. Art. 54 Abs. 2 Satz 2 Bayerische Bauordnung (BayBO). Wird eine solche Rückbauanordnung erlassen, obliegt dies gemäß den jeweiligen landesgesetzlichen Regelungen in der Bauordnung der unteren Baubehörde.

Eine Rückbauanordnung kann unter bestimmten gesetzlichen Voraussetzungen auch auf eine immissionsschutzrechtliche Rechtsgrundlage gestützt werden. Teils wird erwogen, dass die in § 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG normierte immissionsschutzrechtliche Nachsorgepflicht im Wege einer nachträglichen Anordnung gem. § 17 Abs. 1 Satz 1 BImSchG durchgesetzt werden könnte. Danach sind immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen u. a. so stillzulegen, dass nach der Betriebseinstellung die Wiederherstellung eines ordnungsgemäßen Zustands des Anlagengrundstücks gewährleistet ist. Zweck des § 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG ist es, die Umweltverträglichkeit stillgelegter Anlagen sicherzustellen. [55]

Die Funktion des Bauplanungsrechts weicht hiervon ab. Sie liegt insbesondere in der Festlegung der rechtlichen Qualität und der Nutzbarkeit von Grund und Boden.[56] Daher ist im

51 Vgl. HMWEVW und HMUKLV (2019), S. 7 ff.

52 Vgl. BVerwG, Beschl. v. 21. 11. 2000 - 4 B 36/00.

53 Vgl. Sittig-Behm (2020), S. 313, der insoweit darauf verweist, dass dieser Auffassung zwar in der Literatur mit gewichtigen Argumenten entgegengetreten wird, die Rechtsprechung des BVerwG aber Richtschnur für die Praxis bleiben dürfte.

54 Sittig-Behm (2020), S. 313.

55 Seibert (2019), S. 140.

56 Seibert (2019), S. 141.

Einzelfall zu ermitteln, ob der Rückbau der Anlage für immissionsschutzrechtliche Zwecke erforderlich ist – was in der Regel der Fall sein dürfte. Eine nachträgliche Anordnung dürfte ebenfalls erst drei Jahre nach Betriebsende gem. § 18 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG erfolgen. Zuständig ist in diesem Fall die untere Immissionsschutzbehörde.

3.1.4 Reichweite der Rückbauverpflichtung

Wie bereits ausführlich dargelegt, ist nach dem Wortlaut des § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB eine Verpflichtungserklärung abzugeben,

> *„[…] das Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und Bodenversiegelungen zu beseitigen."*

In welchem Umfang Windenergieanlagen nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB oder auf Grundlage einer bauordnungsrechtlichen Beseitigungsanordnung zurückzubauen sind, ist im Hinblick auf die verschiedenen Gründungsformen (Fundamente), Zuwegungen und Kabel umstritten. Die Länder handhaben den Rückbau hier unterschiedlich.

Ist die Gründung vollständig zurückzubauen?

Windenergieanlagen erfordern eine hohe Standsicherheit. In der Praxis kommen daher unterschiedliche Fundamentarten zum Einsatz. Die meistverwendete Flachgründung (siehe Kapitel 2.2.1) ist ohne Frage vollständig zurückzubauen, was sich auch in den meisten Fällen problemlos und ohne relevante Bodeneingriffe umsetzen lässt.

Bei schwierigen Bodenverhältnissen kann die Gründung auch als Pfahlgründung erfolgen (siehe Kapitel 2.2.1). Wie bereits dargelegt, ist unstreitig, dass alle oberirdischen Bauteile einer Windenergieanlage nach der dauerhaften Nutzungsaufgabe zurückzubauen sind. Problematisch ist jedoch die viel diskutierte Frage, ob Pfahlgründungen, die unter Umständen mehr als 20 m tief in den Boden reichen, ebenfalls vollständig zu beseitigen sind. Unproblematisch dürfte es hingegen sein, die Fundamentplatte zu entfernen und damit die oberflächennahe Versiegelung zu beseitigen. Die Entfernung der gebohrten oder gerammten Pfähle kann hingegen mit erheblichen Eingriffen in die Bodenstruktur einhergehen.

Rechtliche Einordnung

Hinsichtlich des Umfangs der Rückbauverpflichtung für die Fundamente von Windenergieanlagen differenziert § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB nicht zwischen den verschiedenen Fundamenten. Vorgeschrieben ist die Abgabe einer Verpflichtungserklärung, das „Vorhaben" nach der dauerhaften Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und die „Bodenversiegelung zu beseitigen".

In der rechtswissenschaftlichen Literatur wird unterschiedlich diskutiert, wie der Umfang der Rückbauverpflichtung für die Fundamente zu beurteilen ist:

So führt *Sittig-Behm* aus,[57] dass die Rechtsgrundlage für die Rückbaupflicht entscheidend für die Bestimmung des Rückbauumfangs ist. Folgt man der Auffassung, dass aus § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB unmittelbar eine Rückbaupflicht resultiert, ergibt sich der Umfang des Rückbaus direkt aus dem Wortlaut der Norm. Demnach ist das „Vorhaben" zurückzubauen und „die Bodenversiegelung zu beseitigen". Als „Vorhaben" könne spiegelbildlich nur das gelten, was genehmigungsrechtlich zugelassen wurde: die gesamte bauliche Anlage einschließlich der Fundamente. Nach dieser Auffassung bleibt kein Raum für Abwägungen der Verhältnismäßigkeit oder Ermessensausübung. Eine Ausnahme könne nur gelten, wenn die vollständige Beseitigung der Fundamente objektiv unmöglich wäre. Wird hingegen davon ausgegangen, dass sich die Rückbaupflicht aus der Verpflichtungserklärung des Betreibers ergibt – oder dass diese zumindest nach Treu und Glauben Einwendungen gegen eine Rückbauanordnung ausschließt –, folgt der Umfang des Rückbaus aus der Verpflichtungserklärung.[58]

Auch *Gaßner* geht davon aus, dass das Fundament im Regelfall vollständig zu entfernen ist und die Rückbaupflicht das bauliche „Vorhaben" umfasst, das i. S. d. § 29 BauGB auch die unterirdischen Teile mit einschließt. Diese Sichtweise wird zusätzlich durch die Pflicht zur Entsiegelung gestützt, die die Rückbaupflicht nicht einschränkt. Für diese Auslegung spreche zudem auch der Zweck des § 35 BauGB, nämlich eine größtmögliche Schonung des Außenbereichs.[59] In diese Richtung geht auch die DIN Spec 4866, wonach die bauliche Anlage grundsätzlich vollständig zurückzubauen ist.[60]

Für Anlagen, die vor der Einführung des § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB genehmigt wurden oder für die eine Rückbauanordnung ergangen ist, gilt: Beruht die Rückbaupflicht auf einer Ermächtigungsgrundlage der jeweiligen Landesbauordnung, liegt der Umfang des Rückbaus im Ermessen der Behörde. Beispielhaft sei § 80 Satz 1 der Musterbauordnung genannt, wonach die Bauaufsichtsbehörde die teilweise oder vollständige Beseitigung von Anlagen anordnen kann, wenn diese im Widerspruch zu öffentlich-rechtlichen Vorschriften errichtet oder geändert wurden. Die Bundesländer haben ihre bauordnungsrechtlichen Ermächtigungsgrundlagen im Wesentlichen inhaltsgleich ausgestaltet. Eine vollständige Beseitigung einer

57 Vgl. Sittig-Behm (2020), S. 314 f.
58 Vgl. Sittig-Behm (2020), S. 314 f.
59 Gaßner in FA Wind (2018), S. 13.
60 DIN SPEC 4866 (2020), S. 15.

Windenergieanlage, die auch die Tiefengründung umfasst, muss daher verhältnismäßig sein. Unverhältnismäßig wäre ein vollständiger Rückbau jedoch nur dann, wenn der Eingriff in die Schutzgüter schwerer wöge als das Belassen von Teilen der Fundamente[61] – etwa, wenn die Entfernung der Pfahlgründung mit einer Verunreinigung von Grundwasser verbunden wäre.[62]

Auch Rückbauanordnungen, die als nachträgliche Anordnung auf Grundlage von § 17 Abs. 1 Satz 1 BImSchG ergehen, unterliegen einer Ermessensprüfung. § 17 Abs. 2 BImSchG enthält zudem ausdrücklich ein Verbot nachträglicher Anordnungen, wenn diese unverhältnismäßig wären.[63] Ein vollständiger Rückbau der Pfahlgründung dürfte nicht unverhältnismäßig sein. Eine Ausnahme dürfte lediglich dann bestehen, wenn durch den Rückbau andere Umweltrechtsgüter schwerwiegend und unvermeidbar beeinträchtigt würden.

Rechtsprechung

Zur Frage, ob Pfahlgründungen vollständig zurückzubauen sind, gibt es bislang keine gerichtlichen Entscheidungen. Der Verwaltungsgerichtshof Kassel hat sich jedoch in einem Verfahren mit der Höhe der Sicherheitsleistung für den Rückbau einer Windenergieanlage i. S. d. § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB befasst und kam zu folgendem Ergebnis:

> *„Um die Beeinträchtigung beim Landschaftsbild und im Funktionszusammenhang beim Schutzgut Boden rückgängig zu machen, ist nicht nur der Ausbau des oberirdischen Teils der Windkraftanlage geboten, sondern auch die Entfernung des Betonfundaments."*

Das Gericht hielt damit im konkreten Fall nicht nur den Rückbau der oberirdischen Anlagenteile, sondern auch die Entfernung des Fundaments für erforderlich. Diese Entscheidung erfolgte allerdings ohne nähere Begründung und lässt sich nicht ohne Weiteres auf Pfahlgründungen übertragen. Zudem betrifft sie ausschließlich Windenergieanlagen, die in den Anwendungsbereich des § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB fallen.

Vorgaben in den Ländern

Die Länder haben zum Rückbau von Pfahlgründungen unterschiedliche Vorgaben erlassen. Diese reichen von einer vollständigen Entfernung über eine teilweise Beseitigung bis hin zum Verbleib im Boden. Die Regelungen dienen in erster Linie der Vereinheitlichung der Verwaltungspraxis. Sie sind als abstrakt-generelle Regelungen ohne Außenwirkung ausgestaltet. Rechtlich verbindlich sind sie daher nicht, Gerichte können sie lediglich als Orientierungshilfe heranziehen.[64] Für die Verwaltungspraxis sind sie dennoch maßgeblich, da die Behörden intern an diese Vorgaben gebunden sind.

Beispielsweise verlangt der Windenergieerlass[65] in Niedersachsen, dass grundsätzlich alle ober- und unterirdischen Anlagenteile zu beseitigen sind. Eine Ausnahme gilt, wenn ein vollständiger Rückbau unverhältnismäßig wäre oder gewichtige öffentliche Belange entgegenstehen. Für Pfahlgründungen ist ausdrücklich vorgesehen, dass sie aus Bodenschutzgründen im Boden verbleiben können.

In Sachsen müssen nach den „Gemeinsamen Hinweisen" des Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) und des Sächsischen Staatsministeriums des Innern (SMI)[66] alle ober- und unterirdischen Anlagenteile einschließlich der Fundamente vollständig entfernt werden. Zudem ist vorgeschrieben, Bodenlöcher wieder zu verfüllen.

In Schleswig-Holstein wird im Rückbauerlass[67] betont, dass der Außenbereichsschutz den vollständigen Rückbau zum Schutz der Landschaft verlangt. Für Anlagen, die vor dem 20. Juli 2004 genehmigt wurden, gilt: Grundsätzlich ist der vollständige Rückbau anzustreben, mindestens aber bis zu einer Tiefe von zwei Metern unter der Geländeoberfläche. Für Anlagen mit Genehmigung nach dem 20. Juli 2004 schreibt § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB den vollständigen Rückbau einschließlich der Pfahlgründungen vor. Ist schon in der Planungsphase absehbar, dass eine Tiefgründung später nicht ohne Verletzung rechtlich geschützter Umweltgüter entfernt werden könnte, gilt dennoch: Bei Stilllegung ist die größtmögliche Rückbauoption zu fordern. Gleiches gilt, wenn bei Nutzungsende unvorhergesehene Umstände auftreten. Die Genehmigungsbehörde entscheidet dann im Einzelfall über den Rückbauumfang. Dabei müssen alle relevanten Belange berücksichtigt und die Verhältnismäßigkeit gewahrt werden.

Im Einzelfall ist es nicht ausgeschlossen, dass der Anlagenbetreiber in Abstimmung mit der zuständigen Aufsichtsbehörde für den Rückbau der Pfahlgründung eine abweichende Regelung treffen kann. Diese kommt insbesondere dann in Betracht, wenn der Eingriff in das Schutzgut Boden so gravierend wäre, dass ein Missverhältnis in der Güterabwägung entsteht. Dies kann dann der Fall sein, wenn eine sehr tiefe Gründung vollständig zurückgebaut werden müsste und dafür erhebliche Eingriffe in den Boden durch einen umfangreichen Bodenaushub erforderlich wären. Hinzu kommt, dass nicht pauschal ausgeschlossen werden kann, dass der Eingriff in das Schutzgut Boden nachwirkt. So kann sich bei der Verfüllung der Baugrube der neu eingebrachte Boden später noch setzen, was erneute Maßnahmen erforderlich machen könnte, um Absenkungen auszugleichen.

61 Sittig-Behm (2020), S.315.
62 FA Wind (2021), S. 8.
63 Hansmann, Ohms in: Landmann, Rohmer (2025), § 17 BImSchG Rn. 112.
64 Vgl. OVG Münster, Beschluss v. 9.7.2003 – 7 B 949/03.
65 MUENK, ML, MI, MWVB (2021).
66 SMI, SMUL (2016).
67 MELUND (2020).

Zudem stellt sich die Frage, ob unter bodenrechtlichen Gesichtspunkten überhaupt zwingend ein vollständiger Rückbau notwendig ist. Denn Bodenstrukturen haben sich oft an den bestehenden Zustand angepasst, und auch Wasseradern können neue Verläufe entwickelt haben. In den meisten Fällen ist eine nachfolgende Nutzung nicht beeinträchtigt, da beispielsweise eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung in aller Regel nur oberflächennah stattfindet.

Grundsätzlich sind alle Bestandteile einer Windenergieanlage zurückzubauen. Im Einzelfall können – insbesondere bei der Gründung – durchaus abweichende Lösungen in Betracht kommen.

Rückbau von Kabeln und Zuwegungen

Die Verpflichtung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB bezieht sich auf den Rückbau des Vorhabens. Darunter fällt in erster Linie die bauliche Anlage selbst, unter Umständen gehören aber auch Nebenanlagen, Leitungen, Wege und Plätze dazu. Zuwegungen und Kabel, die der Erschließung des Vorhabens dienen, sind nicht Teil des bauplanungsrechtlichen Vorhabens. Sie müssen also nicht als „Vorhaben“ zurückgebaut werden. Gleichwohl stellen auch sie eine Bodenversiegelung dar. Nach der dauerhaften Nutzungsaufgabe der baulichen Anlage sind sie daher grundsätzlich zu beseitigen, um die Kernfunktion des Außenbereichs und die ursprüngliche Bodenfunktion wiederherzustellen. Aber auch hier hängt die Bewertung stark vom Einzelfall ab. Entscheidend ist, ob tatsächlich von einer dauerhaften Nutzungsaufgabe auszugehen ist. Fehlt es daran, etwa weil die Anlagen im Zuge eines Repowerings weitergenutzt werden, scheidet eine Rückbaupflicht regelmäßig aus.

3.2 Recycling von Windenergieanlagen

Beim Rückbau von Windenergieanlagen sind die Betreiber dazu verpflichtet, die verbauten Komponenten und Materialien ordnungsgemäß zu entsorgen. Zentrales Regelwerk hierfür ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)[68], das die Abfallentsorgung bundesweit regelt. Ist eine Nachnutzung der Windenergieanlagen oder Teilen dieser oder ein Recycling bzw. eine sonstige Verwertung der Materialien nicht möglich, müssen diese als Abfall beseitigt werden.

3.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) enthält gesetzliche Vorgaben, die eine ordnungsgemäße Abfallentsorgung sicherstellen. Diese sind auch beim Rückbau von Windenergieanlagen zu beachten.

Abfallhierarchie – Abfallvermeidung vor Entsorgung

Zentral ist die sogenannte fünfstufige Abfallhierarchie. Sie wurde in der EU-Abfallrahmenrichtlinie festgelegt und in § 6 Abs. 1 KrWG in nationales Recht umgesetzt.[69] Die Abfallhierarchie ordnet die Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung nach einem festen Rangverhältnis:[70] An erster Stelle steht die Abfallvermeidung. Danach folgen die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling, die sonstige Verwertung (insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung) und zuletzt die Beseitigung.

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz enthält zudem einen ökologischen Optimierungsvorbehalt. Demnach ist stets diejenige Maßnahme vorrangig, die den Schutz von Menschen und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet (§ 6 Abs. 2 KrWG).

Abbildung 4: Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz
Quelle: FA Wind und Solar, eigene Darstellung

68 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) v. 24.2.2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Art. 5 d. Gesetzes v. 2.3.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56).

69 BMUKN (2025), S. 1.

70 Reese in: Jarass, Petersen, Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2. Aufl. 2022, § 6 Rn. 1.

Pflichten für Windenergieanlagenbetreiber

Aus der Grundsatznorm des § 6 KrWG selbst ergeben sich keine unmittelbaren Pflichten für Abfallerzeuger. Die Abfallhierarchie findet jedoch an anderer Stelle Ausdruck. So bestimmt § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG, dass genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben sind, dass Abfälle möglichst vermieden und nicht zu vermeidende Abfälle verwertet werden. Nur Abfälle, die sich nicht verwerten lassen, ohne das Wohl der Allgemeinheit zu beeinträchtigen, dürfen beseitigt werden.[71] Diese Vorschrift betrifft allerdings allein Abfälle aus dem laufenden Anlagenbetrieb. Für Abfälle, die mit dem Rückbau entstehen, ist sie nicht relevant.[72]

Auf Grundlage der Abfallhierarchie enthält das Kreislaufwirtschaftsgesetz jedoch konkrete Grundpflichten, die auch beim Rückbau von Windenenergieanlagen gelten: Nach der allgemeinen Verwertungspflicht gem. § 7 Abs. 2 KrWG sind Erzeuger und Besitzer von Abfällen verpflichtet, diese vorrangig zu verwerten.[73] Die Verwertung muss nach § 7 Abs. 3 KrWG ordnungsgemäß und schadlos erfolgen. Ist eine Verwertung nicht möglich, so sind Abfälle gem. § 15 Abs. 2 KrWG so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

In der Praxis können Betreiber den Rückbau und das Recycling nicht selbst durchführen. Sie werden diese Aufgaben daher an spezialisierte Abfall- bzw. Rückbauunternehmen delegieren. Grundlage hierfür ist regelmäßig ein Werkvertrag nach §§ 631 ff. BGB. Darin verpflichtet sich der Rückbauunternehmer, die Windenergieanlage vollständig und fachgerecht zurückzubauen. Die Entsorgungsverantwortung der Betreiber endet jedoch nicht mit Vertragsschluss oder der Übergabe der Abfälle an ein Entsorgungsunternehmen, sondern sie bleibt bis zur endgültigen und ordnungsgemäßen Entsorgung gem. § 22 KrWG bestehen.[74] Betreiber sind daher auch verpflichtet, die nach § 22 Satz 3 KrWG erforderliche Zuverlässigkeit des beauftragen Entsorgungsunternehmens zu überprüfen.[75]

Die Einhaltung der abfallrechtlichen Vorschriften und die ordnungsgemäße Entsorgung von Abfällen wird von den zuständigen Behörden überwacht. „Ansprechpartner“ für die aufsichtsführende Behörde bleibt trotz der Delegation der Anlagenbetreiber.

Die maßgeblichen Regelungen zur Überwachung finden sich in Abschnitt 6, §§ 47-55 KrWG sowie in der Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (NachwV). Betreiber unterliegen daher Register- und Nachweispflichten. So müssen sie nach § 50 Abs. 1 KrWG die ordnungsgemäße Entsorgung gefährlicher Abfälle wie Betriebsflüssigkeiten, Schmierstoffe oder SF_6-Gase gegenüber der zuständigen Behörde nachweisen.[76] Diese Nachweispflicht gilt gem. § 50 Abs. 1 KrWG auch im Verhältnis zwischen Erzeugern, Besitzern, Sammlern, Beförderern und Entsorgern.

Exkurs: Erweiterte Herstellerverantwortung

Die EU-Abfallrahmenrichtlinie[77] legt den rechtlichen Rahmen für den Umgang mit Abfällen in der Europäischen Union fest. Zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit sollen ordnungsgemäße Techniken der Abfallbewirtschaftung, der Verwertung sowie des Recyclings den Druck auf Ressourcen verringern und deren Nutzung verbessern. Ein Element der Richtlinie ist das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung (Art. 8). Hersteller tragen demnach für den gesamten Lebenszyklus ihrer gewerbsmäßigen Erzeugnisse finanzielle und organisatorische Verantwortung, einschließlich Entsorgung und Recycling. In Deutschland wurden diese Vorgaben in den Vorschriften über die Produktverantwortung (§§ 23 ff. KrWG) umgesetzt.[78] Nach § 23 Abs. 1 Satz 2 KrWG sollen Erzeugnisse so gestaltet sein, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch möglichst wenige Abfälle entstehen. Zudem muss sichergestellt sein, dass die nach ihrem Gebrauch anfallenden Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden können.

71 BMUKN (2025), S. 4 f.

72 Jarass in: ders., BImSchG, 15. Aufl. 2024, § 5 Rn. 72.

73 BMUKN (2025), S. 3.

74 UB (2023), S. 32.

75 Beckmann in: Landmann, Rohmer (2025), § 22 KrWG, Rn. 39a.

76 UBA (2023), S. 33; UBA (2019), S. 160.

77 Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates v. 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (ABl. L 312/3 v. 22.11.2008), geändert durch die Richtlinie (EU) 2018/851 v. 30.5.2018.

78 Petersen (2022), S. 923.

3.2.2 Sonstige relevante Vorgaben

Für das Recycling, die Verwertung oder Beseitigung einzelner Komponenten von Windenergieanlagen bestehen auch in anderen Gesetzen und Verordnungen relevante Vorgaben. Dazu gehören unter anderem die Gewerbeabfallverordnung (GewAbV), die Altöl-Verordnung (AltölV), das Batteriegesetz (BattG) und die Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV). Nach § 8 Abs.1 GewAbV besteht etwa die Pflicht, bestimmte Abfallfraktionen wie Beton oder Metalle getrennt zu sammeln. Für mineralische Abfälle wie zum Beispiel Bauschutt gelten zudem die Regelungen der Ersatzbaustoffverordnung. Hydrauliköle, die in den Getrieben von Windenergieanlagen verwendet werden, müssen nach § 4 AltölVO separat von anderen Abfällen gehalten werden.

Besondere Bedeutung haben in der Praxis gasisolierte Schaltanlagen mit fluorierenden Treibhausgasen wie Schwefelhexafluorid (SF_6). SF_6 ist das stärkste Treibhausgas der Welt und 23.500-mal stärker als CO_2. Dieses Gas zeichnet sich durch eine sehr hohe Isolier- und Lichtbogenlöscheigenschaft aus, weshalb es in Schaltanlagen von WEA als Schutz- und Isoliergas verwendet wird (siehe 5.2.1 und nachfolgenden Exkurs).

Die Verantwortung für die Rückgewinnung, das Recycling, die Wiederverwendung oder die Entsorgung des Gases unterliegt der freiwilligen Selbstverpflichtung der Anwender. In dieser Selbstverpflichtung heißt es u. a., dass sich die Unterzeichner verpflichten, die Emissionen von SF_6 so weit wie möglich zu minimieren. Vor diesem Hintergrund wird davon ausgegangen, dass das in der Schaltanlage enthaltene SF_6 nach Ablauf der technischen Lebensdauer durch den Hersteller oder einen zertifizierten Entsorgungsfachbetrieb ordnungsgemäß zurückgewonnen wird.[79] Problematisch ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass die Selbstverpflichtung freiwillig ist und somit unter rechtlichen Gesichtspunkten nur geringe bis keine Bindungswirkung entfaltet. Dies führt dazu, dass die Einhaltung dieser Verpflichtung nur schwer überprüfbar und kaum quantifizierbar ist.

Darüber hinaus bestehen im Zusammenhang mit der Verwendung des SF_6 Gases auch praktische Herausforderungen. Abhängig von der konkreten Anwendung und der jeweiligen Spannungsebene stehen nicht immer treibhausgasneutrale bzw. umweltfreundliche Alternativen zur Verfügung, insbesondere auf der Mittelspannungsebene über 24 kV. Vor diesem Hintergrund wird in der Praxis häufig neues SF_6 nachgefüllt.[80]

Auch können beim Rückbau Altbatterien anfallen, etwa solche, die für eine Notstromversorgung eingesetzt wurden. Nach dem Batteriegesetz (BattG) sind Hersteller verpflichtet, Altbatterien zurückzunehmen, ordnungsgemäß zu verwerten und umweltgerecht zu entsorgen. Endnutzer müssen die Möglichkeit haben, diese Batterien an den dafür vorgesehenen Rücknahmestellen zurückzugeben (§ 11 BattG). Diese Pflicht gilt auch für Betreiber von Windenergieanlagen,[81] wobei in der Rückbaupraxis für die Umsetzung regelmäßig die beauftragten Rückbauunternehmen verantwortlich sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Rückbau einer Windenergieanlage unter rechtlichen Gesichtspunkten deutlich komplexer ist, als es die bloße Frage nach der Einordnung, auf welcher rechtlichen Grundlage eine WEA zurückzubauen ist, vermuten lässt. Insbesondere die Vielzahl der einzelnen Komponenten – etwa Schaltanlagen, Batterien, Öle, Schmiermittel – und die damit im Zusammenhang stehenden fachgesetzlichen Vorgaben führen dazu, dass die Anlagenbetreiber frühzeitig mit einem spezialisierten Rückbau- oder Entsorgungsunternehmen abstimmen sollten, um den Rückbau rechtskonform durchzuführen. Denn letztlich bleibt es dabei: Die rechtliche Verantwortung nach außen tragen stets die Betreiber.

79 Vgl. BWE (2023a).

80 Vgl. BWE (2023a).

81 Vgl. UBA (2023), S. 34 ff.

4 E-DIN 4866 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen“

Meilenstein erreicht – der Entwurf liegt vor

Autoren: Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg, Vorstand der RDRWind e. V.

Nach rund dreijähriger Arbeit zur Überführung der von der Industrievereinigung für Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen (RDRWind e. V.) initiierten und in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Institut für Normung (DIN e. V.) und dem Umweltbundesamt erarbeiteten DIN SPEC 4866:2020-08 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“ in eine DIN-Norm, liegt seit September 2025 der Entwurf dieser DIN als E-DIN 4866: 2025-11 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlegen“ vor.

Arbeitsgremium im DIN

Die Arbeit dazu erfolgte im DIN-Arbeitsausschuss „Abbrucharbeiten“ DIN-NA 005-53-51 AA gemeinsam mit praxisnahen Experten aus dem Rückbau und Abbruch von technischen Anlagen und Bauwerken wie auch Vertretern aus Forschung, Verbänden und der Berufsgenossenschaft. Vorstand, Beiräte und Mitgliedsunternehmen der RDRWind e.V. haben sich hierbei maßgeblich mit eingebracht.

Ziele der Normungsarbeit

Ziel war es, über die Norm „Effizienz zu schaffen“ und für eine „gleichbleibende sowie vergleichbare Qualität“ in den Arbeitsprozessen zu sorgen. Das schafft Vertrauen bei den am Prozess Beteiligten, den Planern und Rückbauunternehmen auf der einen Seite und bei Betreibern, den Grundstückeigentümern, den Kommunen und allen beteiligten Behörden auf der anderen Seite.

Darüber hinaus stehen Normen unter rechtlichen Aspekten für mehr Sicherheit, auch das war ein wesentlicher Antrieb, um die DIN-Norm zu entwickeln, die voraussichtlich im 2. Quartal 2026 erscheinen wird.

Rückblick und Ausblick

Die DIN SPEC 4866 aus dem Jahr 2020 legte erstmalig als neuer Branchenstandard Handlungsanweisungen und Qualifikationsvoraussetzungen für den Rückbau, die Demontage, das Recycling und die Verwertung von Onshore-Windenergieanlagen fest. Darüber hinaus gab die DIN SPEC 4866 einen Überblick über die vorab erforderlichen Erkundungen, Planungen sowie die damit verbundenen behördlichen Genehmigungen.

Die neue DIN-Norm 4866 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen“ fußt bei den grundlegenden allgemeinen Aspekten (Abschnitt 1 bis 7) auf den Richtlinien der VDI 6210 „Abbruch von baulichen und technischen Anlagen“. Sie greift ferner Inhalte der DIN-Norm 18007 „Abbrucharbeiten — Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche“ auf. Damit stellt sie den Rückbau für die Windenergieanlagen an Land in den Gesamtkontext „Abbruch von baulichen und technischen Anlagen“.

Grundsätze der neuen DIN 4866

- DIN 4866 bestimmt für alle am Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen an Land (Onshore-WEA) Beteiligten Verantwortlichkeiten, Verfahren und Beurteilungsgrundlagen für die Planung und Durchführung des Abbruchs und Rückbaus.
- Sie stellt – neben einer Sicherstellung der arbeitsschutz- und umweltschutzgerechten Belange – die Grundlage für einen im Sinne der Kreislaufwirtschaft notwendigen zielgerichteten Abbruch (Recycling und Verwertung von Abfällen) und Rückbau (Wiederverwendung gebrauchter Anlagen und Produkte) dar.
- Sie ist eine richtungsweisende Arbeitsunterlage für Bauherren, Planer und Ausführende.

Die wichtigste Änderung gegenüber der DIN SPEC: Verantwortlichkeiten

Eine der größeren Änderungen betrifft die früheren Kapitel in der DIN SPEC zu Verantwortlichkeiten und Planung. Hier sind auf der Basis der VDI 6210 nun deutlich ausführlichere Darlegungen zu den einzelnen Verantwortlichkeiten und Aufgaben der am Prozess Beteiligten, inklusive Anforderungen an die Beteiligten, vorhanden.

Diese Ausführungen erfolgen anhand der realen zeitlichen Abfolgen nach der Entscheidung des Bauherrn für einen Abbruch bzw. eine Rückbaumaßnahme und reichen von den

- Bauherrenaufgaben mit Planungs- und Entsorgungsverantwortung und der
- Planung zum Abbruch-/Rückbaukonzept, inklusive Anzeige/Genehmigung und der Ausschreibung der Arbeiten, bis zur
- Vergabe und der damit verbundenen anschließenden Ausführungsplanung durch den Auftragnehmer.

Anforderungen an die Informationsbeschaffung

Um sicherzustellen, dass der Abbau und die Entsorgung der Windenergieanlage und der dazugehörigen Infrastruktur effizient und sicher umgesetzt werden können, müssen die Materialzusammensetzung und die Gewichte, Abmessungen oder Volumen der einzelnen Komponenten der Windenergieanlage und Daten zur Infrastruktur und Betriebsmitteln möglichst umfassend bekannt sein. Von daher sind im Rahmen der Ausführungen zu den Bauherrenaufgaben hier drei informative Anhänge mit eingeführt worden:

- Anhang B: Mindestdatensatz an Herstellerangaben für den Rückbau der Windenergieanlage,
- u. a. Anlagenzusammensetzung, Gewichte, Materialzusammensetzungen.
- Anhang C: Mindestdatensatz Angaben Betreiber/Bauherr für den Rückbau der Windenergieanlage,
- u. a. Angaben zu Fundament, Austausch/Ersatz von Anlagenkomponenten.
- Anhang D: Übersicht verwendeter Betriebsmittel zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme der WEA.

Ferner sind Anforderungen an die am Prozess Beteiligten, wie Fachplaner und das Abbruchunternehmen, vorhanden.

In Anhang A sind Nachweise der Fachkunde, der Zuverlässigkeit, der Leistungsfähigkeit und der Qualitätssicherung für geeignete Abbruchunternehmen zusammengestellt.

Zur Risikoabdeckung muss ein Versicherungsnachweis erbracht werden. Dabei müssen sowohl die Deckungssummen als auch die versicherten Risiken benannt werden. Dieser Anhang ist normativ.

Ausführungsplanung

Die bisherigen Regelungen der DIN SPEC zur „Durchführung der Arbeiten“ finden sich nunmehr weitgehend in dem Kapitel 8.1.2 „Ausführungsbezogene Arbeits-/Gesundheits- und Umweltschutzplanung“ wieder. Bei der Ausführungsplanung müssen Aspekte zu den Schüttgütern, zur Arbeitssicherheit und zum Gesundheitsschutz, zu Lärm, Luftemissionen, Boden einschließlich Erschütterungen, zu Wasser, Grundwasser, Flora und Fauna sowie kreislaufwirtschaftliche Aspekte zum Ressourcenschutz explizit mitberücksichtigt werden. Hierzu gehört nun auch ein normativer Anhang E: „Checkliste Baustelleneinrichtung“.

Neuer kreislaufwirtschaftlicher Ansatz bei der neuen DIN 4866 mit implementiert

Im Rahmen der Verpflichtungen zu einem effizienten Ressourcen- und Klimaschutz, insbesondere bei Abbrucharbeiten von Bauwerken und technischen Anlagen, wurde hier die mehrmalige Prüfung der Verantwortlichen während des Prozesses eingeführt – von der Entscheidung des Bauherrn zum Entledigungswillen, über den Fachplaner bis zur Ausführungsplanung auf eine mögliche Zweitnutzung von Anlagenteilen oder Komponenten.

Rückbau und Abbruch

Dies wurde durch die klare Trennung von Rückbau, hier mit dem Ziel Gewinnung von gebrauchten Produkten für die Zweitverwertung, gegenüber dem Abbruch, hier mit dem Anspruch eines möglichst effizienten materialspezifischen Recyclings der einzelnen verbauten Stoffe, umgesetzt.

Mit der Einführung der DIN Norm 4866 wird im 2. Quartal 2026 gerechnet.

5 Rückbau und Demontage

5.1 Planung der Rückbauphase

Steht die Entscheidung zur dauerhaften Stilllegung einer Windenergieanlage fest, ist zunächst zu prüfen, ob für den Rückbau bzw. die Demontage eine baubehördliche Genehmigung erforderlich ist. Dies hängt von den jeweiligen landesrechtlichen Vorgaben ab. Es wird empfohlen, frühzeitig Kontakt mit der zuständigen Baubehörde aufzunehmen. Eine Übersicht über mögliche Genehmigungserfordernisse bietet Anhang A, Tabelle A.1 der DIN SPEC 4866.[82]

Für die Planung der Rückbauphase ist ein Rückbau- und Entsorgungskonzept erforderlich. Es basiert auf den Hersteller- und Betreiberangaben sowie den örtlichen Gegebenheiten. Zu Beginn wird eine detaillierte Standortanalyse durchgeführt, um alle relevanten Daten zu erfassen und daraus belastbare Zeitpläne sowie den Ressourcenbedarf abzuleiten. Der Betreiber ist verpflichtet, das Rückbauvorhaben sowohl der örtlichen Baubehörde als auch dem Marktstammdatenregister[83] (MaStR) der Bundesnetzagentur (BNetzA) zu melden.

In technischen Belangen sollten Betreiber qualifizierte Abbruch- und Entsorgungsunternehmen beauftragen und den Anlagenhersteller frühzeitig einbeziehen. Hersteller verfügen häufig über rückbaurelevante technische Daten und können anlagenspezifische Rückbaukonzepte empfehlen.[84] Für die Ausschreibung und Vergabe ist ein Leistungsverzeichnis zu erstellen, das allen am Rückbau beteiligten Akteuren übermittelt wird. Dies sollte insbesondere folgende Informationen enthalten:

- Externe technische Dokumentation (Demontageanleitungen, Konstruktions- und Fundamentzeichnungen, Statik, Typenprüfung, Schadstoffgutachten),
- Bodengutachten,
- Baugenehmigung,
- Historie der Anlage,
- Pläne zur Infrastruktur sowie Ablage- und Arbeitsflächen für die Komponenten.[85]

Die Beauftragung von Rückbauleistungen – etwa Kran- und Demontageteams sowie Logistik- und Verwertungsfirmen – erfordert ausreichenden zeitlichen Vorlauf. Die Projektplanung für den Rückbau sollte idealerweise bis zu sechs Monate im Voraus beginnen, inklusive Genehmigungsverfahren, Standortanalyse sowie Buchung von Kran- und Logistikleistungen.[86]

Auch nach Abbau und Zerlegung vor Ort weisen viele Komponenten noch beträchtliche Abmessungen und Gewichte auf, sodass für den Transport häufig Sondergenehmigungen erforderlich sind. Aspekte wie Brückenhöhen, Tunnelquerschnitte oder enge Kurvenradien auf Landstraßen stellen erhebliche logistische Herausforderungen dar und erfordern eine präzise Routenplanung und technische Begutachtung. Sobald alle Genehmigungen vorliegen, kann ein strukturierter Ablaufplan erstellt werden. Dieser umfasst nicht nur die Demontagearbeiten, sondern auch Transportlogistik, Zwischenlagerung und die fachgerechte Entsorgung der Komponenten. Eine flexible Planung ist dabei unerlässlich, um auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren und den Rückbau sicher, effizient und regelkonform durchzuführen zu können.[87]

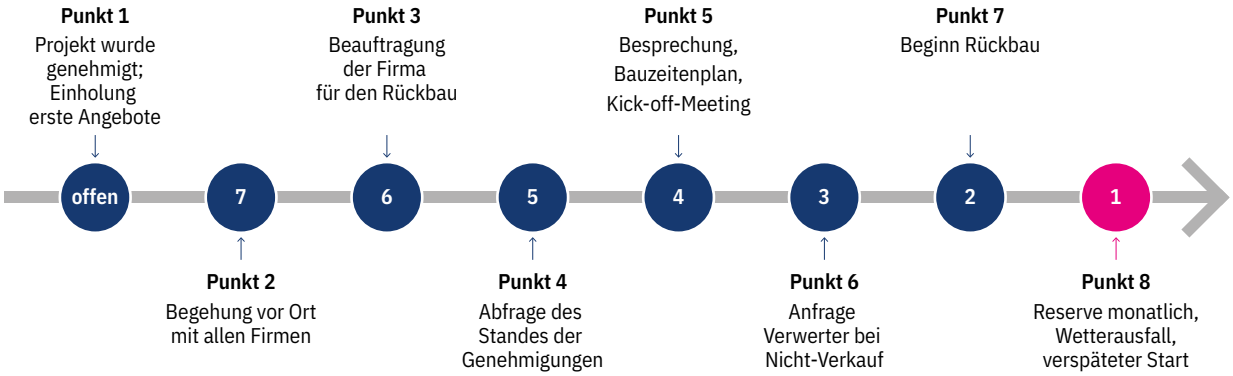

Abbildung 5: Zeitablaufplan für den Rückbau eines Windparks
Quelle: Vortrag Jens Monses, Neowa GmbH, bei BWE-Webseminar

82 DIN SPEC 4866 (2020), S. 21.
83 Link: Startseite | MaStR.
84 UBA (o. D. a).
85 UBA (2019), S. 100.
86 Erneuerbare Energien (2024), S. 76.
87 Deutsche Windindustrie (o. D.).

5.2 Schritte der Demontage

5.2.1 Stilllegung und Trockenlegung

Über das Leitsystem wird die Turbine außer Betrieb genommen, und die Anlage wird durch qualifiziertes Fachpersonal vom Stromnetz getrennt – gegebenenfalls in Absprache mit dem Netzbetreiber. Zudem sollte die Anlage gegen unbefugten Zugriff gesichert werden, indem Türme, Umrichterstationen und ähnliche Einrichtungen verschlossen werden. Um Umweltgefahren zu vermeiden, werden bei der anschließenden Trockenlegung alle Betriebsflüssigkeiten entfernt. Dazu gehören Getriebeöle, Hydraulikflüssigkeiten, Kühlmittel und Schmierstoffe, beispielsweise in Lagern oder Pitchsystemen. Besonders wichtig ist dies bei offenen Systemen wie Schwingungsdämpfern und Auffangwannen. Flüssigkeiten aus geschlossenen Systemen wie Getriebe- und Hydraulikeinheiten können in Abgleich mit den behördlichen Vorgaben auch nach der Demontage abgelassen werden. Die fachgerechte Vorgehensweise und die Entsorgung sind sorgfältig zu dokumentieren.[88] Eine besondere Vorsicht ist bei dem Isoliergas SF_6 in Schaltanlagen geboten. Aufgrund seiner hohen Schädlichkeit für die Umwelt[89] darf dieses Gas ausschließlich durch zertifiziertes Personal gemäß den EU-Vorgaben fachgerecht entnommen werden.

Exkurs: SF_6 in Schaltanlagen

SF_6 (Schwefelhexafluorid) ist ein synthetisches, farb- und geruchloses Gas, das weder giftig noch brennbar ist. Es besitzt hervorragende isolierende und lichtbogenlöschende Eigenschaften. Seit den 1960er-Jahren wird es in der elektrischen Energieverteilung eingesetzt, so zum Beispiel in Hoch- und Mittelspannungsschaltanlagen und Transformatoren sowie als Kühlgas in der Kältetechnik. Es wurde auch in vielen Alltagsanwendungen wie Autoreifen und Isolierglas-Fenster verwendet, ist dort aber inzwischen verboten. In Windenergieanlagen wird es verwendet, weil es eine sehr hohe dielektrische Festigkeit hat (ca. 2,5 × höher als Luft), sehr stabil und nicht brennbar, äußerst wartungsarm und langlebig ist und kompakte Bauformen ermöglicht, die bis zu 90 Prozent kleiner sind als luftisolierte Schaltanlagen.[90]

Das Problem: SF_6 hat eine extreme Treibhausgaswirkung. Es wirkt rund 23.500-mal stärker als Kohlenstoffdioxid (CO_2) und hat eine Lebensdauer in der Atmosphäre von mehr als 3.200 Jahren. Dabei wirken sich schon kleine Leckagen stark auf den Treibhauseffekt aus. Laut der EU-F-Gas-Verordnung (517/2014 und Revision 2024)[91] ist die Verwendung von SF_6 stark reguliert. Ein vollständiges Verbot für neue Mittelspannungsschaltanlagen ist ab ca. 2030 vorgesehen.

Da SF_6 in geschlossenen Systemen eingesetzt wird, wird das Gas im Normalbetrieb kaum freigesetzt. Die deutsche Elektro- und Windenergiebranche hat sich im Rahmen einer freiwilligen Selbstverpflichtung von ZVEI, BDEW und BWE dazu verpflichtet, die Leckagerate von SF_6-Schaltanlagen unter 0,1 Prozent pro Jahr zu halten, den Gasbestand zu dokumentieren und am Lebensende rückzugewinnen und wiederaufzubereiten. Diese Maßnahme ergänzt die EU-F-Gas-Verordnung und hat dazu beigetragen, die SF_6-Emissionen in Deutschland seit den 1990er-Jahren um rund 90 Prozent zu senken.

Alternativen: Technisch marktreife, SF_6-freie Lösungen sind verfügbar[92] und werden in neuen Windparks bereits eingesetzt. SF_6-Alternativtechnologien sind zum Beispiel Stickstoff-Sauerstoff-Gemisch als Isolationsgas in gasisolierten Schaltanlage sowie Vakuumunterbrecher in Kombination mit Luft im Mittelspannungsbereich.[93]

88 DIN SPEC 4866 (2020), S. 13.

89 Siehe dazu Exkurs auf Seite 26.

90 Weitere Informationen: BWE (2023a).

91 UBA (o. D. b).

92 Siehe BWE (2023a), Anhang – Übersicht SF_6-freier Mittelspannungsschaltanlagen.

93 European Commission (2020).

5.2.2 Rotorblatt- und Gondeldemontage

Zunächst werden die Rotorblätter mithilfe eines Krans entweder einzeln (Einzelblattmontage) oder in Sterndemontage abgeseilt. Sie werden am Boden zerlegt, um Schwertransporte zu vermeiden – es sei denn, die Blätter werden als Ersatzteile weiterverwendet. Die Segmentierung erfolgt in der Regel mit eingehausten Sägen, wobei Sägemehl, Staub und kontaminiertes Kühlwasser aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden. Witterungsverhältnisse sind zu berücksichtigen, um das Verwehen von Material zu verhindern. Sofern neben GFK- auch CFK-Verbundstoffe verbaut wurden – was bei neueren Windenergieanlagen ab etwa 2010 der Fall sein kann –, werden diese separat erfasst. Wertstoffe wie Kupfer und Aluminium werden aus dem Materialverbund zurückgewonnen. Nabe und Gondel mit Antriebsstrang werden per Kran demontiert. Je nach Größe werden sie entweder vor Ort oder nach dem Abtransport in einem Entsorgungsfachbetrieb zerlegt.

5.2.3 Turmdemontage

Stahl- und Gittertürme werden in der Regel sequenziell zurückgebaut. Dabei werden die einzelnen Segmente mechanisch demontiert und mit einem Kran zu Boden gebracht. Die Segmente werden nach der deutschen oder europäischen Stahlschrottsortenliste[94] eingestuft und dem Recycling zugeführt. Auch Beton- und Betonhybridtürme werden üblicherweise abschnittsweise zurückgebaut. Bei Ortbetontürmen aus Spannbeton sind hingegen spezielle Geräte wie Abbruchseilbagger, Seilsägen oder hydraulische Abbruchscheren erforderlich. Grundsätzlich werden mechanische Verfahren zur schrittweisen Demontage bevorzugt, da sie geringere Lärm- und Staubbelastungen verursachen und die sortenreine Trennung der Materialien erleichtern. In Ausnahmefällen kann der Rückbau mittels Fallsprengung erfolgen, bei der ein gezielter Keilschnitt im Fundament den Turm kontrolliert zum Einsturz bringt.[95] Abriss- oder Vollsprengungen kommen nur selten zur Anwendung, etwa bei akuter Einsturzgefahr oder in schwer zugänglichem Gelände. In solchen Fällen sind die umliegenden Flächen vor Bruchstücken und Staubemissionen durch Matten, Platten oder Geotextilien, die auf dem Boden ausgebreitet werden, zu schützen. Eine Sprengung ist derzeit nur auf Grundlage detaillierter Berechnungen und Nachweise zulässig, welche die potenziellen Auswirkungen auf benachbarte Anlagen und Einrichtungen berücksichtigen.[96]

5.2.4 Entfernen der Fundamente

Flachfundamente werden grundsätzlich vollständig entfernt – bevorzugt mittels Abgrabung und mechanischer Werkzeuge wie hydraulische Abbruchzangen und Hydraulikmeißel oder bei größeren Fundamentdicken (> 2 m) mit Lockerungssprengungen. Vor einer Sprengung wird das Fundament mit Matten abgedeckt, sodass absplitternde Gesteinsbrocken nicht umherfliegen können.[97]

In älteren Genehmigungen war häufig nur ein Teilrückbau bis etwa 1,5 m vorgeschrieben, da die Flächen so wieder landwirtschaftlich genutzt werden konnten. Auch in Nutzungsverträgen zwischen Grundstückseigentümern und Betreibern finden sich teilweise entsprechende Regelungen.[98] Für Windenergieanlagen, die ab dem 20. Juli 2004 genehmigt wurden, gilt, dass Fundamente vollständig zurückgebaut werden müssen (siehe dazu Kapitel 3.1.4). Dies ist nicht nur im Hinblick auf eine uneingeschränkte Nachnutzung der Flächen sinnvoll, sondern bedeutet in vielen Fällen auch nur einen geringen Mehraufwand gegenüber einem teilweisen Rückbau, insbesondere wenn die Fundamenttiefe ohnehin nicht sehr groß ist.

Auch Pfahlgründungen aus Betonrammpfählen oder Schüttpfählen müssten eigentlich komplett zurückgebaut werden. Unter dem Aspekt des Bodenschutzes ist dies jedoch nicht immer sinnvoll, weil eine komplette Entfernung die Bodenstruktur deutlich beeinträchtigen kann. In solchen Fällen kann in einer Einzelfallprüfung entschieden werden, ob die negativen Auswirkungen auf die Umwelt und insbesondere auf den Boden überwiegen. Zeigen sich mögliche negative Auswirkungen auf die Bodenstruktur, sollte die Rückbautiefe individuell geprüft und in Abstimmung mit der zuständigen (Bodenschutz-) Behörde festgelegt werden.[99]

Abschließend muss die Fundamentgrube wieder aufgefüllt werden. In der Regel wird hierzu das zuvor ausgehobene Bodenmaterial, das auf dem Fundament lag, verwendet, sofern dieses unbelastet ist. Das Material sollte eine zukünftige Nutzung oder Bewirtschaftung der Flächen ermöglicht. Darüber hinaus sind gegebenenfalls Anforderungen an die Bodenfunktion, etwa hinsichtlich der Sickerfähigkeit, zu berücksichtigen.[100]

94 BDSV (o. D. a) und BDSV (o. D. b).
95 BWE (2023b), S. 5.
96 UBA (2019), S. 107.
97 UBA (2019), S. 71 f.
98 Körner (2018).
99 LABO (2021), S. 22f.
100 UBA (2019), S. 73.

5.2.5 Rückbau der Wege und der Kranstellflächen

Der Rückbau der Kranstellflächen und Wege gilt im Allgemeinen als unkritisch. Mit Hilfe von Baggern wird der aufgebrachte Gesteinsschotter aufgenommen. Zusätzlich zum Schotter fallen häufig Geotextilien oder Geogitter an, die ursprünglich zur Trennung der einzelnen Schichten eingesetzt wurden.[101]

Abschließend müssen die Flächen mit geeignetem Material aufgefüllt werden. Wie bei den Fundamentgruben sollte Material ausgewählt werden, das eine zukünftige Nutzung oder Bewirtschaftung der Flächen ermöglicht.

101 UBA (2019), S. 73.

6 Wiederverwendungs- und Recycling-möglichkeiten

6.1 Zweitmarkt von Windenergieanlagen

Der Ausbau der Windenergie geht mit einem hohen Material- und Ressourcenbedarf einher. Im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ist es daher sinnvoll, einzelne Komponenten oder sogar komplette Anlagen weiterzuverwenden und ihnen ein zweites Leben zu geben. Gleichzeitig ist der Verkauf rückgebauter Windenergieanlagen auf dem Zweitmarkt meist die wirtschaftlich attraktivste Lösung.

Für ihre Dissertation führte Kathrin Kramer[102] Interviews mit Experten und Expertinnen durch, die zusammen rund 50 Prozent aller bisher in Deutschland bislang zurückgebauten Windenergieanlagen abdeckten. Es zeigt sich, dass rund die Hälfte der in der Stichprobe berücksichtigten Anlagen und ihrer Rotorblätter ins Ausland exportiert wurde, wo sie weiter genutzt werden. Die Abbildung 6 verdeutlicht, dass dies vor allem für die Wiederverwendung der ganzen Windenergieanlage gilt, während die Nachfrage nach Rotorblättern als Ersatzteile eher gering ausfällt.

Zudem berichteten die Befragten, dass andere Komponenten wie Generatoren und Getriebe rückgebauter WEA in größeren Mengen nachgefragt wurden. Dabei exportierten die meisten Unternehmen direkt, einige Akteure hingegen bereiteten die Anlagen oder Komponenten vor dem Verkauf wieder auf. Beispiele für Zweitmarkt-Plattformen oder Anbieter von Anlagen und Komponenten auf dem nationalen und internationalen Zweitmarkt sind zum Beispiel wind-turbine.com, neowa, Business in Wind, Spares in Motion und Vestas Pre Owned.

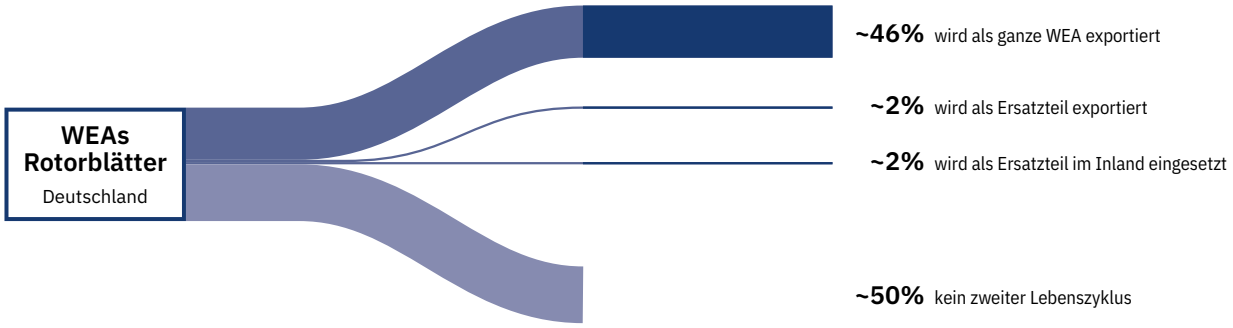

Abbildung 6: Kreislaufwirtschaftspfade bereits zurückgebauter WEA
Quelle: Kramer (2025), mit Genehmigung abgedruckt. CC BY 4.0 Lizenz.

Aktuell fehlt es an detaillierten Studien zu den zukünftigen Potenzialen einzelner Nachfragemärkte. Insgesamt umfasst die Liste der Länder, in die rückgebaute Windenergieanlagen aus Deutschland für einen Wiederaufbau exportiert wurden, mehr als 20 Länder, darunter auch außerhalb Europas wie Australien, Länder in Südamerika oder Marokko. In der Vergangenheit wurden die Anlagen aber vor allem in europäische Länder wie Italien, Irland, Schweden und Osteuropa (z. B. Polen, Moldawien, Ukraine, Kasachstan) exportiert, um die Transportkosten gering zu halten.

In den Interviews wurden verschiedene Marktfaktoren für Interessenten im Ausland genannt. Kramer führt an, dass die Entscheidung über die Stilllegung einer Onshore-Windenergieanlage und die Wahl des anschließenden Kreislaufwirtschaftspfads von unterschiedlichen Akteuren und verschiedenen technischen, rechtlichen/regulatorischen, wirtschaftlichen, organisatorischen und marktbezogenen Faktoren abhängen. So ist der Anlagentyp ein entscheidendes Kriterium für die Verkaufswahrscheinlichkeit auf dem Zweitmarkt. Nachgefragt werden vor allem robuste Anlagentypen, bei denen Ersatzteile verfügbar sind und der Zugang zu Servicetechnikern für die Wartung vor Ort gesichert ist.

Ferner ist von Bedeutung, ob die Anlage mit den aktuellen Netzanforderungen des Ziellandes kompatibel ist. Meist werden keine stall-regulierten Anlagen nachgefragt, sondern nur pitch-regulierte. Zudem sind Anlagen aus Deutschland auf 50 Hz ausgelegt und damit beispielsweise nicht mit dem US-Markt kompatibel. Interessanterweise bestätigen alle Befragten, dass die ursprünglich geplante Lebensdauer der Anlagen (i. d. R. 20 Jahre) kaum über einen Wiederverkauf entscheidet. Viele Anlagen verfügen auch nach 20 Jahren noch über ausreichend Substanz. Ein Blick auf den aktuellen Flottenbestand

102 Kramer (2025).

zeigt, dass ein großer Teil über die ursprünglich geplanten 20 Jahre hinaus weiterbetrieben wird.

Des Weiteren zeigt die Studie, dass die Nachfrage einzelner Länder stark vom regulatorischen Umfeld abhängt. Kleinere, auf dem Zweitmarkt verfügbare Anlagen sind beispielsweise gefragt, weil Genehmigungen strengen Auflagen unterliegen (z. B. strikte Höhenbeschränkungen in Italien und Frankreich), die Genehmigungsdauer für neue Projekte mit größeren WEA lange dauern (z. B. Schweden) oder kleine WEA subventioniert werden (z. B. Irland). Auch können die logistischen Bedingungen eines Landes bzw. einer Region zu einer stärkeren Nachfrage nach kleineren Anlagen führen, z. B. wenn die notwendige Kraninfrastruktur für große Anlagen fehlt oder ein Transport in bergigen Regionen erschwert ist. Ein Beispiel aus der Praxis zeigte ein Experte auf: Viele E40-Turbinen wurden in das Vereinigte Königreich exportiert, insbesondere an die windreichen Küstenabschnitte.

Die Auflistung verdeutlicht, dass die Beweggründe für den Erwerb einer WEA auf dem Zweitmarkt vielfältig sind und die Wirtschaftlichkeit von zahlreichen Faktoren abhängt. Entscheidend ist, dass der Zeitpunkt des Rückbaus einer Anlage mit der bestehenden Nachfrage zusammenfällt, da eine Zwischenlagerung des Rückbau-Bestands i. d. R. nicht wirtschaftlich ist.

Wie sich der Zweitmarkt zukünftig entwickeln wird, hängt maßgeblich vom regulatorischen Umfeld, vom Unternehmertum sowie von der weiteren Entwicklung spezialisierter Dienstleister ab – etwa bei der smarten Ersatzteilebeschaffung, der Wiederaufbereitung, Logistikkonzepten oder dem Wiederaufbau der Anlagen. Ebenso spielt die Professionalisierung von Zweitmarktplattformen eine wichtige Rolle.

6.2 Recycling von Stahl und sonstigen Metallen

Der beim Rückbau anfallenden Stahl stellt einen hochwertigen Rohstoff dar, dessen Verkauf auf dem Sekundärrohstoffmarkt einen erheblichen Teil der Rückbaukosten ausgleichen kann. Die Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V. (BDSV)[103] veröffentlicht monatlich aktualisierte Erlöswerte pro Tonne (€/t). Anfang 2024 lag der durchschnittliche Marktpreis in Deutschland – je nach Stahlsorte – zwischen 280 € und 365 €/t. Davon abzuziehen sind die Verwertungskosten, die zu diesem Zeitpunkt bei etwa 130 €/t lagen.[104]

Eine präzise Trennung der Metalle in Eisen- und Nichteisenmetalle wie Aluminium und Edelstahl ist entscheidend. Etwa 95 Prozent der sortierten und aufbereiteten Metalle können wieder in die Produktion neuer Rohmaterialien oder Halbzeuge überführt werden. Halbzeuge sind vorgefertigte metallische Zwischenprodukte, die in der Industrie weiterverarbeitet werden. Die verbleibenden fünf Prozent gehen durch unvermeidbare Verluste – etwa durch Schuttabzug oder Schlackenbildung bei thermischen Prozessen – verloren.

Für die Weiterverwertung von Edelstahl- und Aluminiumbauteilen ist es besonders wichtig, die genauen Legierungstypen und -bestandteile zu kennen, da diese maßgeblich die Qualität und Einsatzmöglichkeiten im Recyclingprozess bestimmen. Bei diesen Materialien existiert ein funktionierender geschlossener Stoffkreislauf. Die Kreislaufquote entspricht dabei nahezu vollständig der Recyclingquote, da die Materialien ohne nennenswerte Verluste wiederverwendet werden können.

Hohe Kreislaufquoten von bis zu 95 Prozent bedeuten jedoch nicht automatisch, dass derselbe Anteil tatsächlich in der Neuproduktion eingesetzt wird. Die sogenannte Substitutionsquote – der Anteil von Sekundärrohstoffen, der bei der Herstellung neuer Rohmaterialien oder Halbzeuge verwendet wird – variiert je nach Metall erheblich. Besonders hoch ist dieser Anteil bei Gusseisen mit etwa 92 Prozent (Stand: 2021, Deutschland) und Edelstahl mit rund 90 Prozent (2019, EU-Durchschnitt). Deutlich niedriger sind die Substitutionsquoten bei Rohstahl und Eisen mit etwa 43 Prozent (2021, Deutschland), Aluminium mit 60 Prozent (2018, Deutschland) und Kupfer mit 44 Prozent (2020, Deutschland).[105]

6.3 Recycling und Weiterverwendung von Beton, Stahlbeton, Schotter

Der im Turm und Fundament von Windenergieanlagen enthaltene Stahlbeton wird beim Rückbau meist direkt vor Ort zerkleinert. Das dabei anfallende Bruchmaterial wird anschließend in einer Bauschuttaufbereitungsanlage weiterverarbeitet. Dort wird der Bewehrungsstahl entfernt und dem Stahlrecycling zugeführt. Die verbleibenden mineralischen Anteile – also der zerkleinerte Beton – werden zu Gesteinskörnungen unterschiedlicher Korngrößen aufbereitet.

103 Siehe BDSV (o. D. c).

104 Monses, J. (2024), Vortrag.

105 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand. et al. (2024), S. 546 f.

Diese recycelten Körnungen kommen in Deutschland vor allem als Ersatzbaustoffe zum Einsatz, insbesondere im Straßen-, Wege- und Flächenbau, wo sie für untere Tragschichten verwendet werden. Grundsätzlich wäre auch eine Nutzung im Recyclingbeton gemäß DIN 4226-100 möglich.[106]

Angesichts der steigenden Anforderungen an CO_2-Reduktion und Ressourceneffizienz gewinnt Recyclingbeton zunehmend an Bedeutung. Ein verstärkter Einsatz solcher Recyclingmaterialien in der Zementproduktion und im Neubau würde auch für den Beton aus dem Rückbau von Windenergieanlagen die Wiederverwertungsquote deutlich erhöhen – ähnlich wie es bereits heute im Metallrecycling üblich ist.

Der aufgenommene Gesteinsschotter kann – ggf. nach Siebung – prinzipiell in neuen Projekten erneut als Schotter genutzt werden. Hierbei ist jedoch die Qualität des Schotters zu berücksichtigen. In Einzelfällen kann es vorkommen, dass der verwendete Schotter derzeit nicht mehr für neue Projekte zugelassen ist, etwa weil sich die rechtlichen Rahmenbedingungen zwischenzeitlich geändert haben. Besonders ältere Windparks können Materialien wie Schlackenschotter enthalten, die je nach Bundesland oder projektspezifischen Vorgaben nicht erneut eingebaut werden dürfen, zum Beispiel, wenn die aktuellen Schadstoffgrenzwerte der seit dem 1. August 2023 geltenden Ersatzbaustoffverordnung (EBV)[107] nicht eingehalten werden.[108]

6.4 Recycling und Verwertung von Rotorblättern (GFK/CFK-Problematik)

6.4.1 Verwertung und Recycling von Glasfaserkomponenten (GFK)

Stofflich-energetische Verwertung

Eine gängige Methode zur Entsorgung von Duroplasten wie glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), der auch im Sportbereich, im Schiffs- sowie im Flugzeugbau verwendet wird, besteht darin, das Material in Müllheizkraftwerken zu verbrennen. Bei Monochargen oder größeren Beimischungen kann es in diesen jedoch zu Betriebsstörungen kommen, etwa durch Verstopfungen.

Eine alternative Verwertungsmöglichkeit ist die sogenannte „Zementroute“, bei der eine stofflich-energetische Verwertung von GFK-Materialien erfolgt. Dieses Verfahren kombiniert die energetische Nutzung der Polymermatrix mit der stofflichen Nutzung der Glasfasern und ermöglicht so eine nahezu vollständige Verwertung von Rotorblättern aus GFK. Entwickelt wurde die Methode von der Firma neocomp, die jedoch aufgrund rückläufiger GFK-Mengen aus Windenergieanlagen ihren Betrieb 2023 einstellte. Die neowa GmbH übernahm die Aktivitäten im Bereich des Rotorblattrecyclings.[109]

Vor der eigentlichen Verarbeitung erfolgt eine Vorbehandlung, bei der Carbonfasern ausgeschlossen und Eisen- sowie Nichteisenmetalle entfernt werden. Anschließend werden die GFK-Bestandteile mechanisch auf eine definierte Zielgröße zerkleinert. Um die Brennstoffhomogenität zu verbessern, wird das Material mit sogenannten Spuckstoffen aus der Papier- und Zellstoffindustrie vermischt. Dabei handelt es sich um nicht mehr verwertbare Reststoffe, die bei der Herstellung oder Aufbereitung von Papier anfallen. Diese Zugabe trägt zu einer gleichmäßigen Temperaturführung im Zementofen und zu einer stabilen Verbrennung bei, wodurch gleichzeitig die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und Ruß reduziert werden.

Im Zementofen wird das Harz der GFK-Bauteile thermisch zersetzt. Dabei entstehen hohe Temperaturen, die als Energiequelle genutzt werden und fossile Brennstoffe teilweise ersetzen können. Die anorganischen Glasfasern schmelzen unter diesen Bedingungen und werden chemisch in den Zementklinker eingebunden. Auf diese Weise ersetzen sie mineralische Rohstoffe wie Sand, Ton oder Bauxit. Die Glasfasern gehen somit nicht verloren, sondern verstärken den mineralischen Anteil des Klinkers.[110]

Stoffliche Verwertung und Weiterverwendung

Die aus dem Zerkleinern (Schreddern, Mahlen) resultierenden GFK-Granulate oder -Mahlgüter können als Füll- oder Verstärkungsstoffe in neuen Produkten eingesetzt werden. Typische Anwendungsbereiche sind Kunststoffprodukte (z. B. Spritzguss oder Baukunststoffe), Beton, Asphalt, Bauelemente, Paletten oder Schallschutzwände. Feingemahlene GFK-Fraktionen eignen sich zudem als Mineral-Plastic-Compound (MPC) zur Herstellung von neuen, hochwertigen Produkten wie Sportgeräte, Möbel oder Fahrzeugteile.

106 DIN 4226-100 (2002).
107 Ersatzbaustoffverordnung v. 9.7.2021 (BGBl. I S. 2598).
108 UBA (2019), S. 73.
109 Siehe dazu neowa.
110 Windkanal (2023), Interview mit Frank Kroll, neowa GmbH.

In Europa gibt es bereits mehrere Anbieter, die solche Verfahren anwenden. So stellt die Firma NOVO-TECH in Aschersleben aus GFK-Material langlebige MPC-Dielen und -Platten her. Dabei orientiert sich das Unternehmen an den Vorgaben des Umweltstandards „Cradle to Cradle Certified®“. Die Produkte können nach ihrem Lebensende zurückgenommen und erneut zu gleichen oder ähnlichen Produkten verarbeitet werden.[111]

Auch das dänische Unternehmen Continuum beschäftigt sich mit der emissionsfreien Wiederverwertung von GFK aus Windenergie-Rotorblättern. In Esbjerg, Dänemark, wird derzeit eine Aufbereitungs- und Produktionsanlage errichtet, eine weitere Anlage in Großbritannien ist in Planung. Darüber hinaus plant Continuum, bis 2030 zusätzliche Werke in Frankreich, Deutschland, Spanien und der Türkei aufzubauen, um die Recyclingkapazitäten europaweit zu erweitern.[112]

Darüber hinaus gibt es Ansätze, Rotorblätter direkt als konstruktive Bauelemente zu nutzen, etwa für Designermöbel, als Schalldämmwände, als tragende Elemente in Freilichtbühnen oder sogar als Tiny-House.[113]

Recyclingverfahren zur Rückgewinnung der Glasfasern

Die Rückgewinnung von Glasfasern durch Trennung von der Harzmatrix ist grundsätzlich möglich, wird jedoch aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit bislang kaum angewendet. Die Verfahren sind in der Regel kostenintensiv, aufwendig und bisher noch nicht großtechnisch etabliert. Es lassen sich verschiedene Verfahren unterscheiden:[114]

Zu den chemischen Verfahren gehört unter anderem die Solvolyse. Dabei werden duroplastische Harzsysteme gezielt mit Lösungsmitteln wie Alkoholen, organischen Säuren oder auch Wasser unter superkritischen Bedingungen aufgespalten. Die Polymermatrix wird dabei chemisch zersetzt, während die Glasfasern weitgehend unbeschädigt zurückgewonnen werden können. Zudem lassen sich Teile der Polymerbestandteile in Form organischer Verbindungen zurückgewinnen, was den Prozess ressourcenschonender macht.

Eng verwandt sind die Hydrolyse und Alkoholyse, bei denen die Polymermatrix gezielt durch Reaktionen mit Wasser oder Alkohol aufgespalten wird. Diese Prozesse erfordern erhöhte Temperaturen und Drücke, arbeiten aber im Vergleich zur Solvolyse meist mit weniger aggressiven Chemikalien. Auch hier können Glasfasern weitgehend intakt zurückgewonnen und teilweise die Matrixbestandteile nutzbar gemacht werden.

Ein weiterer Ansatz ist das chemische Lösen der Matrix bei moderaten Temperaturen. Dabei werden spezifische Lösungsmittel eingesetzt, um das Harz zu erweichen oder herauszulösen, ohne dass hohe thermische Belastungen entstehen. Dieses Verfahren eignet sich besonders, um die Glasfasern möglichst unversehrt zurückzugewinnen. Allerdings können Rückstände der Harzmatrix auf den Fasern verbleiben, was ihre Wiederverwendung in hochwertigen Anwendungen einschränken kann.

Neben diesen chemischen Verfahren wird auch die Pyrolyse als Recyclingweg diskutiert. Dabei handelt es sich um eine thermische Zersetzung des GFK unter Sauerstoffausschluss, bei der die organische Matrix in Gase und Öle zerlegt wird, die als Energieträger oder chemische Rohstoffe genutzt werden können. Die Glasfasern bleiben zurück, werden jedoch durch die hohen Temperaturen häufig in ihrer mechanischen Festigkeit beeinträchtigt. Während die Pyrolyse im Bereich von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) bereits großtechnisch erprobt ist, stellt sie bei GFK noch eine Herausforderung dar: Die zurückgewonnenen Glasfasern erreichen nicht die ursprüngliche Qualität. Aktuell wird intensiv nach einer ressourceneffizienten Lösung geforscht.[115] Umsetzungen für GFK scheitern auch an den sehr günstigen Herstellungskosten für primäre Glasfasern. Bei GFK ist der ökonomische Nutzen der Rückgewinnung somit begrenzt.

6.4.2 Verwertung und Recycling von Carbonfaserkomponenten (CFK)

Die in neueren Windenergie-Rotorblättern enthaltenen CFK-Bestandteile stellen ab den 2030er-Jahren eine zunehmende Herausforderung hinsichtlich der Verwertung und des Recyclings dar: Die Verbrennung größerer Mengen CFK in Müllheizkraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen birgt erhebliche Risiken. Carbonfasern verbrennen bei den üblichen Temperaturen von über 1.000 Grad Celsius nicht vollständig und können zu Verstopfungen im Entschlacker führen. Zudem kann es aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der Fasern zu Kurzschlüssen und damit zum Ausfall von Elektrofiltern bei der Staubabscheidung kommen.

Derzeit werden CFK-Abfälle noch nicht konsequent aus gängigen Abfallströmen wie Gewerbe- und Bauabfällen oder Sperrmüll separiert, da es weder einen eigenen Abfallschlüssel noch eine spezifische Kennzeichnung für CFK gibt. Häufig werden sie als normale Kunststoffabfälle oder zusammen mit Sortierresten entsorgt.[116]

111 NOVO-TECH TRADING Beteiligungs GmbH, Megawood (o. D.).

112 State of Green (o. D.).

113 rethink*rotor (o. D.); Windindustrie in Deutschland (o. D.).

114 Wings for Living (o. D.); Qureshi (2022); Keith, Al-Duri, McDonald et al. (2025); Karuppannan Gopalraj, Kärki (2020); De Fazio, Boccarusso, Formisano et al. (2023); Immowelt (2025).

115 WKI (o. D.).

116 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand. et al. (2024), S. 551.

Eine Ausweitung der Kapazitäten zur Behandlung von Carbonfaserabfällen ist dringend erforderlich, um eine ausreichende Entsorgung in Deutschland und der EU sicherzustellen. Grundsätzlich lohnt sich das Recycling von CFK, da Carbonfasern etwa 20-mal so wertvoll wie Glasfasern sind.[117] Hier wurden bereits verschiedene Verfahren entwickelt, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Mechanisches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden CFK-Komponenten zunächst in Stücke von 0,5 bis 1 m geschnitten und dann in einer Mühle oder einem Schredder weiter zerkleinert. Das entstehende Granulat wird gesiebt und nach Faserlänge sortiert und klassifiziert. Die gewonnenen Fasern werden meist als Verstärkung in thermoplastischen oder thermohärtenden Kunststoffen eingesetzt. Vorteile dieses Verfahrens liegen im geringen Energieverbrauch und der minimalen Umweltbelastung. Nachteilig ist der Verlust mechanischer Eigenschaften dadurch, dass Fasern geschädigt werden und eine eingeschränkte Grenzflächenhaftung in recycelten Verbundwerkstoffen besteht.[118]

Pyrolyse

Die Pyrolyse gilt derzeit als eines der vielversprechendsten Verfahren zur stofflichen Verwertung von CFK aus stillgelegten Rotorblättern. Dabei werden die duroplastischen Matrixmaterialien in sauerstofffreier Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 400 und 700 Grad Celsius thermisch zersetzt, wodurch die eingebetteten Carbonfasern freigelegt werden. Die zurückgewonnenen Fasern zeichnen sich durch eine im Vergleich zu mechanischem Recycling deutlich höhere Qualität und eine größere Länge aus, was ihre Wiederverwendung in neuen Faserverbundwerkstoffen ermöglicht. Nachteile sind der hohe Energiebedarf und mögliche Schädigungen der Faseroberfläche, die die Haftung in neuen Matrizes beeinträchtigen können.

Forschungsinstitute wie das Fraunhofer IFAM entwickeln daher optimierte Pyrolyseverfahren, etwa unter Einsatz von Mikrowellentechnik oder durch verbesserte Prozessführung, um Faserqualität und Energieeffizienz zu verbessern.[119] Für CFK-haltige Rotorblätter eröffnet die Pyrolyse damit realistische Chancen, hochwertige Sekundärfasern in größerem Maßstab nutzbar zu machen.

Seit einigen Jahren sind zwei Anbieter mit einem Pyrolyse-Verfahren für CFK-Abfälle am Markt: Die Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH, Deutschland, sowie Gen 2 Carbon Limited, heute Procotex, Frankreich. Ihre Kapazitäten sind bislang noch begrenzt, und die Anwendung der zurückgewonnenen Carbonfasern erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Composite-Herstellern. Ein weiterer Betreiber einer Pyrolyseanlage in Deutschland ist die Pyrum Innovation AG, die derzeit im großtechnischen Maße Autoreifen pyrolisiert und daraus Sekundärprodukte für die BASF produziert. Im Rahmen des Forschungsvorhaben „Infinity“ wird bei Pyrum aktuell der Aufbau einer Pyrolyseanlage für CFK-Materialien untersucht.[120]

Chemische Verfahren (Solvolyse und Varianten)

Neben den thermischen Verfahren rückt die chemische Auflösung der duroplastischen Matrix, etwa durch Solvolyse, zunehmend in den Fokus. Dabei wird das Harz in geeigneten Lösungsmitteln, teils unter Zusatz von Katalysatoren, selektiv aufgespalten, während die Carbonfasern nahezu unbeschädigt zurückgewonnen werden. Solche Verfahren ermöglichen es, Fasern mit Eigenschaften zurückzugewinnen, die denen von Neumaterial sehr nahekommen – ein entscheidender Vorteil insbesondere für Hochleistungsanwendungen.

Solvolyseprozesse arbeiten in der Regel bei moderaten Temperaturen und können durch geschlossene Lösungsmittelkreisläufe ökologisch optimiert werden. Forschungsarbeiten aus den USA[121] und Europa zeigen, dass die recycelten Carbonfasern aus Rotorblättern ohne nennenswerte Qualitätseinbußen in neuen Polymerverbundwerkstoffen oder sogar in Hochleistungsanwendungen eingesetzt werden können.

Derzeit befindet sich die chemische Aufbereitung von CFK-Rotorblättern jedoch noch überwiegend im Labor- und Pilotmaßstab. Für eine großtechnische, industrielle Umsetzung müssen die Verfahren hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Skalierbarkeit und ökologischer Bilanz weiterentwickelt werden. Dennoch gelten sie als besonders zukunftsweisend, da sie eine nahezu vollständige Rückgewinnung hochwertiger Carbonfasern aus ausgedienten Rotorblättern ermöglichen könnten.

Stoffliche Verwertung von Carbonfasern aus CFK

Die zurückgewonnenen Langfasern haben einen positiven Marktwert und können teilweise zu neuen Garnen und Geweben weiterverarbeitet werden.[122] Carbonfasern finden heute in zahlreichen Bereichen Verwendung, darunter Sportmaterialien, Medizinprodukte sowie im Flugzeug- und Fahrzeugbau. Auch im Bausektor, etwa für Agrophotovoltaik-Anlagen, können bestimmte Bestandteile sinnvoll genutzt werden.[123]

117 Windkanal (2023), Interview mit Frank Kroll, neowa GmbH.
118 Aldosari, AlOtaibi, Alblalaihid et al. (2024).
119 Fraunhofer IFAM (2023), Pressemitteilung.
120 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand et al. (2024), S. 550 f.
121 Santos (2024).
122 UBA (o. D. c).
123 Windmesse-Newsletter Nr. 6 (2022).

6.4.3 Mengenprognosen

Das Recycling von Rotorblättern aus GFK und CFK gehört derzeit zu den zentralen Nachhaltigkeitsthemen der Windenergie. Für die überwiegend aus Faserverbundkunststoffen (FVK) bestehenden Materialien gab es bis in die 2020er-Jahre keine großtechnische Recyclinglösungen.

Die folgenden Grafiken zeigen die prognostizierten Mengen an Rotorblättern des GFK- und GFK/CFK-Typs bis 2043. Während beim Rückbau aktuell ausschließlich Rotorblätter aus GFK anfallen, werden ab den 2030er-Jahren auch Rotorblätter mit CFK-Anteilen dem Recycling zugeführt. Ab 2033 ist insgesamt mit einem starken jährlichen Anstieg der FVK-Mengen zu rechnen, und insbesondere der Anteil der zu entsorgenden CFK wird deutlich zunehmen. Dafür müssen rechtzeitig ausreichende Entsorgungskapazitäten geschaffen werden.[124]

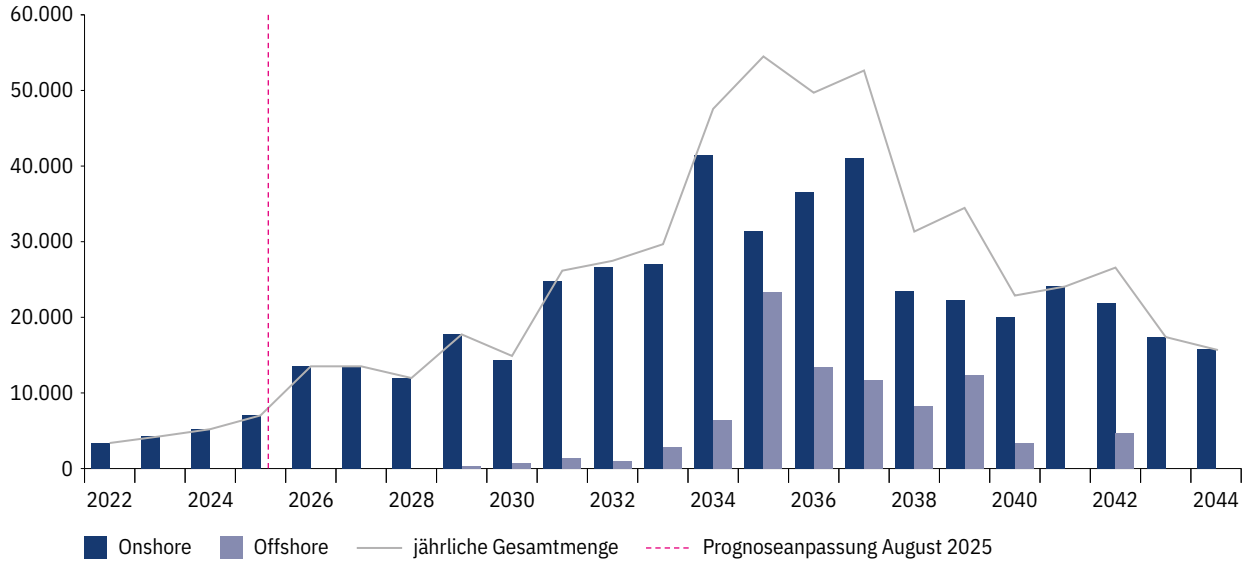

Abbildung 7: Prognose Rotorblattmengen (t) GFK-Typ aus dem Rückbau von Windenergieanlagen (Stand installierte Anlagen 31.12.2024)
Quelle: Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES, Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH, Bremerhaven 2025[125]

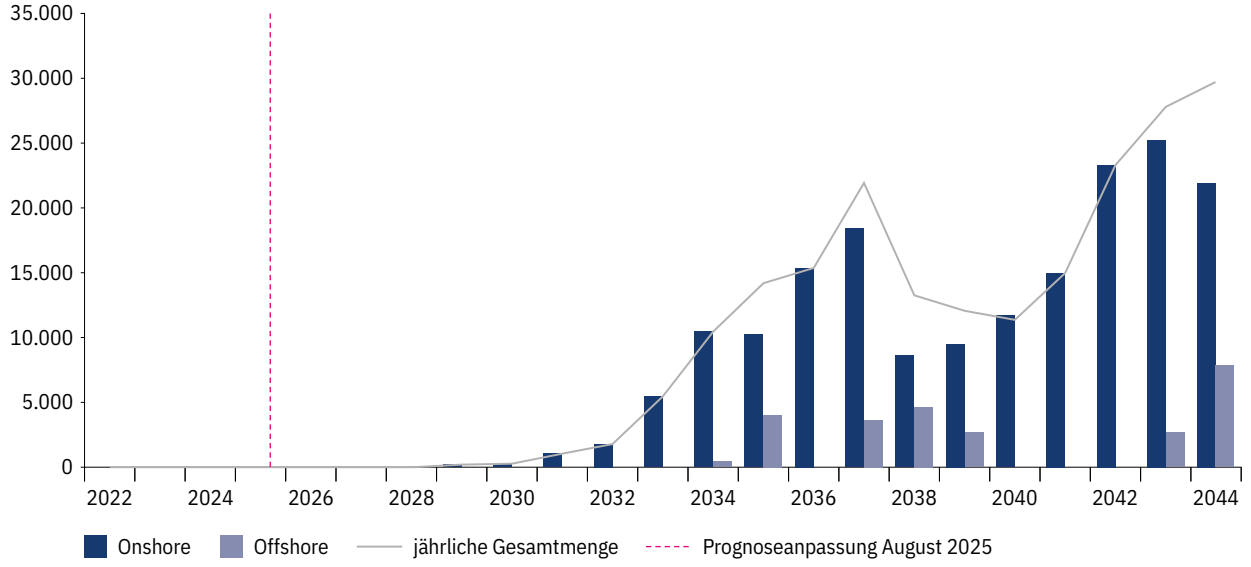

Abbildung 8: Prognose Rotorblattmengen (t) GFK/CFK-Typ aus dem Rückbau von Windenergieanlagen (Stand installierte Anlagen 31.12.2024)
Quelle: Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES, Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH, Bremerhaven 2025[126]

124 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand. et al. (2024), S. 550.
125 Zu finden unter Daten & Fakten | RDRWind e.V.
126 Zu finden unter Daten & Fakten | RDRWind e.V.

6.5 Weitere Komponenten und Materialien

6.5.1 Batterien und Akkumulatoren

Die Behandlungs- und Entsorgungswege bei Batterien unterscheiden sich je nach Batterietyp. Grundsätzlich besitzen Altbatterien ein hohes Wertstoffpotenzial, enthalten jedoch häufig auch umwelt- und gesundheitsgefährdende Stoffe wie Blei, Cadmium oder Quecksilber. Daher ist eine möglichst vollständige Verwertung sowohl aus ökologischen als auch aus sicherheitstechnischen Gründen anzustreben. Altbatterien werden in der Regel als gemischte Fraktionen erfasst und müssen vor dem eigentlichen Recyclingprozess zunächst sortiert werden. Zu den aus Altbatterien zurückgewonnenen Sekundärrohstoffen zählen insbesondere Blei, Schwefelsäure, Stahl, Ferromangan, Nickel, Zink, Cadmium und Quecksilber.

Bei Akkumulatoren (Akkus) beginnt das Recycling üblicherweise mit einer mechanischen Vorbehandlung, bei der zunächst die enthaltene Säure entleert und fachgerecht behandelt wird. Anschließend werden die einzelnen Komponenten in mehreren Prozessschritten voneinander getrennt und separat verwertet, um die enthaltenen Metalle und anderen Wertstoffe möglichst vollständig zurückzugewinnen.[127]

6.5.2 Elektronische Komponenten

Elektronische Geräte und Bauteile aus Windenergieanlagen, die sich nicht für eine Wiederverwendung oder den Verkauf auf dem Second-Hand-Markt eignen, durchlaufen in der Regel die gleichen Erfassungs-, Entsorgungs- und Behandlungspfade wie herkömmliche Elektroaltgeräte anderer Herkunft. Im Vordergrund steht dabei die stoffliche Verwertung der enthaltenen Metalle und Kunststoffe. Besonders wertvoll sind Edelmetalle wie Gold oder Platin, die in Leiterplatten, Umrichtern oder Steuerungseinheiten enthalten sind. Die Geräte werden dazu zunächst manuell demontiert oder mechanisch zerkleinert, um die verschiedenen Materialfraktionen zu trennen. Die separierten Metalle können anschließend als Sekundärrohstoffe wiederverwertet oder verkauft werden.

Die verbleibenden Kunststoffanteile eignen sich in der Regel für die thermische Verwertung, beispielsweise zur Energiegewinnung in modernen Müllheizkraftwerken. Elektronische Komponenten wie Leiterplatinen, Umrichter und Kondensatoren enthalten neben Edelmetallen auch seltene Erden, deren Rückgewinnung spezielle Aufbereitungsverfahren erfordert, um die wertvollen Rohstoffe möglichst verlustfrei zurückzugewinnen.[128]

6.5.3 Generatoren, Antriebsstrang, Kabel

Bei der Planung des Rückbaus von Windenergieanlagen wird zunehmend bereits im Vorfeld geprüft, ob Getriebe, Generatoren, Steuerrechner (CPU) und Azimutmotoren nach einer Aufbereitung verkauft und weiterverwendet werden können. Ein freier Markt für den Ankauf, die Aufbereitung und Lagerung solcher gebrauchten Komponenten hat sich bisher nur begrenzt etabliert. Üblicherweise kaufen vor allem Servicegesellschaften großer Hersteller und Betreiber einzelne, wiederaufbereitete Teile nach Bedarf, um sie neben neuen Ersatzteilen in ihren Lagern bereitzuhalten.

Kommt eine Wiederverwendung oder ein Verkauf nicht zustande, werden Antriebsstränge mit Generatoren sowie Kabelsysteme an spezialisierte Entsorgungsunternehmen übergeben. Dort erfolgt eine Demontage und Rückgewinnung der Materialien. Die so gewonnenen Rohstoffe – insbesondere Stahl, Gusseisen, Kupfer und Aluminium – werden anschließend über die bekannten Recyclingwege für Metalle und NE-Metalle weiterverarbeitet.[129]

6.5.4 Permanentmagnete

In den Generatoren verbaute Permanentmagnete (PM) fallen bislang kaum als Abfallstoffe an, da sie in Onshore-Anlagen bis 2010 nur selten verbaut wurden. Aktuell werden PM häufig nicht separat demontiert, sondern gemeinsam mit Stahl- oder Gusseisenkomponenten zerkleinert und deren Recyclingströmen zugeführt. Aufgrund der oft komplexen Bauweise der Generatoren (z. B. eingegossene oder verklebte Magnete) ist die gezielte Entnahme technisch anspruchsvoll.

Permanentmagnete enthalten zahlreiche kritische Rohstoffe wie Neodym, Dysprosium, Praseodym, Bor und Samarium. Diese zählen zu den sogenannten Seltenen Erden und sind

127 UBA (2019), S. 81.

128 BWE (2023b), S. 6.

129 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand et al. (2024), S. 547 f.

strategisch bedeutsam für die EU. Der EU Critical Raw Materials Act sieht vor, künftig Kennzeichnungs- und Transparenzpflichten für Hersteller einzuführen und Mindestanteile an Sekundärmaterial aus Altmagneten festzulegen, um geschlossene Stoffkreisläufe zu fördern.

Es gibt umfangreiche Forschung und erste industrielle Ansätze, bei denen insbesondere Permanentmagnete auf Basis von NdFeB = Neodym-Eisen-Bor – so recycelt werden sollen, dass daraus neue Magnete hergestellt werden können. Laut einer Studie[130] liegt die Recyclingquote in Deutschland für den recycelten Anteil an seltenen Erden (REE) noch bei unter einem Prozent. In Europa entstehen derzeit erste Aufbereitungsanlagen. Neben bestehenden Kapazitäten in Estland (NEO) wurden neue Anlagen in Frankreich und Deutschland aufgebaut, unter anderem durch Heraeus Remloy, das seit 2024 in Deutschland PM-Recycling im industriellen Maßstab betreibt. Diese Anlagen leisten einen wichtigen Beitrag zum Aufbau einer europäischen Kreislaufwirtschaft für kritische Magnetrohstoffe.

Die Produktion leistungsfähiger Permanentmagnete für Windturbinen erfolgt jedoch bislang nahezu vollständig in China, das rund 96 Prozent der weltweiten PM-Herstellung dominiert. Der Aufbau eigener Wertschöpfungsketten in Deutschland und der EU gilt daher als zentrale Voraussetzung für die Versorgungssicherheit und Rohstoffunabhängigkeit.[131]

130 Jäger, Chunyu Miao, Weyand (2025), S. 6.

131 Spuziak-Salzenberg, Germer, Brand et al. (2024), S. 548.

7 Aktuelle Entwicklungen in Forschung und Innovationen

7.1 Einleitung/Überblick

In den vergangenen Jahren hat sich die Forschung zum Recycling von Windenergieanlagen darauf konzentriert, nachhaltige und wirtschaftliche Strategien für die Kreislaufführung von GFK und CFK aus den Rotorblättern zu entwickeln. Diese komplexen Verbundwerkstoffe, die hohe Festigkeit bei geringem Gewicht ermöglichen, sind auf Langlebigkeit ausgelegt – nicht auf einfache Trennbarkeit.

Neue europäische und nationale Forschungsprojekte wie ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch) oder Blades2Build zielen darauf ab, geschlossene Materialkreisläufe zu etablieren. Dabei werden Harze und Faserverbunde so aufbereitet, dass sie als Sekundärrohstoffe erneut in der Rotorblattproduktion oder in anderen Industrien eingesetzt werden können. Parallel dazu werden mechanische Verfahren weiterentwickelt, bei denen zerkleinerte Rotorblätter als Zuschlagstoff für Bauprodukte, Lärmschutzwände oder Asphaltmischungen dienen.

Eine zweite Innovationslinie verfolgt den Ansatz des „Design for Recycling“. Projekte wie EOLIAN oder Initiativen der Fraunhofer- und DITF-Institute untersuchen neuartige, reversible Harzsysteme (etwa Vitrimere) und alternative Fasertypen, die sich am Lebensende leichter trennen und recyceln lassen. Dieser Paradigmenwechsel – von der nachträglichen Entsorgung hin zur vorausschauenden Kreislaufgestaltung – eröffnet langfristig die Möglichkeit, Windenergieanlagen vollständig in ein zirkuläres Wertschöpfungssystem zu integrieren. Auch im industriellen Maßstab entstehen erste Pilotanlagen, die auf chemische Verfahren wie Solvolyse oder Pyrolyse setzen, um hochwertige Kohlenstofffasern zurückzugewinnen. Unternehmen wie Carbon Rivers oder Konsortien um große Energieversorger erproben derzeit die Skalierbarkeit dieser Methoden. Trotz vielversprechender Ergebnisse bleiben Energieaufwand, Prozesskosten und die Qualität der Rezyklate entscheidende Faktoren für eine breite Umsetzung.

Insgesamt zeigen die jüngsten Entwicklungen, dass die Forschung beim Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen von der Problemorientierung in die Phase industrieller Lösungsfindung übergeht. Einige Forschungsprojekte werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

7.2 Aktuelle Forschungsprojekte

7.2.1 Laufende Projekte

ReusaBlade

Das Forschungsprojekt ReusaBlade liegt in Trägerschaft des Fraunhofer IWES (Institut für Windenergiesysteme) und wird mit Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWE) gefördert.[132] Laufzeit des Projekts ist von Dezember 2023 bis November 2026.

Geforscht wird an recyclingfähigen Rotorblattmaterialien und Prozessen, zum Beispiel an lösbaren Matrix-Systemen sowie an der Erprobung und Bewertung recycelter Fasern. Im Projekt ReusaBlade entwickeln und testen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedene Recyclingverfahren für moderne, faserverstärkte Bauteile. Ziel ist es, die zurückgewonnenen Materialien im industriellen Maßstab wiederzuverwenden. Das Fraunhofer IWES, das das Projekt koordiniert, untersucht in einem Teilprojekt, wie Strukturen aus einem neu entwickelten Epoxidharz mithilfe der entwickelten Recyclingverfahren aufbereitet werden können.

Das Projektteam entwickelt grundlegende Erkenntnisse zu den Recyclingprozessen moderner Rotorblätter und liefert damit einen wichtigen Baustein für eine Windenergieanlage, die vollständig und nachhaltig recycelbar ist. Gleichzeitig trägt das Projekt dazu bei, die Kosten für den Rückbau von Rotorblättern sowie den Ressourcenbedarf der Windenergie zu reduzieren.

EoLO-HUBs

Das europäische Forschungsprojekt EoLO-HUBs (End of Life through Open HUBs for circular materials in sustainable business models) hat eine Laufzeit von Januar 2023 bis Dezember 2026 und wird im Rahmen des Horizon Europe-Programms gefördert.[133]

132 Weitere Informationen: ReusaBlade.
133 Weitere Informationen: EoLO-HUBs.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Demonstration innovativer Recyclingtechnologien für Rotorblätter, um die Kreislaufwirtschaft in der Windenergiebranche zu fördern und die Umweltauswirkungen dieser langlebigen Verbundwerkstoffe zu minimieren. EoLO-HUBs verfolgt dabei einen ganzheitlichen Ansatz, der alle Phasen des Lebenszyklus von Rotorblättern berücksichtigt: von der Demontage und Vorbehandlung über die Rückgewinnung von Glas- und Carbonfasern bis hin zur Aufwertung der recycelten Fasern für hochwertige Anwendungen in der Windenergie, der Bau- oder Automobilindustrie. Im Projekt werden zwei Demonstrationsanlagen in Deutschland und Spanien aufgebaut, und eine digitale Plattform dient als Wissensdrehscheibe für Best Practices und die Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle.

Das Konsortium umfasst 18 Partner aus sieben Ländern, darunter das spanische AITIIP Technology Centre als Koordinator, das Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV), Nordex Energy GmbH, Mitsubishi Chemical Advanced Materials, Jansen Recycling Group, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa und weitere Forschungseinrichtungen und Industriepartner. Gemeinsam kombiniert das Konsortium Expertise aus Forschung, Industrie und Recycling, um praktikable Lösungen für die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Rotorblattmaterialien zu entwickeln. Durch die Optimierung der Recyclingprozesse, die Rückgewinnung hochwertiger Fasern und die Integration in nachhaltige Geschäftsmodelle soll EoLO-HUBs einen entscheidenden Beitrag zu einer ressourcenschonenden und klimafreundlichen Windenergie leisten.

RE SORT

Das Forschungsprojekt RE SORT[134] zielt auf die Entwicklung wirtschaftlicher Pyrolyseverfahren zum Recycling von dickwandigen faserverstärkten Verbundwerkstoffen, wie sie in Rotorblättern von Windenergieanlagen verwendet werden. Diese Materialien bestehen überwiegend aus duroplastischen Kunststoffen, die sich bisher schwer recyceln lassen. Das Projekt wird unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM durchgeführt, in Zusammenarbeit mit weiteren Fraunhofer-Instituten wie dem Institut für Windenergiesysteme (IWES) und dem Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung (WKI).

Die Laufzeit des Projekts begann im Mai 2023 und läuft bis April 2026. Es wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Programms „Innovationsförderung für die Energiewende“ gefördert.

Ziel von RE SORT ist es, ein ressourcenschonendes und wirtschaftliches Verfahren zu entwickeln, das die Rückgewinnung von Glas- und Kohlenstofffasern sowie von Pyrolyseöl und -gas ermöglicht. Diese Sekundärrohstoffe sollen in industriellen Anwendungen wiederverwendet werden können. Im Fokus steht die Entwicklung von Batch-Pyrolyseprozessen, bei denen die Matrixharze durch Erhitzung in gasförmige und ölige Kohlenwasserstoffe zerlegt werden. Ein weiterer Ansatz ist die Mikrowellen-Pyrolyse, bei der die Energie durch Mikrowellenstrahlung zugeführt wird.

Das Projekt trägt dazu bei, die Recyclingfähigkeit von Windturbinenkomponenten zu erhöhen und somit die Kreislaufwirtschaft in der Windenergiebranche zu fördern. Durch die Entwicklung effizienter Recyclingtechnologien leistet RE SORT einen Beitrag zur Reduktion von Abfallmengen und zur Schonung natürlicher Ressourcen.

REWIND Project

Das europäische Forschungsprojekt REWIND Project (Effiziente Stilllegung, Wiederverwendung und Recycling zur Steigerung der Kreislauffähigkeit von Windenergiesystemen am Ende ihrer Lebensdauer)[135] hat eine Laufzeit vom Januar 2024 bis Dezember 2027 und wird im Rahmen des Horizon Europe-Programms gefördert. Koordiniert wird das Projekt vom spanischen Kunststofftechnologiezentrum AIMPLAS. Das Konsortium besteht aus 14 Partnern aus sieben Ländern, darunter sechs Forschungseinrichtungen (darunter zwei Universitäten), vier kleine und mittlere Unternehmen, drei große Unternehmen und eine Vereinigung.

Ziel des REWIND-Projekts ist die Entwicklung innovativer Technologien für die effiziente Stilllegung, Wiederverwendung und das Recycling von Windturbinen-Rotorblättern. Dabei sollen neue Methoden für die Rückgewinnung und Wiederverwertung von Verbundwerkstoffen entwickelt werden, um deren Kreislauffähigkeit zu erhöhen und industrielle Anwendungen für diese Materialien zu schaffen.

Das Projekt umfasst mehrere Schlüsseltechnologien: Zunächst werden Verfahren zur Demontage, Qualitätsinspektion und Charakterisierung von Verbundabfällen entwickelt, um zu entscheiden, ob Bauteile aus ausgemusterten Produkten wiederverwendet oder recycelt werden können. Anschließend werden innovative Pyrolyse- und Solvolyse-Verfahren erforscht, um die Verarbeitungstemperaturen und -zeiten zu reduzieren. Die gewonnenen Sekundärrohstoffe, wie z. B. aufbereitete Glasfasern und recycelte Vitrimer-Matrixmaterialien, sollen für die Herstellung von neuen Windturbinenkomponenten wie Rotorblatt-Rümpfen und Reparaturpatches verwendet werden.

134 Weitere Informationen: RE SORT.

135 Weitere Informationen: Rewind project.

7.2.6 Abgeschlossene Projekte

RecycleWind

Das Forschungsprojekt RecycleWind[136] – Konzeption und Anwendungssimulation eines selbstlernenden Verwertungsnetzwerks zur ressourcenschonenden Lenkung der Stoffströme für hochwertige und insbesondere langlebige Produkte am Beispiel von Windenergieanlagen – gliedert sich in die Abschnitte RecycleWind 1.0 (Laufzeit 2/2018 bis 10/2019) und RecycleWind 2.0 (Laufzeit 8/2020 bis 1/2022) und wird intern als Projekt RecycleWind 3.0 weitergeführt. Projektträger ist das Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft (IEKrW) an der Hochschule Bremen, unterstützt durch die Beratungsfirma brands & values GmbH.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines resilienten, selbstlernenden Verwertungsnetzwerks für Windenergieanlagen, insbesondere für deren Rotorblätter. Angesichts der steigenden Anzahl von Anlagen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, soll hochwertiges Recycling auch für langlebige Produkte mit Nutzungsdauern von 20 Jahren und mehr sichergestellt werden.

Im Mittelpunkt stehen die Erforschung und Entwicklung wissenschaftlich abgesicherter Methoden der Selbststeuerung in Stoffstromsystemen. Dazu wurden Simulationen möglicher Anwendungen durchgeführt und Konzepte für geeignete Dienstleistungen entwickelt, die den Ansatz eines Verwertungsnetzwerks unterstützen. Besonderes Augenmerk lag auf der Integration aller relevanten Akteure entlang des Lebenszyklus, um gemeinsam spezifische, aber flexible Recyclingvereinbarungen zu treffen und die Materialströme ressourcenschonend zu steuern. Im Rahmen des Projekts wurde eine Datenbank aller installierten Windenergieanlagen On- und Offshore aufgebaut, ergänzt durch ein Prognosetool. Ziel war die Entwicklung verschiedener Tools zur Unterstützung eines nachhaltigen Recyclings. Zudem wurde eine erweiterte Umweltproduktdeklaration (EPD) am Beispiel der Rotorblätter entwickelt, um ein effizientes Kreislaufwirtschaftssystem mit hoher Rückführung von Sekundärstoffen für die Hauptkomponenten von Windenergieanlagen zu gewährleisten.

ZEBRA

Das Forschungsprojekt ZEBRA[137] – Zero wastE Blade ReseArch – mit der Laufzeit September 2020 bis März 2024 verfolgte das Ziel, die technische, wirtschaftliche und ökologische Relevanz thermoplastischer Windturbinenblätter im industriellen Maßstab nachzuweisen und durch einen Ökodesign-Ansatz eine hohe Recyclingrate zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts wurden zwei maßstabsgetreue Rotorblätter (62,2 m und 77,4 m) entwickelt und getestet. Diese bestehen aus innovativen Materialien wie dem thermoplastischen Harz Elium® von Arkema, MMA-Klebstoffen und den Ultrablade-Hochleistungsglasgeweben® von Owens Corning. Diese Materialien wurden aufgrund ihrer Recyclingfähigkeit ausgewählt, sodass die Rotorblätter am Ende ihrer Lebensdauer einer Reihe von Recyclingprozessen unterzogen werden können, um sowohl das Harz als auch die Glasfasern zurückzugewinnen.

Das Projektkonsortium unter der Leitung von IRT Jules Verne, an dem Arkema, Canoe, ENGIE, LM Wind Power, Owens Corning und Suez beteiligt sind, hat zudem eine innovative Ökobilanzstudie (LCA) erstellt. In dieser werden die Umweltauswirkungen und Vorteile des geschlossenen Recyclingprozesses für ZEBRA-Windturbinenblätter bewertet. Die Studie berücksichtigt alle Phasen des Lebenszyklus des Rotorblattes ab – von der Rohstoffbeschaffung über die Herstellung bis hin zur Behandlung von Altabfällen – und stützt sich auf von Projektpartnern zur Verfügung gestellten Daten. Mehr als zehn Umweltindikatoren wurden analysiert.

Die Ergebnisse der LCA verdeutlichen die ökologischen Vorteile der ZEBRA-Blätter und liefern einen vollständigen Überblick über den ökologischen Fußabdruck, wobei auch kleine Auswirkungen berücksichtigt wurden. Damit leistet das Projekt einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Technologien und zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft in der Windenergie.

DecomBlades

Das Forschungsprojekt DecomBlades[138] entwickelt nachhaltige Recyclingtechnologien für Windturbinen-Rotorblätter aus glas- und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (GFK/CFK). Das 2021 gestartete, dreijährige Projekt wird vom dänischen Innovationsfond gefördert und vereint führende Unternehmen wie Ørsted, Vestas, Siemens Gamesa, LM Wind Power, FLSmidth und MAKEEN Energy sowie die Universitäten von Süddänemark (SDU) und der Technischen Universität Dänemark (DTU).

Ziel ist der Aufbau funktionaler Wertschöpfungsketten von der Demontage über die Aufbereitung bis zur Wiederverwendung der Materialien. Ein Kerninstrument ist der „Blade Material Passport“, der Recyclingpartnern detaillierte Informationen über Zusammensetzung und Herkunft der Rotorblattmaterialien liefert. Technologischer Durchbruch war die Rückgewinnung und Aufbereitung von Glasfasern mittels Pyrolyse: 2023 wurden über eine Tonne aufbereiteter Glasfasern an 3B-Fibreglass geliefert, die erfolgreich in neuen Hochleistungs-Rotorblättern eingesetzt wurden. DecomBlades trägt so zur Kreislaufwirtschaft, CO_2-Reduktion und nachhaltigen Entwicklung in der Windenergiebranche bei.

136 Weitere Informationen: RecycleWind 2.0.

137 Weitere Informationen: ZEBRA.

138 Weitere Informationen: DecomBlades.

WindLoop

Das Forschungsprojekt WindLoop[139] wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert und zielte darauf ab, die Ressourceneffizienz in der Windenergiebranche deutlich zu verbessern, indem wertvolle Materialien aus ausgemusterten Windenergieanlagen rückgeführt werden. Die Laufzeit des Projekts erstreckte sich von April 2021 bis April 2023. Träger und Kooperationspartner waren die Walch GmbH & Co. KG aus Baudenbach sowie das Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART) an der TU Bergakademie Freiberg.

Ziel des Projekts war die Entwicklung und Erprobung effizienter Verfahren zur Rückgewinnung von Seltene-Erde-Metallen sowie von Nicht-Eisen-Metallen aus den Permanentmagneten der Generatoren von Windturbinen. Diese Materialien, insbesondere Eisen-Nickel-Bor (FeNdB), sind sowohl wertvoll als auch begrenzt verfügbar. Im Rahmen des Projekts wurden fünf Windenergieanlagen-Generatoren demontiert, um die Magneten zu extrahieren. Dabei kamen innovative Entmagnetisierungs- und Zerlegeverfahren zum Einsatz, die den Arbeitsaufwand minimierten, die Sicherheit erhöhten und Emissionen reduzierten.

Die gewonnenen Materialien wurden anschließend industrietauglich aufbereitet, sodass sie erneut in der Produktion genutzt werden können. Darüber hinaus wurden die Prozesse in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Das Projekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft, zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Reduktion von Abfällen in der Windenergiebranche. Die Ergebnisse zeigen, wie technologische Innovationen in Verbindung mit praxisnahen Recyclingverfahren die Nachhaltigkeit der Windenergieproduktion verbessern können.

139 Weitere Informationen und Abschlussbericht: WindLoop.

Anhang

Tabelle 2: Ländervorgaben zum Rückbau von Windenergieanlagen

Bundesland	Regelungen in der Landesbauordnung	Vorgaben in Verwaltungsvorschriften/Erlassen/Hinweisen
Baden-Württemberg	§ 60 LBO BW	Themenportal Windenergie[140]
Bayern		Themenplattform Windenergie[141]
Berlin	–	–
Brandenburg	§ 72 Abs. 2 Satz 3 BbgBO	–
Bremen	–	–
Hamburg	–	–
Hessen		Rückbauerlass v. 27.08.2019[142] Ergänzung zum Rückbauerlass v. 13.11.2024[143]
Mecklenburg-Vorpommern	–	–
Niedersachsen		Windenergieerlass v. 20.07.2021[144] Hinweise der Servicestelle Erneuerbare Energien für die Genehmigung von WEA an Land in Niedersachsen (Stand: 01.05.2024)[145]
Nordrhein-Westfalen		Windenergieerlass v. 08.05.2018[146]
Rheinland-Pfalz	§ 70 Abs. 1 Satz 5 LBauO RP	Rundschreiben des FM RhPf v. 19.04.2024 zur Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich[147]
Saarland	–	–
Sachsen	–	Gemeinsame Hinweise des SMUL und des SMI zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung gem. § 35 Abs. 5 BauGB v. 12.01.2016[148]
Sachsen-Anhalt	§ 71 Abs. 3 Satz 2 BauO LSA[149]	Hinweise des Ministeriums für Bau und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt[150] zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung von Windenergieanlagen (WEA) v. 21.06.2005[151]
Schleswig-Holstein	–	Rückbauerlass v. 22.04.2020[152]
Thüringen	§ 71 Abs. 3 Satz 2, 3 ThürBO	Erlass des Ministeriums für Digitales und Infrastruktur zur Gewährleistung des vollständigen Rückbaus von Windenergieanlagen nach der endgültigen Einstellung ihrer zulässigen Nutzung vom 28.08.2025

140 Regierungspräsidium Tübingen (o. D.).
141 Bayerisches Staatsministerium (o. D.).
142 HMWEVW und HMUKLV (2019), S. 850.
143 HMWVW und HMLU (2024).
144 MU, ML, MI und MW (2021).
145 MU (2024), S. 34 f., S. 72.
146 MWIDE, MULNV und MHKBG (2018).
147 MF RLP (2024).
148 SMI und SMUL (2016).
149 Siehe hierzu OVG Magdeburg, Urt. v. 12.05.2011 – 2 L 239/09.
150 MBV (2005).
151 MELUND (2020).
152 TMDI (2025).

Literatur- und Quellenverzeichnis

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWEVLR) und Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) (2024), Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Falle eines Betreiberwechsels.

Agatz, M. (2023), Windenergiehandbuch, 19. Ausgabe März 2023.

Aldosari, S., AlOtaibi, B., Alblalaihid, K. et al. (2024), Mechanical Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Polymer in a Circular Economy. Polymers, 16(10), 1363. MDPI AG.

Battis, U., Krautzberger, M., Löhr, R.-P. (2025), Baugesetzbuch: BauGB, 16. Auflage.

Bayerisches Staatsministerium (o. D.), Themenplattform Windenergie, abgerufen am 8.9.2025.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2021), Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von Windenergieanlagen. Seite 22 f.

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) (2025), Leitfaden zur Anwendung der Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) – Hierarchiestufen Recycling und sonstige Verwertung.

Bundesverband Windenergie (BWE) (2023a), SF_6-freier Betrieb von Schaltanlagen in der Windenergie, Informationspapier.

Bundesverband Windenergie (BWE) (2023b), Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen.

Bundesverband Windenergie (BWE) (2024), Überblick der landesrechtlichen Regelungen zum Rückbau von Windenergieanlagen.

Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV) (o. D. a), Stahlschrottsortenliste.

Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV) (o. D. b), Europäische Stahlschrott-sortenliste.

Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV) (o. D. c), Markt und Preise, abgerufen am 28.10.2025.

De Fazio, D., Boccarusso, L., Formisano, A. et al. (2023), A Review on the Recycling Technologies of Fibre-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Industrial Fields. Journal of Marine Science and Engineering, 11(4), 851. MDPI AG.

DecomBlades (o. D.), Website, abgerufen am 28.10.2025.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) (o. D.), Projektdatenbank, Projekt 37114/01 WindLoop – Effiziente Rückführung von Selten-Erde- und Nicht-Eisen-Metallen aus Windenergieanlagen in den Stoffkreislauf.

Deutsche Windindustrie (o. D.), Rückbaukosten – Windenergieanlagen.

DIN 4226-100 (2002), Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.

DIN SPEC 4866 (2020, Oktober), Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen.

Ekardt, F., Beckmann, K. (2007), Der Rückbau von Windenergieanlagen als Auslegungs- und Kompetenzproblem.
In: LKRZ 2007, S. 452 ff.

Engelhardt, H., App, M., Schlatmann, A. (2025), Verwaltungs-Vollstreckungsgesetz, Verwaltungszustellungsgesetz (VwVG/ VwZG), 13. Auflage.

EoLo HUBS (o. D.), Website, abgerufen am 28.10.2025.

Erneuerbare Energien (Hrsg.) (2024), Rückbau: Chancen und Herausforderungen, Heft 07/2024.

Ernst, W., Zinkahn, F., Bielenberg, T., Krautzberger, M. (2024), Baugesetzbuch (BauGB), 157. Auflage.

Ersatzbaustoffverordnung (EBV) v. 9.7.2021 (BGBl. I S. 2598), zuletzt geändert durch Art. 1 der Verordnung v. 13.7.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 186).

European Commission (2020), Report from the Commission assessing the availability of alternatives to fluorinated greenhouse gases in switchgear and related equipment, including medium-voltage secondary switchgear.

Fachagentur Windenergie an Land (FA Wind) (2023), Rundbrief Windenergie und Recht (1/2023)

Fachagentur Windenergie an Land (FA Wind) (2021), Weiterbetrieb von Windenergieanlagen – Was gilt es zu beachten?

Fachagentur Windenergie an Land (FA Wind) (2018), Brechen & Sieben – Fachaustausch zu End-of-Life von Windenergieanlagen.

Fachagentur Windenergie an Land (FA Wind) (2017), Rundbrief Windenergie und Recht (3/2017).

Fachagentur Wind und Solar (FA Wind und Solar) (2025a), Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland im 1. Halbjahr 2025.

Fachagentur Wind und Solar (FA Wind und Solar) (2025b), Rundbrief Windenergie und Recht (1/2025).

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM), (2023), Pyrolyseverfahren versprechen nachhaltiges Recycling von Faserverbundwerkstoffen aus Rotorblättern.

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) (o. D.), Forschungsprojekt RE_Sort: Nachhaltiges und wirtschaftliches Recycling von Windkraft-Rotorblättern mittels Pyrolyse der Faserverbundwerkstoffe.

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) (o. D.), Forschungsprojekt ReusaBlade: Recyclingfähige Materialien für Rotorblätter und deren Wiederverwertung.

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) (o. D.), Forschungsprojekt RE_SORT: Pyrolyse dickwandiger Faserverbundwerkstoffe als Schlüsselinnovation im Recyclingprozess für Rotorblätter von Windenergieanlagen.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW) und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) (2019), Gemeinsamer Erlass zur Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich, Erlass vom 27. August 2019.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW) und Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) (2024), Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Falle eines Betreiberwechsels.

Immowelt (2025), Tiny House aus Windrad: Upcycling auf höchstem Niveau.

Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft (IEKrW), (o. D.), Forschungsprojekt RecycleWind – Konzeption und Anwendungssimulation eines selbstlernenden Verwertungsnetzwerks zur ressourcenschonenden Lenkung der Stoffströme für hochwertige und insbesondere langlebige Produkte am Beispiel von Windenergieanlagen (WEA).

IRT Jules Verne, Nantes Université, (o. D.), Forschungsprojekt ZEBRA – Zero Waste Blade Research Project.

Jäger, A., Chunyu Miao, Z. und Weyand, S. (2025), Recovering Rare-Earth Magnets from Wind Turbines—A Potential Analysis for Germany. Energies, 18(10), S. 2436.

Jarass, F., Petersen, C. (2022), Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), 2. Auflage.

Karuppannan Gopalraj, S. und Kärki, T. (2020), A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre reinforced composites: fibre recovery, properties and life cycle analysis. Springer Nature Link.

Keith, M., Al-Duri, B., McDonald, T. et al. (2025), Solvent-based Recycling as a Waste Management Strategy for Fibre-Reinforced Polymers: Current State of the Art. PubMed Central, National Library of Medicine.

Körner, J. (2018), Rückbau bei Windrädern oft mangelhaft. NDR.

Kramer, K. (2025), Circular Supply Chain Development for the Wind Industry – Conceptional framework, exploration and quantification of second lifecycle pathways. Dissertation, Leuphana University Lüneburg. CC BY 4.0 Lizenz.

Landmann, G., Rohmer, H. (2025), Umweltrecht, 106. Auflage.

Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur (BNetzA) (o. D.). Website, abgerufen am 30.10.2025.

Ministerium der Finanzen Rheinland-Pfalz (MF RLP) (2024), Rundschreiben vom 19. April 2024, Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich.

Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt (MBV) (2005), Hinweise zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung von Windenergieanlagen (WEA), Erlass vom 21. Juni 2005.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein (MELUND) (2020), Erlass zum Vollzug der Rückbauverpflichtung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 Baugesetzbuch (BauGB) bei Genehmigung und nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung von Windkraftanlagen.

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie (MWIDE), Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MULNV), Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung (MHKBG) des Landes Nordrhein-Westfalen (2018), Erlass für die Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen und Hinweise für die Zielsetzung und Anwendung (Windenergie-Erlass), Gemeinsamer Runderlass, Az. VI.A-3 – 77-30, Az. VII.2-2 – 2017/01, Az. 611 – 901.3/202, vom 8. Mai 2018.

Mitschang, S., Reidt, O. (2025), in: Battis, U., Krautzberger, M., Löhr, R.-P. (Hrsg.), Baugesetzbuch – Kommentar (16. Auflage).

Monses, J. (2024), Repowering: Rückbau und Verwertung von Windenergieanlagen. Neowa GmbH. BWE-Webseminar.

Neowa GmbH (o. D.), Website, abgerufen am 30.10.2025.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MUENK), Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML), Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport (MI), Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Bauen (MW) (2021), Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen an Land in Niedersachsen (Windenergieerlass), Gemeinsamer Runderlass vom 20. Juli 2021.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) – Servicestelle Erneuerbare Energien (2024), Hinweise für die Genehmigung von Windenergieanlagen an Land in Niedersachsen.

NOVO-TECH TRADING Beteiligungs GmbH, Megawood (o. D.), Website, abgerufen am 30.10.2025.

Petersen, C. (2022), Die Produktverantwortung im Kreislaufwirtschaftsrecht, NVwZ 2022, S. 921.

Qureshi, J. (2022), A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites. Sustainability, 14(24), Article 16855.

RDR Wind e. V. – Repowering, Demontage und Recycling (o. D.), Daten & Fakten.

Regierungspräsidium Tübingen (o. D.), Themenportal Windenergie, abgerufen am 4.9.2025.

rethink*rotor (o. D.), Website, abgerufen am 28.10.2025.

REWIND, Website, abgerufen am 28.10.2025.

Sächsisches Staatsministerium des Innern (SMI) und Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) (2016), Gemeinsame Hinweise des SMUL und des SMI zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung gemäß § 35 Abs. 5 BauGB.

Santos, B. (2024), US scientists chemically recycle carbon fibre in wind turbine blades. Sustainable Plastics.

Sawal, J. (2025), Advanced Wind Turbine Blade Material Market. Emergen Research.

Seibert, M. (2019), Dauerhaft aufgegebene Anlagen, 1. Auflage.

Sittig-Behm, A. (2020), Rückbau von Windenergieanlagen – Kann das bleiben, oder muss das weg? ZNER 4/2020.

Spuziak-Salzenberg, D., Germer, F., Brand, L.-M. et al. (2024), Aktuelle Trends beim Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. In: Müll und Abfall 10/2024, S. 544 ff.

State of Green (o. D.), Decommissioned wind turbine blades spun into recyclable buildings.

Thüringer Ministerium für Digitales und Infrastruktur (TMDI) (2025), Gewährleistung des vollständigen Rückbaus von Windenergieanlagen nach der endgültigen Einstellung ihrer zulässigen Nutzung, Rückbauerlass vom 6.3.2025.

TÜV Süd (o. D.), Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 20 Jahren.

Umweltbundesamt (UBA) (2019), Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen. UBA-Texte 117/2019.

Umweltbundesamt (UBA) (2023), Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. UBA-Texte 48/2023.

Umweltbundesamt (UBA) (o. D. a), Themenseite: Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling, Repowering.

Umweltbundesamt (UBA) (o. D. b), Themenseite: Rotorblattaufbereitung und Recycling von Faserverbundwerkstoffen.

Umweltbundesamt (UBA) (o. D. c), Themenseite: EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase.

VDI energie + umwelt (2019), Windradrecycling: Wenn das Windrad stillsteht.

Windindustrie in Deutschland (o. D.), Ausgediente Rotorblätter für Schallschutzwände oder Freilichtbühnen wiederverwenden.

WINDKANAL – Der Windenergie Podcast (2023), Interview mit Frank Kroll, neowa GmbH.

Windmesse-Newsletter Nr. 6 (2022), Vom Rotorblatt zum Ski.

Wings for Living (o. D.), Website, abgerufen am 30.10.2025.

Fachagentur Wind und Solar e. V.

Fanny-Zobel-Straße 11 | 12435 Berlin
T +49 30 64 494 60-60
post@fa-wind-solar.de | www.fachagentur-wind-solar.de

FACHAGENTUR
WIND UND SOLAR