



Themenkurzprofil Nr. 87
Januar 2026

Wiederverwertung und Entsorgung von Rotorblättern aus Windenergieanlagen

Mona Hille

In Kürze

Die in den 1990er und 2000er Jahren installierten Windenergieanlagen erreichen nach rund 20 bis 25 Betriebsjahren das Ende ihrer wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit. Besonders die aus Faserverbundkunststoffen gefertigten Rotorblätter stellen die Branche vor Entsorgungs- und Recyclingprobleme, da für diese bisher keine etablierten stofflichen Verwertungswege in großem Maßstab existieren. In den kommenden Jahren wird eine stark wachsende Menge an Rotorblättern als Abfall anfallen. Gleichzeitig fehlen in Deutschland bislang ausreichende und technisch ausgereifte Verwertungskapazitäten, um diese Mengen zeitnah und flächendeckend zu behandeln.

Vor diesem Hintergrund rücken neben dem Ausbau kreislauffähiger Recyclingprozesse auch Übergangs-

lösungen in den Fokus, bei denen ausgediente Rotorblätter im Sinne der Wiederverwendung weiter genutzt werden. Dadurch werden Ressourcen länger im Nutzungskreislauf gehalten und der Entsorgungsdruck kann gemindert werden. Die politischen Rahmenbedingungen für Recycling und Wiederverwertung, die materialtechnischen Herausforderungen, die derzeitigen Entsorgungswege sowie innovative Recyclingverfahren, einschließlich ihrer ökologischen Bewertung, gewinnen damit weiter an Bedeutung.

Darüber hinaus rücken politische und gesellschaftliche Implikationen stärker in den Fokus, etwa Vorgaben der Kreislaufwirtschaft und die Frage, wie Hersteller und Betreiber im Sinne erweiterter Verantwortung in Recyclingprozesse eingebunden werden können.

Hintergrund und Entwicklungsstand

Politische Steuerung der Entwicklung und des Ausbaus von Windenergieanlagen bis zum Jahr 2000

Windkraft als Energiequelle ist in Deutschland eng mit politischer Steuerung verbunden. In den 1970er und 1980er Jahren wurden verschiedene Demonstratoren kleiner Windenergieanlagen (WEA) in staatlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten entwickelt. Seit den 1990er Jahren förderte das Bundesforschungsministerium auch die Entwicklung der ersten Windparks, in denen der gemeinsame Betrieb unterschiedlicher Anlagenkonzepte erprobt und ausgebaut wurde. Später setzte das Bundesforschungsministerium das Programm „250 MW Wind“¹ zur Weiterentwicklung der Anlagentechnik um, um Betriebsfestigkeit, Lebensdauer und Instandhaltung der Anlagen zu verbessern (Bernhardt 2013, S. 4 ff.; Durstewitz/Hahn 2004; Hoppe-Kilpper 2003, S. 29 ff.). Außerdem enthielt das Programm zusätzliche Subventionen der je Kilowattstunde (kWh) eingespeisten Energie aus Windkraft² zur garantierten Vergütung³ durch das kurz vorher in Kraft getretene Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG)⁴ (Hoppe-Kilpper 2003, S. 16 ff.). Diese politischen Anreize trugen maßgeblich zum Ausbau von Windparks in Deutschland bei (Hoppe-Kilpper 2003, S. 41 vff. und S. 113).

Ausbau und technologischer Fortschritt seit 2000

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)⁵ trug entscheidend dazu bei, die Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien innerhalb weniger Jahre um bis zu 95 % zu senken und Deutschland zu einem der führenden Märkte im Bereich der Windenergie zu machen (Hoppe-Kilpper 2003, S. 19). Zudem prägte der technologische Fortschritt den Ausbau von WEA. Von 2001 bis 2020 wurden WEA immer höher und größer, was zu einer Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit führte. Technologische Innovationen wie getriebelose Konzepte (seit etwa 1995) und spezielle Schwachwindanlagen (seit etwa 2010) ermöglichten es, durch größere Rotordurchmesser auch an weniger windstarken Standorten hohe Erträge zu erzielen (Hoppe-Kilpper 2003).

Eine spürbare Verlangsamung des Wachstums im Windenergiesektor in Deutschland resultierte aus einer Reihe politischer und regulatorischer Maßnahmen, die den zuvor durch das EEG von 2000 ausgelösten dynamischen Ausbau bremsen. Im Verlauf

der 2010er Jahre wurde das Gesetz mehrfach novelliert. Mit der Einführung des Ausschreibungssystems ab 2017 wurden feste Einspeisevergütungen schrittweise durch wettbewerbliche Vergabeverfahren ersetzt. Parallel dazu wurden die Genehmigungsbedingungen für WEA an Land ausgeweitet, insbesondere infolge der Anforderungen im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)⁶. Die verschärften Genehmigungsbedingungen kombiniert mit der zunehmenden Flächenknappheit führten in den Folgejahren in vielen Regionen zu einer Reduktion der jährlichen Ausbauraten (Benz/Wegner 2023; BWE o. J.; Rosenkranz et al. 2020).

Rückbau und Repowering ab 2021

Als es mit dem Auslaufen der EEG-Förderperiode Ende 2020 zu einem nächsten Einschnitt in der Entwicklung der Windenergie kam, standen in Deutschland 28.756 WEA (BayernLB Research 2022, S. 3). Die Ü20-Anlagen verloren ihre feste Einspeisevergütung. Da der Weiterbetrieb zu den geltenden Börsenstrompreisen damit nicht mehr wirtschaftlich war, entschieden sich zahlreiche Betreiber für eine Stilllegung. Parallel dazu gewann das im BImSchG verankerte Repowering an Bedeutung. Dabei handelt es sich um einen rechtlich definierten Modernisierungsprozess für Windenergieparks, mit dem der Gesetzgeber Betreibern ermöglicht, bestehende Standorte im Rahmen eines Änderungs-genehmigungsverfahrens zu modernisieren. Die Neuanlagen sind in der Regel leistungsstärker, meist mit größerem Rotor und höherer Bauweise sowie modernerer Regelungs- und Netzanschluss-technik, wodurch eine Steigerung des Energieertrags am Standort erreicht wird. Vorhandene Infrastrukturen wie Netzanschlüsse und Zuwegungen können weiter genutzt werden, ohne dass der Genehmigungsprozess neu durchlaufen werden muss. Repowering fördert eine effizientere Nutzung bestehender Flächen und begrenzt zugleich Landschaftseingriffe. Durch das Repowering wurde eine neue Phase des technologischen und strukturellen Umbaus eingeleitet (BDEW 2022; Benz/Wegner 2023; BWE o. J.; Rosenkranz et al. 2020).

Zunehmende Rotorblattabfälle bis 2040

Das Auslaufen der EEG-Förderung und die Möglichkeit, bestehende Windparks durch Repowering umzurüsten, entfalten eine besondere Drucksituation bei der Verwertung der Rotorblätter, die angesichts ihrer materiellen Zusammensetzung eine große Herausforderung für das Recycling sind. 2020 wurden 203 WEA vom Netz genommen und demontiert (WD 2020), im Vergleich dazu waren es 2019 82 WEA (Deutsche WindGuard 2020, S. 5). Für die 2020er Jahre wird in Deutschland mit jährlich rund 15.000 bis 30.000 t anfallender Abfälle aus faserverstärkten Kunststoffen gerechnet. Für den Zeitraum bis 2040 wird ein deutlicher Anstieg der jährlichen Abfallmengen erwartet, vor allem in den 2030er Jahren. Die höchste Abfallmenge wird mit bis zu 70.000 t

1 Das Programm „250 MW Wind“ wurde 1989 als Programm „100 MW Wind“ entwickelt, nach der Wiedervereinigung und der großen Nachfrage aber bereits 1991 in das Programm „250 MW Wind“ umgewandelt.

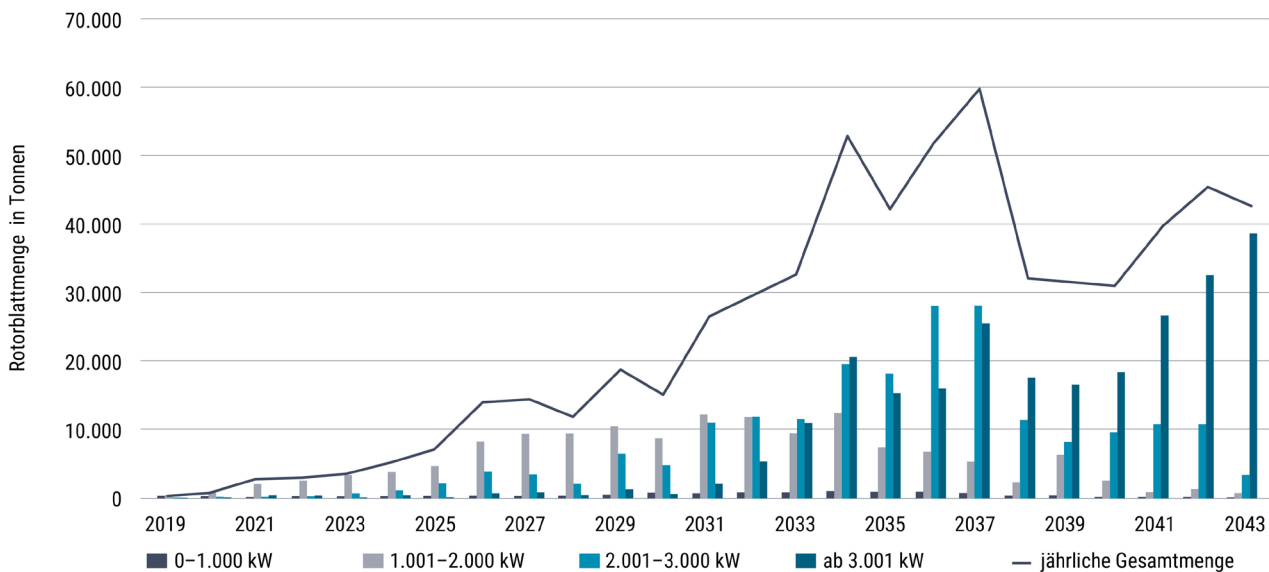
2 Zusätzlich zur StromEinspG/EEG-Vergütung erhielten die Betreiber 6 Pfennig/kWh bis zur Förderhöchstgrenze von 25 % der förderfähigen Investitionskosten.

3 Nach §§ 1 bis 3 StromEinspG waren Elektrizitätsversorgungsunternehmen verpflichtet, Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und zu vergüten. Für Wind- und Solarstrom betrug die Vergütung mindestens 90 % des im vorletzten Kalenderjahres erzielten Durchschnittserlöses.

4 Das damals gültige StromEinspG vom 1.1.1991 regelte den Netzzugang und die Vergütung der an die Energieversorgungsunternehmen (EVU) gelieferten kWh. Die Höhe der Vergütung pro kWh wurde dabei jährlich auf Basis des in der amtlichen Statistik des Bundes für das vorletzte Kalenderjahr veröffentlichten Durchschnittserlöses aus dem Stromverkauf an Letztverbraucher neu festgelegt.

5 Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 29.3.2000

6 Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 17. Mai 2013, zuletzt am 22.12. 2025 geändert

Abbildung 1 Prognose zu jährlichen Mengen an EoL-Rotorblättern in Deutschland für den Bereich Onshore, Stand installierte Anlagen 31.12.2023

Quelle: nach Spuziak-Salzenberg et al. (2024)

für 2037 berechnet (Spuziak-Salzenberg et al. 2021). Bis 2040 werden in Deutschland insgesamt bis zu 640.000 t Verbundkunststoffabfälle aus dem Rückbau von WEA anfallen (Kühne et al. 2022, S. 122 ff.).

Rückbau von Windenergieanlagen

Der Rückbau einer WEA umfasst die vollständige Demontage aller Anlagenteile und die Wiederherstellung des ursprünglichen Standortzustands (Kühne et al. 2022, S. 209 ff.). Bis zu 90 % der verbauten Materialien werden in etablierten Verfahren stofflich recycelt. Metalle werden eingeschmolzen, Beton dient als Recyclingbaustoff und Elektroschrott wird über etablierte Systeme entsorgt (BWE 2023; Fachagentur Wind und Solar 2023). In den modernen WEA mit getriebelosen Direktantriebssystemen sind überdies seltene Erden (SE) in den Permanentmagnetgeneratoren (PMSG) verbaut. SE machen nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse einer WEA aus, sind aber aufgrund der deutschen Importabhängigkeit und ihres hohen Marktwerts von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Die Rückgewinnung von SE aus den Permanentmagnetgeneratoren bringt erhebliche technologische Herausforderungen mit sich (Schönfeldt et al. 2024; WD 2018; Yang et al. 2017). Dieser Aspekt wird im vorliegenden Themenkurzprofil jedoch nicht behandelt.

Die zentrale Herausforderung beim Rückbau von WEA ist die stoffliche Verwertung der großvolumigen Rotorblätter. Diese machen einen Anteil von 5 % der WEA aus und bestehen überwiegend aus schwer trennbaren Verbundwerkstoffen wie Glasfaserkunststoff (GFK) und Carbonfaserkunststoff (CFK), also Duroplasten, welche nicht wieder aufgelöst werden können und damit die stoffliche Rückgewinnung erschweren (BWE 2023; EnBW 2025; Milke/Fuhrmann 2024). Deren Aufbereitung erfolgt

durch spezialisierte Entsorgungsfachbetriebe. Zunächst werden die Rotorblätter vor Ort in transportfähige Stücke geteilt. Der anschließende Prozess umfasst mehrere Stufen: In der Vorzerkleinerung werden die Segmente auf eine handhabbare Größe reduziert, um den Materialverbund aufzubrechen. Anschließend erfolgt die Abtrennung von Metallen, die aufgrund ihrer Störwirkung in den Verwertungsrouten manuell oder maschinell entfernt werden müssen. Kritische Stoffe wie Bleischrote aus Unwuchtkammern müssen gesondert entsorgt werden. Im Anschluss an die Materialtrennung beginnt die materialspezifische Aufbereitung und Endverwertung (BWE 2017; Kühne et al. 2022, S. 35 ff.).

Materialzusammensetzung und Verwertungsprozesse der Rotorblätter

Der überwiegende Anteil der Rotorblätter, die abgebaut und verwertet werden, besteht aus GFK. Erst seit 2001 werden CFK eingesetzt und zwar vor allem in großen Blättern, weil CFK zur Erhöhung der Steifigkeit und Biegefestigkeit dienen. Etwa 70 % der Rotorblattmasse entfallen auf diese Faserverbundkunststoffe. Faserverbundkunststoffe setzen sich aus verstärkenden Fasern und einer einbettenden Kunststoffmatrix zusammen. Diese duroplastische Matrix besteht hauptsächlich aus synthetisch hergestellten Polymerharzen, die nach dem Aushärten nicht mehr aufschmelz- oder umformbar sind. Ergänzend kommen Kernmaterialien wie Balsaholz und verschiedene Schäume zum Einsatz. Metalle finden sich insbesondere in der Verbindung mit der Nabe und als Bestandteil des Blitzschutzsystems, während Beschichtungen und Klebstoffe auf Polyurethan- oder Epoxidbasis die Oberflächen schützen und strukturelle Stabilität gewährleisten (BWE 2023; Kühne et al. 2022; WD 2020).



Deponieverbot

Bis 2005 wurden Faserverbundteile wie Rotorblätter in Deutschland auf Deponien entsorgt. Mit dem Inkrafttreten der novellierten Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV)⁷ und der Deponieverordnung (DepV)⁸ ist die Ablagerung von GFK- und CFK-Abfällen aufgrund ihres typischerweise deutlich über 6.000 kJ/kg liegenden Heizwerts sowie ihres Schadstoff- und Brandpotenzials nicht mehr zulässig.⁹ Das Deponieverbot folgt der abfallrechtlichen Hierarchie und dient Klima-, Umwelt- und Sicherheitszielen, da heizwertreiche Abfälle grundsätzlich energetisch oder stofflich zu verwerten sind. Seitdem werden Rotorblätter vorrangig stofflich oder energetisch verwertet. Lediglich rund 5 % schwer verwertbarer Reststoffe aus den Verwertungs- und Behandlungsprozessen werden heute noch auf speziell zugelassenen Deponien entsorgt. Aufgrund hoher Transport- und Behandlungskosten, strenger Genehmigungsvoraussetzungen und des gebotenen Vorrangs der Abfallverwertung gegenüber der Beseitigung findet ein Export zur Deponierung im Ausland praktisch nicht statt (Energy Transition Alliance 2021; Kühne et al. 2022).

Verwertung von Rotorblättern in Deutschland

Die Verwertungsansätze ausgedienter Rotorblätter werden hinsichtlich ihrer Zielsetzung und Eingriffstiefe voneinander abgegrenzt (Kühne et al. 2022, S. 366). In der mechanischen Verwertung werden GFK- und CFK-Segmente zerkleinert und als Faserbruch, Granulat oder Füllstoff in andere Werkstoffsysteme eingebracht. Daneben steht die thermische Verwertung in der sogenannten Zementroute (Details nachfolgend). GFK-haltige Fraktionen werden hier als Ersatzbrennstoff und Rohstoffträger

genutzt. Die chemischen Verfahren Pyrolyse¹⁰ und Solvolyse¹¹ verfolgen einen fasernerhaltenden selektiven Abbau der Polymermatrix (BWE 2017; Kühne et al. 2022). Ergänzend dazu zielen Wiederverwendungsansätze darauf ab, Rotorblattsegmente ohne stoffliche Veränderung in neue Nutzungskontexte zu überführen (EnBW 2025).

Mechanische Aufbereitung und werkstoffliche Verwertung

Das Verfahren basiert auf einer physikalischen Zerkleinerung der Verbundmaterialien, bei der die Rotorblätter stufenweise in definierte Korngrößen überführt werden. Zum Einsatz kommen großdimensionierte Schredder, Hammer- oder Prallmühlen sowie nachgeschaltete Sieb- und Windsichtereinheiten, die Materialfraktionen wie GFK, CFK, PVC-Schäume oder Balsaholz separieren und auf anwendungsspezifische Partikelgrößen einstellen (Fraunhofer IWES 2025; Tyurkay et al. 2024).

Für GFK gilt die mechanische Aufbereitung als vollständig etabliert. Die Glasfasern werden in dem Prozess stark verkürzt und verlieren ihre ursprüngliche Verstärkungswirkung, können aber in zahlreichen Anwendungen, etwa Kunstharzpressmassen und mineralischen Verbundwerkstoffen, funktionale Vorteile wie Abriebfestigkeit oder mineralische Stabilität einbringen. Die stoffliche Verwertung bietet gerade für große GFK-Mengen eine robuste und ökonomisch tragfähige Option (Kühne et al. 2022, S. 291 ff.). Ein industrielles Beispiel bietet Novo-Tech Circular, das Rotorblattmaterialien mit Holz- und Polymerfraktionen zu Bau- und Terrassenprofilen verarbeitet. Das Unternehmen verfolgt ein Recyclingkonzept, bei dem die Profile am Nutzungsende erneut zerkleinert und in den Produktionsprozess von Bau- und Terrassenprofilen zurückgeführt werden können (Novo-Tech 2023; Ørsted Deutschland 2023). Die im Vergleich zur Produktion neuer Glasfasern hohen Kosten und die Tatsache, dass die Materialbestandteile nicht in ihrer ursprünglichen Qualität zurückgewonnen werden, begrenzen die Verwendung der Profile in höherwertigen Bauprodukten (Tyurkay et al. 2024). Trotz des Downcyclingcharakters und höherer Prozesskosten ist die mechanische Aufbereitung derzeit die einzige industriell etablierte Option am Produktlebensende für große Mengen GFK-Rotorblattmaterialien, bei der stabile, wirtschaftlich nutzbare Fraktionen für den Einsatz als Füllstoff, Verstärkung oder funktionales Additiv entstehen (Kühne et al. 2022, S. 291 ff.; Fraunhofer IWES 2025).

¹⁰ Die Pyrolyse ist ein thermischer Zersetzungsprozess, der unter Ausschluss von Sauerstoff durchgeführt wird. Ziel ist die Depolymerisation der duroplastischen Matrix, während die Fasern weitgehend erhalten bleiben. Die Temperaturbereiche liegen typischerweise zwischen 400 und 700 °C, abhängig von der Art des Harzsystems und der gewünschten Zersetzungsrate. Die entstehenden gasförmigen und öligen Produkte können energetisch oder rohstofflich weiterverwendet werden.

¹¹ Die Solvolyse ist ein chemischer Abbauprozess, bei dem die duroplastische Matrix durch reaktive Flüssigkeiten, etwa Wasser, Alkohole oder organische Lösungsmittel, unter erhöhten Temperaturen und Drücken depolymerisiert wird. Der Polymerabbau findet chemisch induziert statt. Die Prozessbedingungen liegen meist zwischen 200 und 300 °C bei entsprechend erhöhten Druckniveaus, sodass das Lösungsmittel im überkritischen oder nah überkritischen Zustand vorliegt. Dadurch wird die Polymermatrix selektiv gespalten, während die Fasern weitgehend unbeeinträchtigt bleiben.

⁷ Abfallablagerungsverordnung vom 20.2.2001

⁸ Anhang 3 Deponieverordnung vom 27.4.2009, zuletzt geändert am 3.7.2024

⁹ Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19.12.2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien vom 13.12.2006

Die mechanische Verwertung von CFK erfordert dagegen eine angepasste Prozessführung, da Carbonfasern aufgrund ihrer hohen Festigkeit, elektrischen Leitfähigkeit und Neigung zum Verheddern besondere Anforderungen an die Anlagen stellen. Die Carbonfasern fragmentieren stark, sodass wesentliche strukturelle Eigenschaften verloren gehen. Die entstehenden Kurzfasern besitzen jedoch weiterhin funktionale Merkmale wie elektrische und thermische Leitfähigkeit, die in ausgewählten polymeren Formulierungen genutzt werden können. Der technologische Reifegrad mechanischer CFK-Aufbereitung ist im Vergleich zur GFK-Behandlung niedriger und die Verfahren dienen vorwiegend als Vorbehandlung für nachgelagerte energetische oder chemische Recyclingrouten, bei denen eine weitergehende Trennung von Fasern und Matrix angestrebt wird (Kühne et al. 2022, S. 312; Recycling Magazin 2021; Tyurkay et al. 2024).

Stofflich-energetische Verwertung in der Zementroute

Die stofflich-energetische Verwertung wird insbesondere dort relevant, wo Recyclingverfahren für bestimmte Materialfraktionen technisch an Grenzen stoßen und daher bislang wirtschaftlich nicht realisierbar sind. Die Verwertung von GFK-haltigen Materialien erfolgt über die Zementroute, bei der die glasfaserhaltigen Reststoffe sowohl fossile Energieträger als auch Primärrohstoffe wie Quarzsand ersetzen (UBA o. J.). Die zuvor zerkleinerten Rotorblattabfälle werden zu einem homogenen Ersatzbrennstoff aufbereitet und im Drehrohrofen energetisch genutzt. Dabei wird der Verbundcharakter von Rotorblättern gezielt ausgenutzt und die duroplastischen Harze dienen in diesem Prozess als Brennstoff. Zugleich gehen die mineralischen Bestandteile der Glasfasern, die bei hohen Temperaturen schmelzen, als Siliziumträger in die Klinkerproduktion über (Kühne et al. 2022, S. 274 ff.). Trotz der technisch ausgereiften und industriell erprobten Zementroute hat sich dieser Ansatz bislang nicht flächendeckend etabliert. Ausschlaggebend sind vor allem hohe logistische Anforderungen, die regional begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Aufbereitungs- und Abnahmekapazitäten sowie die Abhängigkeit von stabilen Materialströmen. Der operative Rückbau und die mechanische Zerlegung werden von mehreren Unternehmen übernommen, die über entsprechende Schneidtechnik und Logistik verfügen (Neowa GmbH 2021).¹² Die industrielle Aufbereitung zu zementwerkstauglichen Brennstoff- und Rohstofffraktionen konzentriert sich hingegen nahezu vollständig auf eine Anlage in Deutschland, die GFK-Rotorblattabfälle im großtechnischen Maßstab verarbeitet und die Ersatzbrennstofffraktionen an einzelne Zementwerke weitergibt, wo dann die mineralischen Glasfaseranteile vollständig in den Klinker eingebunden werden (BWE 2023; Holcim o. J.; Kühne et al. 2022, S. 42, S. 308 f. und S. 383 ff.; Lange 2018; Nehlsen AG 2020; Ørsted Deutschland o. J.; Palla 2025; WAB e. V. 2019; Wolf 2024).

Pyrolyse als thermisch-reaktives Recyclingverfahren

Bei der Pyrolyse wird die Polymermatrix von faserverstärkten Kunststoffen unter Sauerstoffausschluss thermisch zersetzt, um die wertvollen Fasern zurückzugewinnen (BWE 2017 und 2023, S. 10ff.; EnBW 2025; Windindustrie in Deutschland 2022). Die Anwendung der Pyrolyse für CFK und GFK aus Windenergieanlagen befindet sich noch in der Forschung und Entwicklung (Fraunhofer WKI o. J.a). Dabei werden die pyrolytischen Verfahren im Kontext des Rotorblattrecyclings überwiegend für glasfaserverstärkte Strukturen untersucht (WAB e. V. 2023). Die pyrolytische Rückgewinnung von Carbonfasern hat sich für CFK-Abfallströme aus der Luftfahrt- und Automobilindustrie bereits etabliert. In spezialisierten Anlagen, insbesondere im Umfeld des CFK Valley Stade¹³, werden Carbonfasern unter definierten Bedingungen mit vergleichsweise geringer Schädigung zurückgewonnen. Die Übertragung dieser Verfahren auf Rotorblätter ist zwar grundsätzlich möglich, wird jedoch durch die starke Materialheterogenität (Harzmatrix, Kernmaterialien/Schäume, Metalle, Beschichtungen/Klebstoffe), die großen Bauteilquerschnitte und die dominierenden GFK-Anteile der Rotorblätter prozesstechnisch deutlich erschwert. Entsprechend existiert für die CFK-Verstärkungen von Rotorblättern bislang keine Implementierung im industriellen Maßstab. Dieser Ansatz bleibt auf projektbezogene Versuche beschränkt (320° 2018; AERO International o. J.; Kühne et al. 2022; Quicker 2017; Reckter 2018; WiWo 2021). Die Verwertung von GFK-Laminaten aus Rotorblättern hingegen wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht (Fraunhofer IFAM 2023; Fraunhofer WKI o. J.a; Ludwig/Czichon 2022). Die Ergebnisse zeigen, dass die duroplastische Matrix der Rotorblätter technisch zersetzbar ist, aber zugleich deutliche Festigkeitsverluste der Glasfasern und erhebliche Herausforderungen bei der gleichmäßigen thermischen Behandlung heterogener Laminatstrukturen auftreten. Der hohe Energieaufwand des Prozesses und die bislang fehlende werkstoffliche Verwertbarkeit der zurückgewonnenen Glasfasern sind Gründe dafür, dass die GFK-Pyrolyse in Deutschland im Forschungsumfeld verbleibt und bisher keine industriennahe Verwertungsoption für Rotorblätter darstellt (Fraunhofer IWES 2025). Einen Schritt weiter ist das europäische Horizon-Europe-Projekt Refresh¹⁴, das pyrolytische Ansätze in ein integriertes, kreislaforientiertes Gesamtsystem zur Rotorblattverwertung einbetten will. Ende des Jahres 2025 soll in Norwegen die weltweit erste industriell ausgelegte Anlage in Betrieb gehen, in der GFK-Rotorblätter im großtechnischen Maßstab pyrolytisch in hochwertige Ausgangsstoffe zerlegt werden. Für die

12 <https://wind-turbine.com/anbieter/neowa-gmbh-lueneburg-deutschland>

13 Das CFK-Valley-Umfeld bezeichnet den Cluster rund um das CFK Valley in Stade (Niedersachsen), also ein regionales Netzwerk aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Dienstleistern, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette von CFK tätig sind. Kernakteure sind unter anderem der Verein CFK-Valley Stade e. V., das Forschungszentrum CFK NORD sowie luftfahrtnahe Unternehmen wie Airbus und spezialisierte Mittelständler, die sich mit Entwicklung, Produktion, Verarbeitung und auch Recycling von CFK beschäftigen. In diesem Umfeld ist beispielsweise auch CFK Valley Stade Recycling angesiedelt.

14 <https://refresh-project.eu>

energieintensiven Prozessschritte wird vollständig Energie aus Wasserkraft genutzt. Im Rahmen des Projekts konnte darüber hinaus demonstriert werden, dass aus recycelten Fasern und Kunststofffraktionen neue Rotorblattsegmente gefertigt werden können, was die zukünftige Realisierung geschlossener Materialkreisläufe plausibler werden lässt (ReFresh Project 2025b und 2025a; Wildermuth 2025).

Solvolyse als chemisch-reaktives Recyclingverfahren

Die Solvolyse spaltet Duroplasten mithilfe von druck- und temperaturgesteuerten Flüssigkeiten chemisch auf, wodurch die Fasern möglichst unbeschädigt zurückgewonnen werden (BWE 2017; Fraunhofer IWES 2025; Kühne et al. 2022, S. 288 f. und S. 361). Die solvolytische Verwertung von Rotorblattabfällen wird für GFK und CFK untersucht. Bei GFK bleibt die werkstoffliche Verwertbarkeit der zurückgewonnenen Glasfasern jedoch eingeschränkt, da sie trotz der faserschonenden Behandlung stark fragmentiert werden und dadurch mechanisch deutlich geschwächt sind (Gopalraj/Kärki 2020).

Für CFK folgt die Solvolyse einer anderen Entwicklungslinie. Carbonfasern können bei chemischer Matrixablösung unter optimalen Prozessbedingungen nahezu unbeschädigt und mit Oberflächeneigenschaften nahe an Neufasern zurückgewonnen werden (Branfoot et al. 2023). Solvolyse wird als vielversprechende Option für die Rotorblattverwertung betrachtet. Aufgrund komplexer Anlagentechnik und Prozessführung existiert bislang aber kein industrieller Markt für die solvolytische Verwertung von Rotorblättern (Spuziak-Salzenberg et al. 2021). Vielmehr befindet sich dieser Recyclingansatz bislang im Forschungs- und Pilotstadium. Zu den Akteuren, die an solchen Verfahren für CFK-Laminat forschen, zählen das Fraunhofer IGP mit „Solvocycle“, die TU Dresden mit „SOLV-CFK“ und dem EU-Projekt „EuReComp“¹⁵ (Fraunhofer IGP o. J.; ILK 2022; TU Dresden o. J.).

Re-Use als Zwischenlösung

Wiederverwendungsansätze (Re-Use) zielen darauf ab, Rotorblätter oder -segmente ohne stoffliche Veränderung in neue Nutzungskontexte als Bauelement zu überführen und dadurch eine zeitlich begrenzte Verlängerung der Produktlebensdauer zu erreichen (EnBW 2025; Rechsteiner 2024; Stienemann et al. 2024; Trede 2025). In Deutschland werden solche Ansätze vor allem projektbezogen umgesetzt. Die werkstofflichen Eigenschaften der Rotorblätter (hohe Steifigkeit, Witterungsbeständigkeit und aerodynamisch geformte Oberflächen) bieten dabei einen funktionalen Mehrwert (RWTH o. J; Windindustrie in Deutschland 2022). Projekte wie beispielsweise „BladeReUse“ und „Re-Wind“¹⁶ (Ramaswamy et al. 2025) erproben, wie Rotorblattsegmente für großserientaugliche Bauelemente weiterver-

wertet werden können (Windindustrie in Deutschland 2023). Sie demonstrieren die Nutzung vollständiger Rotorblätter als Brückenträger, Lärmschutzwände oder modulare Infrastrukturelemente für den öffentlichen Raum. Unter anderem wurden Fußgängerbrücken realisiert, bei denen ganze Rotorblätter als tragende Elemente dienen.¹⁷ In Aachen werden ausgediente Rotorblätter zunächst als temporäre Sitz- und Liegeinstallationen im Stadtraum genutzt und anschließend im Forschungsprojekt „power*stage“ zu tragenden Bauelementen einer energieautarken Freilichtbühne mit integrierten Second-Life-Batterien¹⁸ und PV-Folien weiterentwickelt (h_da o. J.; WDR 2025). Outdoormöbel wie Liegen, Bänke und Pflanzkübel aus Windkraftrotorblättern werden als stilvolle und ressourcenschonende Alternative vom Dresdner Start-up Wings for Living¹⁹ und dem niederländischen Unternehmen BladeMade²⁰ gefertigt. Diese Projekte dienen als Demonstratoren dafür, wie Faserverbundstrukturen in langlebige Infrastrukturelemente überführt werden können.

Die Heterogenität der Blattgeometrien, große Bauteilquerschnitte, logistische Aufwände sowie fehlende bauordnungsrechtliche Zulassungen begrenzen allerdings einen breiten Einsatz. Re-Use ist bislang ein Nischenpfad ohne standardisierte technische Leitplanken oder stabile wirtschaftliche Grundlage. Kurzfristig können Abfallströme entlastet und der Recyclingzeitpunkt verzögert werden. Es handelt sich jedoch nicht um eine systematische Lösung für die erwarteten großen Mengen an Rotorblattabfällen (BWE 2017; EnBW 2025; Review Energy 2025; Spuziak-Salzenberg et al. 2021).

Design for Recycling – Materialinnovationen für verbesserte Recyclingfähigkeit

Zukunftsorientierte Recyclingstrategien setzen zunehmend an der Konstruktion der Rotorblätter selbst an. Neben der Weiterentwicklung bestehender Verwertungsansätze rückt zunehmend auch die Substitution konventioneller Verbundwerkstoffe durch materialseitige Innovationen, die bereits im Rotorblattdesign auf spätere Recyclingprozesse ausgerichtet sind, in den Fokus.

Biobasierte Materialien

Natürliche Fasern und Harze werden als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Verbundwerkstoffen mit dem Ziel getestet, duroplastische Rotorblattstrukturen durch besser recycelbare oder vollständig biobasierte Systeme zu ersetzen. Das österreichische Projekt „Green2Green“ entwickelte einen biobasierten Leichtbauverbund aus Hanffasern und einer auf Hanfsamenöl basierenden Harzmatrix. Die Prototypen kleiner Rotorblätter

¹⁵ <https://www.eurecomp.eu/>

¹⁶ <https://www.re-wind.info>

¹⁷ <https://bladebridge.ie>

¹⁸ Second-Life-Batterien sind Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen, die bei reduzierter Leistungsfähigkeit ausgebaut und vor dem Recycling als stationäre Energiespeicher weiterverwendet werden.

¹⁹ <https://wings-for-living.de>

²⁰ <https://blade-made.com>



erreichten ausreichende Festigkeitskennwerte und zeigten ökologische Vorteile gegenüber glasfaserverstärkten Systemen, insbesondere hinsichtlich CO₂-Fußabdruck und alternativen End-of-Life-Optionen (Nachhaltig Wirtschaften o. J.). Biobasierte Systeme eröffnen am Ende der Lebensdauer im Vergleich zu klassischen GFK/CFK-Duroplasten tendenziell zusätzliche bzw. besser geeignete Verwertungswege. Die HAW Kiel untersucht in einem neuen Projekt (2025–2027) die Verwendbarkeit von Flachfasern, Balsaholz und Paulowniaholz (Blauglockenbaum) für Rotorblätter von Kleinwindanlagen. Im Mittelpunkt steht die Prüfung der technischen Normkonformität und Einsatzfähigkeit dieser biobasierten Leichtbaukonzepte. Der technologische Reifegrad ist noch begrenzt und konzentriert sich überwiegend auf Kleinwindanlagen und materialwissenschaftliche Grundlagenforschung. Belastbare Nachweise hinsichtlich Ermüdungsverhalten, Dauerfestigkeit, Feuchtigkeitsbeständigkeit und industrieller Skalierbarkeit liegen für großdimensionierte Rotorblätter derzeit nicht vor, wodurch biobasierte Systeme gegenwärtig als langfristige Innovationspfade einzustufen sind (Altenburg 2025).

Lösliche Harze

Im Projekt „ReusaBlade“ werden für zukünftige Rotorblätter neue, lösbare Epoxidharzsysteme entwickelt, die eine werkstoffgerechte chemische Trennung (Solvolyse) von Faserverbundstoffen (GFK und CFK) und der Matrix ermöglichen. Damit sollen sortenreine Rezyklate wie Glasfasermatten, CFK-Pultrudate und Balsaholz zurückzugewonnen werden (Fraunhofer IWES o. J.; Fraunhofer WKI o. J.a und o. J.b). Parallel dazu entwickeln große Turbinenhersteller eigene Designansätze für recyclingfähige Rotorblätter. Vestas beispielsweise arbeitet

im CETEC-Verbund an einem chemischen Verfahren, mit dem konventionelle, epoxidbasierte Bestandsblätter nachträglich in einen zirkulären Stoffstrom überführt werden können (Vestas o. J.). Das Projekt „ZEBRA“ erprobt thermoplastische Harzsysteme, bei denen die Blätter auf vollständige Rezyklierbarkeit ausgelegt sind (LM Wind Power o. J.; Arkema 2023). Diese Entwicklungen markieren einen Übergang von rein nachgelagerten Verwertungsverfahren hin zu Design-for-Recycling-Ansätzen, bei denen Kreislauffähigkeit und Materialtrennbarkeit bereits im Rotorblattdesign verankert werden. Diese Ansätze befinden sich im experimentellen Stadium oder in Pilotprojekten und erfordern weitere Entwicklungsarbeiten. Weiter fortgeschritten ist Siemens mit der RecyclableBlade-Technologie im Projekt „Gamesa“ (Siemens Gamesa o. J.). Dieses setzt auf ein modifiziertes Harzsystem, das eine spätere Trennung von Fasern und Matrix in milden Säuremedien ermöglicht. Die Technologie wurde 2021 und 2022 erfolgreich getestet. Die industrielle Fertigung wurde 2022 aufgenommen. Ziel ist es, bis 2030 die Rotorblätter und bis 2040 die komplette Turbine vollständig recycelbar zu gestalten (Siemens Gamesa o. J.; Windmesse 2022).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Der Ausbau der Windenergie in Deutschland ist seit den 1980er Jahren in hohem Maße politisch gesteuert worden. Förderprogramme für Forschung und Entwicklung, Einspeisevergütungen und Ausbauziele haben dazu geführt, dass zunächst große Einzelanlagen, anschließend zunehmend standardisierte Typen und

später hochoptimierte Windparks errichtet wurden. Die aktuelle Anlagengeneration unterscheidet sich von frühen Prototypen nicht nur durch größere Nabenhöhen und deutlich längere Rotorblätter, sondern auch durch eine veränderte Materialbasis. Insbesondere der verstärkte Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen in hochbelasteten Blattbereichen steigert zwar die Energieausbeute und reduziert die Stromgestehungskosten, erhöht aber zugleich die Komplexität der Entsorgung und Verwertung. Durch die Repoweringregelungen wird eine wachsende Zahl älterer Anlagen durch neue leistungstärkere Anlagen in kurzer Zeit ersetzt. Damit ist absehbar, dass bis in die 2040er Jahre hinein erhebliche Abfallmengen an GFK und CFK aus Rotorblättern anfallen werden, weil WEA der großen Installationswellen der 1990er und 2000er Jahre das technische oder wirtschaftliche Lebensende erreichen, für die bislang nur begrenzt ausgereifte Verwertungspfade zur Verfügung stehen (Kühne et al. 2022).

Die Frage, wie Rotorblätter am Ende ihrer technischen oder wirtschaftlichen Lebensdauer behandelt werden, wird mit dem Anstieg des Rotorblattabfalls künftig an Bedeutung gewinnen. Für die Akzeptanz der Windenergie ist insofern nicht nur der Beitrag zur Energieversorgung ausschlaggebend, sondern auch, ob die entstehenden Stoffströme als vorausschauend und ressourcenschonend wahrgenommen werden.

Grenzen bestehender Verwertungsinfrastrukturen und industrielle Entwicklungsperspektiven

Auf der infrastrukturellen Ebene zeigt sich, dass die vorhandenen Verwertungskapazitäten in Deutschland und Europa die erwarteten Abfallmengen nicht bewältigen können. Ein lineares Recyclingsystem, wodurch mit einem einheitlichen Verfahren alle Rotorblattgenerationen verwertet werden können, ist aktuell technisch nicht realisierbar. Materialsysteme, Schichtaufbauten und Fertigungsverfahren veränderten sich in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach, es wurde bisher aber keine geeignete flächendeckende Recyclinginfrastruktur aufgebaut. Die Zementroute wird nur von wenigen spezialisierten Akteuren bedient. Pyrolyse und Solvolyse befinden sich überwiegend noch im Pilot- oder frühen Demonstrationsstadium. Der gezielte Aufbau leistungsfähiger Recyclinginfrastrukturen bietet Chancen für neue industrielle Wertschöpfung. Unternehmen, die sich auf hochwertige Rezyklate, spezialisierte Zerkleinerungsverfahren oder Re-Use-Anwendungen konzentrieren, könnten gezielt unterstützt werden. Politisch stellt sich hier die Frage, inwiefern Deutschland und die Europäische Union diese Entwicklungen außer durch Forschungsförderung auch wirtschaftlich mitgestalten und eine führende Rolle im Aufbau von Kreislaufstrukturen für Faserverbundwerkstoffe einnehmen. Beispielsweise könnte die Einführung einer Recyclingquote die Nachfrage nach recyceltem Material steigern und die Wirtschaftlichkeit der Verwertung verbessern (Fraunhofer IGCV 2025).

Strategische Ansatzpunkte: Re-Use, Recycling und Design for Recycling

Vor diesem Hintergrund sollte eine nachhaltige Strategie entwickelt werden, die kurzfristig handlungsfähig macht und zugleich den Übergang zu hochwertigen Kreislaufösungen systematisch vorbereitet. Der Re-Use-Ansatz kann hierbei kurzfristig als pragmatische Brückenlösung dienen, die den unmittelbaren Recyclingdruck mindert und zugleich Spielräume für Innovationen beim Material- und Bauteildesign eröffnet. Solange belastbare und skalierbare Verwertungswege für Rotorblattabfälle noch nicht flächendeckend verfügbar sind, kann die Umnutzung ganzer Blätter oder Segmente in Infrastrukturvorhaben Ressourcen schonen, indem vorhandenes Material beispielsweise in Schallschutzwänden, Fuß- und Radwegbrücken oder Stadtmobiliar eingesetzt wird. Bis 2030 rechnet das Umweltbundesamt mit relevanten Abfallmengen aus Rotorblättern von bis zu 70.000 t (Kühne et al. 2022, S. 130). Vor diesem Hintergrund könnten Bund, Länder und Kommunen prüfen, wie sich Anreize für den Einsatz rotorblattbasierter Infrastrukturen systematisch in öffentliche Bauvorhaben integrieren ließen, um Nachfrage zu bündeln, Standards zu entwickeln und eine verlässliche Zwischennutzung vorzubereiten.

Parallel dazu sollte die mittelfristige Verwertungsperspektive konsequent auf hochwertige Recyclingverfahren für Rotorblattverbunde ausgerichtet werden, insbesondere auf Pyrolyse für glasfaserverstärkte Verbunde (GFK) und Solvolyse für carbonfaserverstärkte Verbunde (CFK), und durch wirksame Investitionsanreize für industrielle Anlagen flankiert werden, damit wirtschaftlich tragfähige und skalierbare Verwertungsketten entstehen und die gebundenen Wertstoffe im Kreislauf gehalten werden. Dies gewinnt zusätzliche Bedeutung angesichts des prognostizierten Peaks im Jahr 2037, wenn das Abfallaufkommen aus Rotorblättern der frühen Anlagengeneration auf etwa 60.000 t in einem Jahr ansteigt (Kühne et al. 2022, S. 130).

Langfristig sollte Design for Recycling als strategisches Leitprinzip verankert werden, damit künftige Rotorblätter material- und konstruktionsseitig so ausgelegt, dokumentiert und standardisiert sind, dass eine hochwertige Verwertung am Lebensende technisch und wirtschaftlich leichter möglich wird. Hierbei kann auf vorhandene Forschungskompetenzen und bereits erreichte technologische Reifegrade aufgebaut werden. Entscheidend ist die Übersetzung dieses Wissens in Industriestandards sowie klare Marktsignale. Recyclingfähigkeit muss vom nachgelagerten Entsorgungsproblem zu einem expliziten Auslegungskriterium werden, das Materialwahl, Schichtaufbau und Fügetechniken mitbestimmt. Flankierend sollten Innovations- und Investitionsinstrumente so ausgestaltet werden, dass sie nicht nur Pilotlösungen fördern, sondern deren Skalierung und breite Anwendung absichern und damit die Voraussetzun-



gen schaffen, Rotorblätter künftig in hochwertige Stoffkreisläufe zu überführen (Kühne et al. 2022, S. 514).

Folgekreisläufe und regulatorische Einordnung nicht trennbarer Verbundmaterialien

Im Fall von Rotorblättern entsteht ein Spannungsfeld zwischen etablierten Bewertungs- und Regulierungslogiken und neu entstehenden Formen der Materialnutzung. Einerseits werden Hightech-Verbundwerkstoffe aus der Windenergie in zementgebundene Systeme und zunehmend in Bauprodukte oder polymerbasierte Halbzeuge eingebracht. Andererseits ist es bereits heute möglich, Material aus älteren WEA in neuen Materialkreisläufen zu nutzen, selbst wenn die ursprünglichen Verbundstrukturen nicht mehr vollständig trenn- oder rekonstruierbar sind. In solchen Fällen stoßen bestehende Definitionen von Recyclingfähigkeit an Grenzen, da sie häufig auf der Wiederherstellung klar definierter Primärmaterialien und auf lückenloser Rückverfolgbarkeit der Eingangsstoffe beruhen. Vor diesem Hintergrund stellt sich weniger die Frage, ob diese Folgeprodukte den Anforderungen bestehender Normen entsprechen, sondern vielmehr, ob und unter welchen Voraussetzungen künftig für nicht trennbare Faserverbundstoffe eigenständige Folgekreisläufe anerkannt werden können. Beispiele wie der Holzwerkstoff German Compact Composite (GCC) des Unternehmens Novo-Tech verdeutlichen, dass aus Rotorblattmaterialien Produkte entstehen können, die in einem neuen Nutzungskontext vollständig wiedereinsatzbar und ihrerseits recyclingfähig sind, auch wenn eine Rückführung in den ursprünglichen Werkstoffkreislauf nicht mehr möglich ist (Lorenz-Meyer 2023). Damit eröffnet sich ein politischer Gestaltungsraum, in dem Kreislauffähigkeit nicht ausschließlich als Rückführung zum Ursprungsprodukt verstanden wird, sondern auch als qualifizierter zweiter Lebensstart in einem nachgelagerten, funktional geschlossenen Materialkreislauf.

Transparenz, Datenverfügbarkeit und Informationsinstrumente

Konkret bedeutet dies eine Übergangsphase, in der alte und neue Technologiestände nebeneinander existieren und politische Erwartungen an kurzfristig verfügbare Lösungen mit den realen Zeithorizonten schrittweiser technologischer Lern- und Skalierungsprozesse in Einklang gebracht werden müssen. Gerade in dieser Phase wird Transparenz zum entscheidenden Steuerungshebel. Digitale Produktpässe und erweiterte Umweltproduktdeklarationen werden derzeit als Instrumente diskutiert, um Materialherkünfte, Inhaltsstoffe und Umweltwirkungen über den Lebenszyklus hinweg transparenter abzubilden. Insbesondere für ältere Rotorblätter ist dieser Ansatz jedoch eng mit der Frage verknüpft, inwieweit belastbare Informationen zu Materialzusammensetzung und bautechnischen Daten verfügbar sind. Ergänzend zu Kennzeichnung und digitalen Produktpässen könnte daher auch geprüft werden, inwieweit bestehende Register, wie das von der Bundesnetzagentur geführte Marktstammdatenregister (MaStR), in dem grundlegende Stammdaten zu Energieanlagen und Betreibern erfasst werden, um zusätzliche Angaben wie Anlagentypen oder Materialkomponenten erweitert werden können, um Rückbau- und Stoffstromplanungen zu unterstützen (Fachagentur Wind und Solar 2023).

Verantwortlichkeiten, Kostenverteilung und ordnungsrechtliche Steuerungsoptionen

Weitere politische Relevanz des Themas ergibt sich zudem aus der Verteilung von Verantwortlichkeiten und finanziellen Lasten entlang der Wertschöpfungskette. Rückbau und Verwertung von WEA verursachen erhebliche Kosten, die mit steigenden Rückbaumengen weiter an Bedeutung gewinnen. Vor dem Hintergrund stellt sich die Frage, wie die Entsorgung langfristig organisiert und finanziert werden soll. Es wird diskutiert, ob neben einer Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber und die von ihnen beauftragten Entsorgungsunternehmen eine weitergehende Präzisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Entsorgung und Behandlung von Rotorblattabfällen sinnvoll sein kann, um den Umgang mit komplexen Verbundmaterialien klarer zu fassen. Es könnte außerdem geprüft werden, inwieweit bestehende Instrumente der Entsorgungsüberwachung und Nachweisführung ausreichend sind, um die Einhaltung einschlägiger Vorgaben und Standards entlang der Entsorgungs- und Verwertungskette zu überprüfen (Kühne et al. 2022).

Gestaltungsaufgaben und strategische Bedeutung der Rotorblattverwertung

Politischer Handlungsbedarf ergibt sich insofern auf mehreren Ebenen. Kurzfristig stellt die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für den Rückbau der in den nächsten 10 bis 15 Jahren anfallenden Rotorblattgenerationen eine zentrale Aufgabe dar. Dazu gehört die Klärung von Verantwortlichkeiten, die Prüfung

abfall- und baurechtlicher Vorgaben für den Einsatz wiederverwendeter oder recycelter Materialien sowie die Einführung wirtschaftlicher Anreize für den Bau mechanischer Aufbereitungsanlagen oder modellhafter Projekte zur werkstofflichen, energetischen und chemischen Verwertung. Mittelfristig gilt es, Forschungs- und Demonstrationsprogramme so auszurichten, dass Pyrolyse, Solvolyse und Design-for-Recycling-Verfahren vom Pilotmaßstab in eine industrielle Anwendung überführt werden können. Langfristig ist die Weiterentwicklung von Instrumenten wie digitalen Produktpässen, erweiterten Umweltproduktdeklarationen und lebenszyklusorientierten Normen zentral, um sicherzustellen, dass zukünftige Rotorblätter von Beginn an als Bauteile in einer zirkulären Wirtschaftsweise konzipiert werden.

Die Auseinandersetzung mit der Wiederverwertung und Entsorgung von Rotorblättern öffnet den Möglichkeitsraum, Umwelt-, Innovations- und Industriepolitik stärker zu verzahnen und die Transformation des Energiesystems mit einer vorausschauenden Ressourcen- und Kreislaufpolitik zu verbinden. In diesem Sinne ist die Frage, wie die nächste Generation von Rotorblättern gestaltet, genutzt und am Ende verwertet wird, nicht nur ein technisches Detail der Abfallwirtschaft, sondern ein Gradmesser dafür, inwieweit die Energiewende langfristig mit tragfähigen kreislaufwirtschaftlichen Strukturen unterlegt werden kann.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Recycling und Re-Use von Windenergieanlagen sind ein dynamisches Themenfeld, das über den Umgang mit Rotorblattabfällen hinaus grundlegende Aspekte der Ressourcenpolitik, der technischen Standardisierung und einer langfristig kreislauffähigen Energieinfrastruktur berührt (Beauson et al. 2022). Zunehmend rückt dabei der Ansatz Design for Recycling in den Mittelpunkt, weil Materialwahl und Konstruktion bereits in der Designphase darüber entscheiden, welche Recyclingpfade, Stoffqualitäten und Umweltwirkungen am Lebensende überhaupt möglich sind. Für Rotorblätter zeichnen sich dazu mehrere Innovationslinien ab, darunter biobasierte Verbundwerkstoffe sowie Harzsysteme, die eine spätere Trennung von Fasern und Matrix erleichtern oder erst ermöglichen. Diese Ansätze sind jedoch in weiten Teilen noch nicht ausgereift und werfen Fragen zur technischen Reife, Normkonformität, Skalierbarkeit und Ökobilanz auf. Ähnliche Herausforderungen entstehen im Bereich Solar und Photovoltaik, weil künftig große Abfallmengen anfallen und die Trennung der Verbundstrukturen in Glas, Polymere, Silizium und Metalle technisch anspruchsvoll bleibt (Peters et al. 2024; Schoden et al. 2021). Recyclingorientierte Entwicklungspfade für eine hochwertigere Rückgewinnung machen aber zugleich deutlich, dass die Prozessfähigkeit stark von Designentscheidungen abhängt, etwa von Verkapselung, Klebstoffen und Demontierbarkeit. Daraus folgt, dass ökologische Potenziale besonders dann

erschlossen werden können, wenn Recyclingfähigkeit systematisch im Produktdesign verankert wird. Vor diesem Hintergrund bietet sich ein TA-Kompakt an, das zentrale Innovationspfade, Umsetzungstreiber und Barrieren des Designs for Recycling bei Rotorblättern und Photovoltaik aufbereitet, den Stand der Technik bewertet und daraus Handlungsoptionen für Standards, Förderung und Regulierung ableitet.

Literatur

- 320° (2018): Keine vollständige Zerstörung von CFK-Fasern. <https://320grad.de/2018/06/25/keine-vollstaendige-zerstoe-rung-von-cfk-fasern/> (16.12.2025)
- AERO International (o. J.): Gefahr für die Müllverbrennung – Recycling-Firmen kämpfen mit Carbon. <https://www.aero-international.de/aviation/gefahr-fuer-die-muellverbrennung-recycling-firmen-kaempfen-mit-carbon.html> (15.12.2025)
- Altenburg, S. (2025): Rotorblätter aus Naturfasern: HAW Kiel entwickelt nachhaltige Alternative für Kleinwindanlagen. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Kiel, <https://www.haw-kiel.de/news/rotorblaetter-aus-naturfasern-haw-kiel-entwickelt-nachhaltige-alternative-fuer-kleinwindanlagen/> (13.1.2026)
- Arkema (2023): ZEBRA consortium unveils second recyclable wind turbine blade, advances sustainability in wind energy. <https://www.arkema.com/global/en/media/new-slist/news/global/corporate/2023/20231220-zebra-unveils-second-recyclable-wind-turbine-blade/> (4.2.2026)
- BayernLB Research (2022): Repowering. Der Booster für die Windkraft. Bayerische Landesbank, München
- BDEW (2022): Höher, stärker, weiter: Windkraft von den Anfängen bis heute. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., <https://www.bdew.de/online-magazin-zwei-tausend50/generation/hoeher-staerker-weiter-windkraft-von-den-anfaengen-bis-heute/> (13.1.2026)
- Beauson, J. et al. (2022): The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 155, Art. 111847, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847>
- Benz, S.; Wegner, N. (2023): Praxishilfe zum Repowering in der Regional- und Kommunalplanung. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n106833de> (13.1.2026)

- Bernhardt, J. (2013): Windenergienutzung in Deutschland. Historische Entwicklung, politische Rahmenbedingungen, ausgewählte Akteure und Konflikte. In: Engels, A.: Global Transformations towards a Low Carbon Society. Working Paper Series No. 8, Hamburg
- Branfoot, C. et al. (2023): Recovery of chemical recyclates from fibre-reinforced composites. A review of progress. In: Polymer Degradation and Stability 215, Art. 110447, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110447>
- BWE (o. J.): Energiepolitik in Deutschland. Auf dem Weg zu einer ganzheitlichen Energiewende. Bundesverband WindEnergie e. V., <https://www.wind-energie.de/themen/politische-arbeit/eeg/> (13.1.2026)
- BWE (2017): Möglichkeiten des Recyclings von Rotorblättern. Bundesverband WindEnergie e. V., Berlin
- BWE (2023): Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Informationspapier, Bundesverband WindEnergie e. V., Berlin
- Deutsche WindGuard GmbH (2020): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. Jahr 2019. Bundesverband WindEnergie e. V.; VDMA Power Systems, Varel
- Durstewitz, M.; Hahn, B. (2004): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramme (WMEP) zum Breitentest „250 MW Wind“. (Autor/in: Hoppe-Kilpper, M.) Institut für Solare Energieversorgungstechnik e. V., Kassel
- EnBW (2025): Recycling von Windrädern. Energie Baden-Württemberg AG, <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/windkraft/windrad-recycling.html#recyclingkonzepte> (13.1.2026)
- Energy Transition Alliance (2021): Sustainable Decommissioning. Wind Turbine Blade Recycling. Report from Phase 1 of the Energy Transition Alliance Blade Recycling Project. o. O.
- Fachagentur Wind und Solar (2023): Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Rueckbau/FA_Wind_Solar_Rueckbau-und-Recycling-von-WEA.pdf (4.2.2026)
- Fraunhofer IFAM (2023): Pyrolyseverfahren versprechen nachhaltiges Recycling von Faserverbundwerkstoffen aus Rotorblättern, <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/pyrolyseverfahren-versprechen-nachhaltiges-recycling-von-faserverbundwerkstoffen-aus-rotorblaettern.html> (12.1.2026)
- Fraunhofer IGCV (2025): Recycling-Potential von Windenergieanlagen. https://www.igcv.fraunhofer.de/de/presse_downloads/pressemitteilungen/recycling-potential-von-windenergieanlagen-.html (13.1.2026)
- Fraunhofer IGP (o. J.): SolvoCycle – Entwicklung einer Solvolyse-Anlage zur Zerlegung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe. <https://www.igp.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/faserverbundtechnik/solvocycle.html> (12.1.2026)
- Fraunhofer IWES (o. J.): ReusaBlade: Recyclingfähige Materialien für Rotorblätter und deren Wiederverwertung. <https://www.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/reusablade.html> (12.1.2026)
- Fraunhofer IWES (2025): Aufwändig, aber lösbar: Forschung zum Recycling. <https://websites.fraunhofer.de/iwes-blog/aufwaendig-aber-loesbar-forschungsprojekte-zum-recycling-von-rotorblaettern-am-fraunhofer-iwes/niels-ludwig> (4.2.2026)
- Fraunhofer WKI (o. J.a): RE_SORT: Nachhaltiges und wirtschaftliches Recycling von Windkraft-Rotorblättern mittels Pyrolyse der Faserverbundwerkstoffe. <https://www.wki.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2023/re-sort-windkraft-rotorblatt-recycling-mittels-faserverbundkunststoff-pyrolyse.html> (13.1.2026)
- Fraunhofer WKI (o. J.b): ReusaBlade: Recyclingfähige Windkraft-Rotorblätter mittels lösbarer Harzsysteme und Wiederverwertung der sortenrein getrennten Rezyklatmaterialien. <https://www.wki.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2023/reusablade-recyclingfaehige-windkraft-rotorblaetter-mittels-loesbarer-harzsysteme.html> (13.1.2026)
- Gopalraj, S. K.; Kärki, T. (2020): A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites. Fibre recovery, properties and life-cycle analysis. In: SN Applied Sciences 2, Art. 433, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
- h_da (o. J.): Forschungsprojekt power*stage. Hochschule Darmstadt, <https://fba.h-da.de/forschungsprojekt-powerstage/> (13.1.2026)
- Holcim (o. J.): Zementwerk Lägerdorf. Holcim (Deutschland) GmbH, <https://www.holcim.de/standorte/zementwerk/laegerdorf> (12.1.2026)

- Hoppe-Kilpper, M. (2003): Entwicklung der Windenergie-technik in Deutschland und der Einfluss staatlicher Förderpolitik. Technikentwicklung in den 90er Jahren zwischen Markt und Forschungsförderung. Dissertation, <https://d-nb.info/968798284/34> (13.1.2026)
- ILK (2022): EuReComp – Forschung für die Kreislaufwirtschaft von GFK und CFK Wertstoffen. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilk/das-institut/news/eurecomp-forschung-fuer-die-kreislaufwirtschaft-von-gfk-und-cfk-wertstoffen> (12.1.2026)
- Kühne, C. et al. (2022): Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Aufbereitung von Rotorblättern. Umweltbundesamt, Texte 92/2022, Dessau-Roßlau
- Lange, M. (2018): Herausforderungen GFK-Recycling. Fachaustausch Bremen und Sieben. Fachagentur Wind und Solar, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veranstaltungen/2018/2018-09-04_Fachaustausch_Brechen_und_Sieben/FA-Wind_Vortrag_Brechen_Sieben_Lange_2018-09-04.pdf (13.1.2026)
- LM Wind Power (o. J.): ZEBRA project achieves key milestone with first prototype of recyclable blade. <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-achieves-key-milestone-with-first-prototype-of-recyclable-blade> (12.1.2026)
- Lorenz-Meyer, A. (2023): Recyceln statt verbrennen. Rotorblätter von Windenergieanlagen in der Kreislaufwirtschaft. In: Zeitung für kommunale Wirtschaft 12, S. 28
- Ludwig, N.; Czichon, S. (2022): KoReNaRo. Umfassendes Konzept für Recycling und Nachnutzung von Rotorblättern aus Kunststoffverbundmaterialien. Fraunhofer IWES, Bremerhaven
- Milke, M.; Fuhrmann, S. (2024): Ein Überblick zum Recycling und zur Verwertung glasfaserverstärkter Kunststoffe. In: Chemie Ingenieur Technik 96(7), S. 902–912, <https://doi.org/10.1002/cite.202300202>
- Nachhaltig Wirtschaften (o. J.): Green2Green. Projektbeschreibung und Ergebnisse. <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/projekte/green2green.php> (15.12.2025)
- Nehlsen AG (2020): neocomp GmbH – eine weitere Lösung in der Welt der Entsorgung. <https://generation.nehlsen.com/2020/11/27/neocomp-gmbh-eine-weitere-loesung-in-der-welt-der-entsorgung/> (13.1.2026)
- Neowa GmbH (2021): GFK-Verwertung. Verwertung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) / Rotorblättern. Potsdam, https://windenergetage.de/2021/wp-content/uploads/sites/6/2021/11/007-GFK_Verwertung_neowa.pdf (13.1.2026)
- Novo-Tech (2023): Werkstoffnahe Produktentwicklung aus Rotorblättern. Novo-Tech Circular GmbH & Co. KG, Aschersleben
- Ørsted Deutschland (o. J.): Windräder-Recycling. Rotorblätter aus GFK. <https://energiewinde.orsted.de/energiewirtschaft/recycling-windraeder-rotorblaetter-gfk> (15.12.2025)
- Ørsted Deutschland (2023): Rückenwind für die Kreislaufwirtschaft. <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/windraeder-recycling-rotorblaetter-novo-tech-terrassendiele-cradle-2-cradle> (13.1.2026)
- Palla, D. (2025): Projekt Carbon2Business am Zementwerk Lägerdorf startet. EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/projekt-carbon2business-am-zementwerk-laegerdorf-startet-030925/> (13.1.2026)
- Peters, I. M. et al. (2024): Cradle-to-cradle recycling in terawatt photovoltaics: A vision of perpetual utility. In: Joule 8, S. 899–912, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.025>
- Quicker, P. (2017): Thermische Behandlung von faserverstärkten Kunststoffen. In: Energie aus Abfall 14, S. 41–60
- Ramaswamy, N. et al. (2025): Repurposing decommissioned wind turbine blades. A circular economy approach to sustainable resource management and infrastructure innovation. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 215, Art. 115629, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115629>
- Rechsteiner, F. (2024): Rotorblätter als Problemabfall. In: r.energy : erneuerbare Energien und Digitalisierung, S. 14–15
- Reckter, B. (2018): Gerettet? Recycling von faserverstärkten Kunststoffen. VDI Nachrichten, <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/gerettet-recycling-von-faserverstaerkten-kunststoffen/> (12.1.2026)
- Recycling Magazin (2021): Eurecum zerschneidet Rotorblätter. <https://www.recyclingmagazin.de/2021/01/12/eurecum-zerschneidet-rotorblaetter/> (13.1.2026)

- ReFresh Project (2025a): Wind turbine blade made from recycled materials. <https://refresh-project.eu/2025/11/wind-turbine-blade-made-from-recycled-materials/> (13.1.2026)
- ReFresh Project (2025b): WindEurope: No blade left behind. <https://refresh-project.eu/2025/07/no-blade-left-behind/> (13.1.2026)
- Review Energy (2025): Europe faces critical crossroads in wind turbine blade recycling. <https://www.review-energy.com/eolico/europe-faces-critical-crossroads-in-wind-turbine-blade-recycling> (13.1.2026)
- Rosenkranz, G. et al. (2020): Klimaneutrales Stromsystem 2030. Onshore-Windenergie: Sofortprogramm für den beschleunigten Ausbau. Agora Energiewende, Berlin
- RWTH (o. J.): Blades2Build. Wiederverwendung von Rotorblättern. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, <https://www.rwth-aachen.de/cms/root/forschung/projekte/eu-projekte/eu-projekte-in-horizon-europe/~bflqcb/blades2build/?lidx=1> (15.12.2025)
- Schoden, F. et al. (2021): Review of State of the Art Recycling Methods in the Context of Dye Sensitized Solar Cells. In: *Energies* 14(13), Art. 3741, <https://doi.org/10.3390/en14133741>
- Schönfeldt, M. et al. (2024): Recycling von Selten-Erd-Permanentmagneten für eine resiliente und nachhaltige Energie- und Mobilitätswende. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 74(4), S. 64–66
- Siemens Gamesa (o. J.): RecyclableBlade. Siemens Gamesa Renewable Energy <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/explore/journal/recyclable-blade.html> (12.1.2026)
- Spuziak-Salzenberg, D. et al. (2021): Quo vadis Stoffströme. Die Wege des Rückbaus sind (un)ergründlich. Potsdam
- Spuziak-Salzenberg, D. et al. (2024): Aktuelle Trends beim Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen, In: *Fachzeitschrift Müll und Abfall* 10, S. 544–553, <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.10.03>
- Stienemann, J. et al. (2024): Hochleistungsfähige Tapes aus recycelten Carbonfasern für den Leichtbau. CO₂-Reduktion durch hochwertige Recyclingprozesse und Materialien. Fraunhofer IGC, <https://doi.org/10.24406/publica-2975>
- Trede, F. (2025): Rotorblätter zu Fahrradrahmen? In: *Bauernzeitung*, S. 26–27
- TU Dresden (o. J.): SOLV-CFK. Chemisches Recycling von kohlefaserverstärkten Kunststoffkompositen mittels Solvolyse. Technische Universität Dresden, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/cvt/forschung/forschungsprojekte-1/solv-cfk> (13.1.2026)
- Tyurkay, A. et al. (2024): State-of-the-art circular economy practices for end-of-life wind turbine blades for use in the construction industry. In: *Sustainable Production and Consumption* 47, S. 17–36, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.018>
- UBA (o. J.): Rotorblattaufbereitung und Recycling von Faserverbundwerkstoffen. Umweltbundesamt, aktualisiert 26.9.2022, <https://www.uba.de/n98129de> (13.1.2026)
- Vestas (o. J.): Zero-Waste. <https://www.vestas.de/de-de/Nachhaltigkeit/environment/zero-waste> (4.2.2026)
- WAB e. V. (2019): Europaweit einzigartiges Verwertungsverfahren für Rotorblätter. <https://www.wab.net/aktuelles/news/detailseite/europaweit-einzigartiges-verwertungsverfahren-fuer-rotorblaetter/> (13.1.2026)
- WAB e. V. (2023): Pyrolyseverfahren versprechen nachhaltiges Recycling von Faserverbundwerkstoffen aus Rotorblättern. <https://www.wab.net/aktuelles/news/detailseite/pyrolyseverfahren-versprechen-nachhaltiges-recycling-von-faserverbundwerkstoffen-aus-rotorblaettern/?utm> (13.1.2026)
- WD (2018): Zur Ökobilanz der Windenergietechnologie unter Berücksichtigung Seltener Erden. Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, WD 8 - 3000 - 010/18, Berlin
- WD (2020): Windenergieanlagen. Rückbau, Recycling und Ökobilanzierung. Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, WD 8 - 028/20, Berlin
- WDR (2025): Sitzmöbel aus Windrädern. Aachener Unternehmen recycelt Rotorblätter. Westdeutscher Rundfunk, <https://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/sitzmoebel-aus-windraedern-aachen-100.html> (13.1.2026)
- Wildermuth, J. (2025): Erneuerbare Energie: Windkraftträder erstmals komplett recycelbar. Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunk.de/erneuerbare-energie-windkraft-raeder-erstmals-komplett-recycelbar-100.html> (16.12.2025)

- Windindustrie in Deutschland (2022): Rotorblattverwertung von A bis Z. <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/meldungen/rotorblattverwertung-von-a-bis-z> (12.1.2026)
- Windindustrie in Deutschland (2023): KIT untersucht neue Methoden zum Recycling von Rotorblättern. <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/meldungen/kit-untersucht-neue-methoden-zum-recycling-von-rotorblaettern> (12.1.2026)
- Windmesse (2022): Die Kreislaufwirtschaft kommt: Siemens Gamesa präsentiert das RecyclableBlade für Onshore-Windkraftprojekte. <https://w3.windmesse.de/wind-energie/pm/42060-siemens-gamesa-kreislaufwirtschaft-onshore-turbine-windkraftanlage-recycling-rotorblatt-recyclableblade-offshore> (13.1.2026)
- WiWo (2021): Recycling-Firmen kämpfen mit dem Hightech-Kunststoff Carbon. Wirtschaftswoche, <https://www.wiwo.de/technologie/umwelt/gefahr-fuer-die-muellverbrennung-recycling-firmen-kaempfen-mit-dem-hightech-kunststoff-carbon/27562688.html> (13.1.2026)
- Wolf, K. (2024): Auf der Zielgeraden? In: Erneuerbare Energien 7, <https://www.erneuerbareenergien.de/special/auf-der-zielgeraden> (12.1.2026)
- Yang, Y. et al. (2017): REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap. A Critical Review. In: Journal of Sustainable Metallurgy 3(1), S. 122–149, <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>

Herausgeber

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)

Bildnachweise

Anski/iStock (S. 1); Andreas Nesslinge/iStock (S. 4);
kmingww/iStock (S. 7); 00Mate00/iStock (S. 9)

ISSN: 2629-2874

DOI: 10.5445/IR/1000191044

Horizon SCANNING

Das Horizon-Scanning ist Teil der Foresight-Aktivitäten des TAB und wird vom Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH durchgeführt.

www.tab-beim-bundestag.de/horizon-scanning