FACHAGENTUR
WIND UND SOLAR

Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen – ein Überblick

Windenergietage Potsdam

Claudia Bredemann

13. November 2025

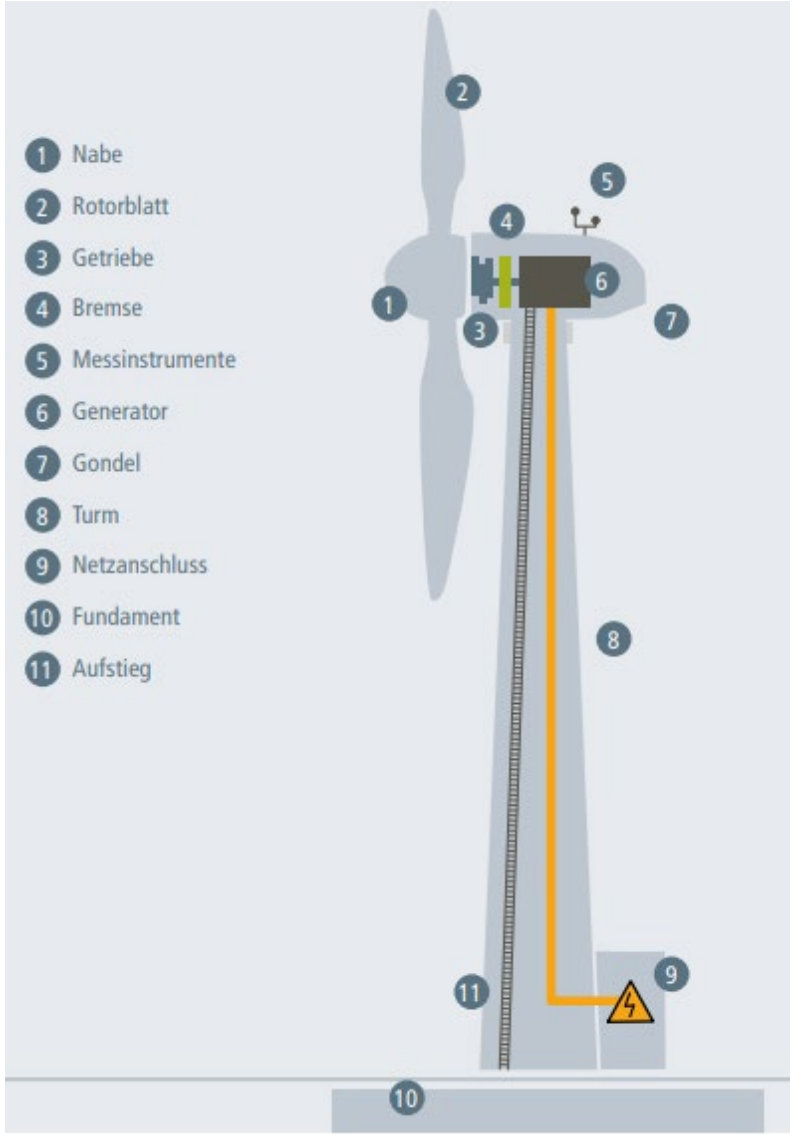
Agenda

1. Einführung
   - Abfallhierarchie
   - Anteile
   - Rechtliche Rahmenbedingungen
2. Rückbau und Recycling in der Praxis
   - Türme
   - Fundamente
   - Rotoren
   - Sonstige Bestandteile
4. Fazit / Ausblick

Einführung

- 30. Juni 2025: bundesweit 28.925 WEA mit 65,3 GW in Betrieb
- etwa die Hälfte älter als 15 Jahre, etwa ein Drittel älter als 20 Jahre
- seit 2020: auslaufende Förderung, z. T. Weiterbetrieb
- in den nächsten Jahren Rückbau tausender Altanlagen
- unstrittig ist, dass mehr als 90% der Materialien recyclebar bzw. verwertbar sind*

  - Was heißt das konkret?
  - Was passiert mit dem Rest?
  - Wie sieht die Zukunft aus?

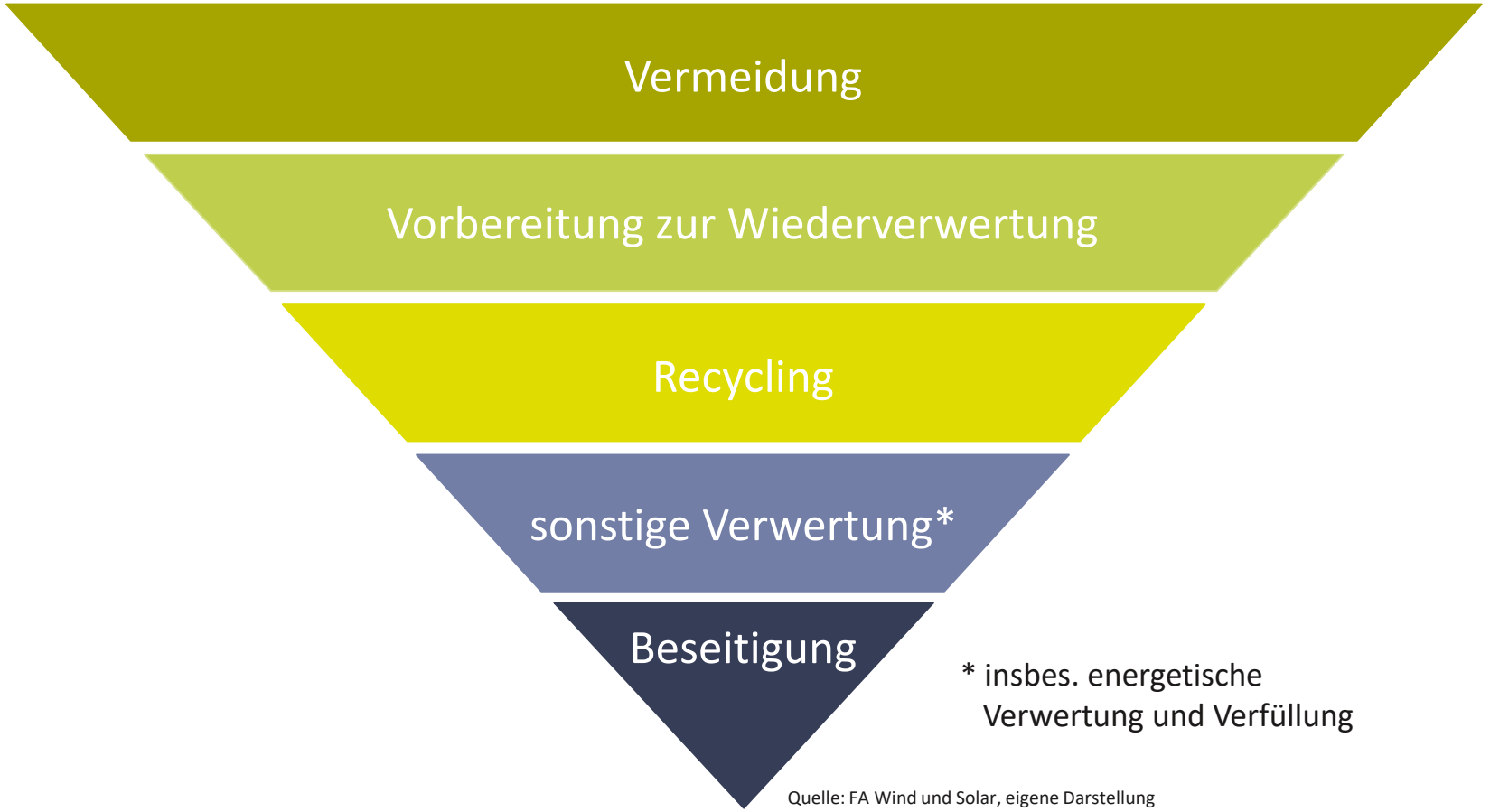


Quelle: FA Wind und Solar, eigene Darstellung

* Siehe u. a. www.umweltbundesamt.de

Abfallhierarchie

Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)



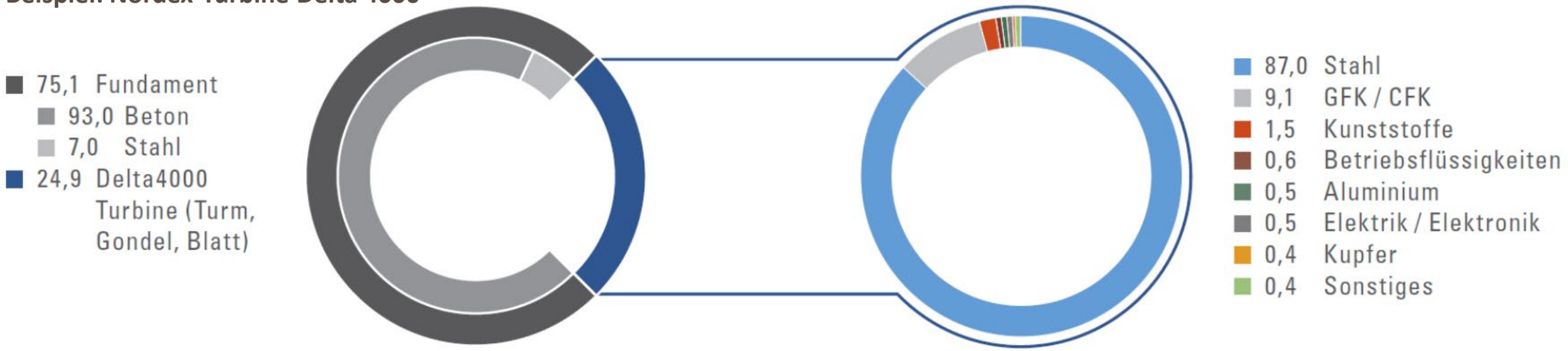
* insbes. energetische Verwertung und Verfüllung

Quelle: FA Wind und Solar, eigene Darstellung

Anteile am Gesamtgewicht einer WEA

- Beton: 60 – 70 %
- Stahl: 30 – 35 %
- Verbundmaterialien: 2 – 3 %
- Elektrik-Komponenten, Kupfer, Aluminium, PVC, Betriebsflüssigkeiten: jeweils < 1 %

Beispiel: Nordex-Turbine Delta 4000



Quelle: Schelenz 2024

Exkurs: rechtliche Rahmenbedingungen

Eine allgemeine bundesrechtliche Rückbaupflicht für WEA gibt es bislang nicht, aber:

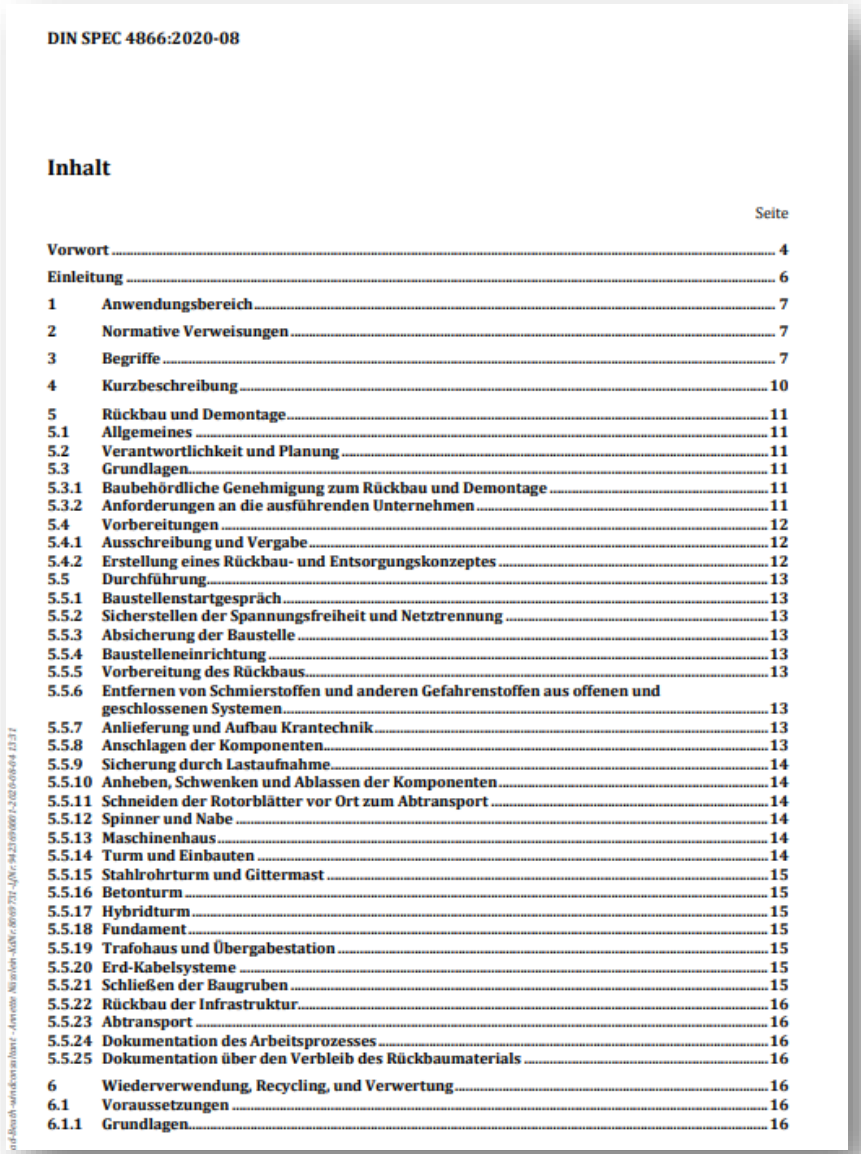
- WEA sind „bauliche Anlagen“ i. S. des Baurechts – Betreiber ist nach Stilllegung zu geordnetem Rückbau und zu fachgerechter Entsorgung der Komponenten verpflichtet (§ 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB)
- seit 2004: Verpflichtungserklärung zum Rückbau als ergänzende Zulässigkeitsvoraussetzung
- Sicherheitsleistung gefordert – Höhe / Berechnung und Art nicht bundeseinheitlich geregelt
- WEA vor 2004: evtl. städtebauliche Verträge, Beseitigungsermächtigungen der Landesbauordnungen
- rechtliche Nachsorgepflicht: Wiederherstellung des „ordnungsgemäßen Zustandes“ des Anlagengrundstücks muss nach Rückbau gewährleistet sein (§ 5 (3) Nr. 3 BImSchG)
- Rückbaupflicht im Wege des Repowerings (§ 16b Abs. 2 BImSchG)

© TPHeinz, pixabay

Schaffung einer Handlungsanweisung

DIN SPEC 4866

- 8/2020: DIN SPEC 4866 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von WEA“
- entstand auf Initiative der RDR Wind e. V. – Industrievereinigung für Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen
- Empfehlungen für den geordneten Rückbauprozess
- Überführung in DIN kurz vor dem Abschluss – Entwurf der DIN 4866 „Abbruch und Rückbau von Windenergieanlagen“ liegt vor



DIN SPEC 4866:2020-08

Inhalt

Seite

Vorwort ... 4
Einleitung ... 6
1 Anwendungsbereich ... 7
2 Normative Verweisungen ... 7
3 Begriffe ... 7
4 Kurzbeschreibung ... 10
5 Rückbau und Demontage ... 11
5.1 Allgemeines ... 11
5.2 Verantwortlichkeit und Planung ... 11
5.3 Grundlagen ... 11
5.3.1 Baubehördliche Genehmigung zum Rückbau und Demontage ... 11
5.3.2 Anforderungen an die ausführenden Unternehmen ... 11
5.4 Vorbereitungen ... 12
5.4.1 Ausschreibung und Vergabe ... 12
5.4.2 Erstellung eines Rückbau- und Entsorgungskonzeptes ... 12
5.5 Durchführung ... 13
5.5.1 Baustellenstartgespräch ... 13
5.5.2 Sicherstellen der Spannungsfreiheit und Netztrennung ... 13
5.5.3 Absicherung der Baustelle ... 13
5.5.4 Baustelleneinrichtung ... 13
5.5.5 Vorbereitung des Rückbaus ... 13
5.5.6 Entfernen von Schmierstoffen und anderen Gefahrenstoffen aus offenen und geschlossenen Systemen ... 13
5.5.7 Anlieferung und Aufbau Krantechnik ... 13
5.5.8 Anschlagen der Komponenten ... 13
5.5.9 Sicherung durch Lastaufnahme ... 14
5.5.10 Anheben, Schwenken und Ablassen der Komponenten ... 14
5.5.11 Schneiden der Rotorblätter vor Ort zum Abtransport ... 14
5.5.12 Spinner und Nabe ... 14
5.5.13 Maschinenhaus ... 14
5.5.14 Turm und Einbauten ... 14
5.5.15 Stahlrohrturm und Gittermast ... 15
5.5.16 Betonturm ... 15
5.5.17 Hybridturm ... 15
5.5.18 Fundament ... 15
5.5.19 Trafohaus und Übergabestation ... 15
5.5.20 Erd-Kabelsysteme ... 15
5.5.21 Schließen der Baugruben ... 15
5.5.22 Rückbau der Infrastruktur ... 16
5.5.23 Abtransport ... 16
5.5.24 Dokumentation des Arbeitsprozesses ... 16
5.5.25 Dokumentation über den Verbleib des Rückbaumaterials ... 16
6 Wiederverwendung, Recycling, und Verwertung ... 16
6.1 Voraussetzungen ... 16
6.1.1 Grundlagen ... 16

Rückbau und Recycling in der Praxis

Second Life

- Abbau und Weiterverwendung ganzer WEA oder von Komponenten an anderem Ort
- Anteil bis zu 50 Prozent
- z. B. über Online-Plattformen wie wind-turbine.com oder Trusted Networks
- bevorzugt kleinere Anlagen, bei großen WEA logistisch schwierig
- Absatzmärkte: Europa, Indien, Thailand, Afrika, Mittel- und Südamerika

Weltweite Verteilung der Käufer gebrauchter WEA

Türme

Stahl- / Gittertürme

- sequenzieller Rückbau: mechanische Demontage und Herabbringen mittels Kran
- Zerschneiden in transportable Segmente
- Verwendung als Rohstoff für die Stahlproduktion

(Stahl-)Betontürme

- i.d.R. schrittweise Demontage, selten Abriss oder Sprengung
- Trennung von Beton und Stahl
- Stahl: Verwendung als Rohstoff für die Stahlproduktion
- Beton: Zerkleinerung vor Ort, Verwendung z. B. als Schotter für Wegebau vor Ort, als Rohstoff für Recyclingbetone

Quelle: Hagedorn Service GmbH

Fundamente

Flachgründung

- vollständiger Rückbau unproblematisch
- Zerkleinerung mittels Brecher und Trennung von Beton und Stahl
- Stahl: Verwendung als Rohstoff für die Stahlproduktion
- Beton: Wiedereinbau vor Ort, Verwendung als Rohstoff für Recyclingbetone

Pfahlgründung

- grundsätzlich ebenfalls Pflicht zum kompletten Rückbau
- vollständige Beseitigung nicht immer sinnvoll, da oft erheblicher Eingriff in die Bodenstruktur
- unterschiedliche Handhabung – Einzelfallentscheidung

Quelle: EnergieAgentur NRW

Rotoren

- etwa zwei Drittel faserverstärkte Kunststoffe, ein Drittel Harze, Klebstoffe, Balsaholz als Kernmaterial
- ältere Modelle (vor 2010): nur glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), zunehmend Hybridmodelle mit Anteilen von carbonfaser-verstärktem Kunststoff (CFK)
- Deponierung wg. des organischen Anteils (Harze) nicht zulässig
- Demontage und Zerlegung vor Ort mit möglichst wenigen Schnitten, Abtransport und weitere Zerlegung
- Wichtig: Identifizierung der Bestandteile und Trennung von GFK und CFK

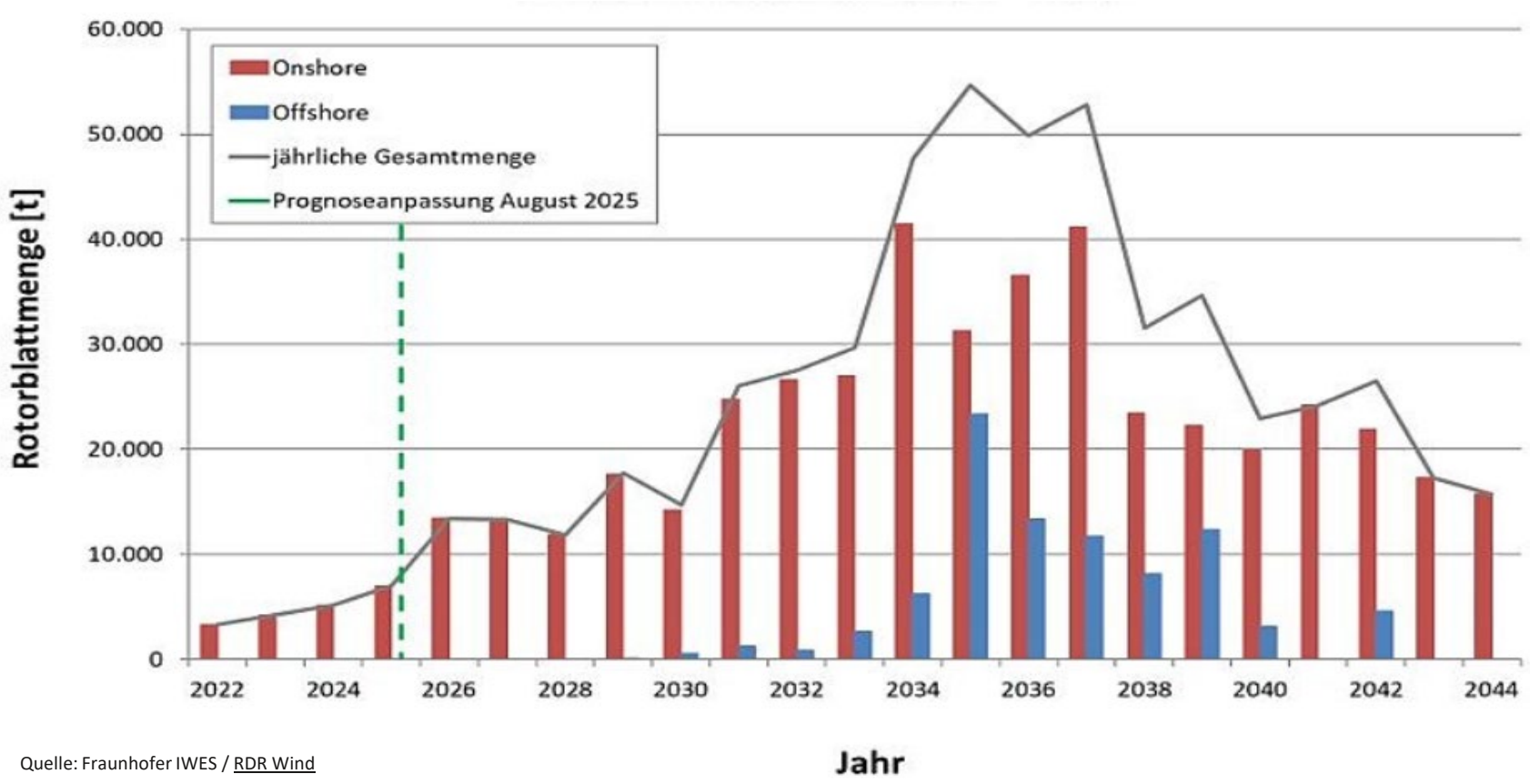
Quelle: Hagedorn Service GmbH

Rotoren

GFK-Verwertung

- „Zementroute“: thermische Verwertung, stoffliche Verwertung der Reststoffe als Zuschlag für die Zement-Industrie
- Epoxidharz und Bindemittel: energetische Verwertung bzw. Verbrennung
- alternativ: Verarbeitung zu WPC-Produkten (Terrassen-dielen o. ä.) oder Verwendung als konstruktive Bauelemente (Schallschutz, Designermöbel)

Prognose: anfallende Massen an Rotorblättern – GFK



Quelle: Fraunhofer IWES / RDR Wind

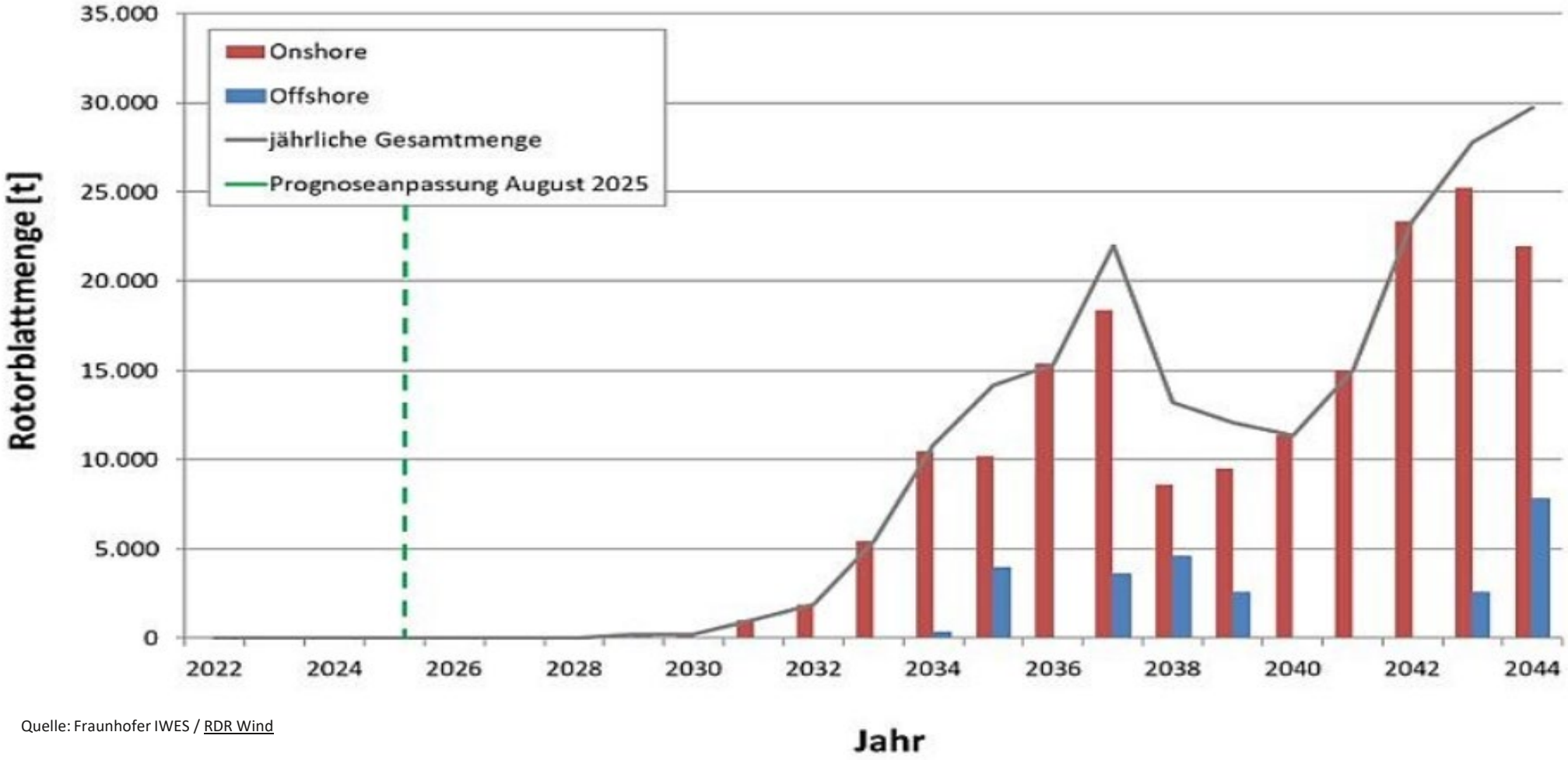
Rotoren

CFK-Verwertung

- „thermische Verwertung“ (wie GFK) problematisch wg. elektro-statischer Filter
- Recycling mittels thermischer **Pyrolyse** hat sich technisch etabliert:
  - thermisches Verfahren, bei dem Materialien ohne Sauerstoff stark erhitzt werden (ca. 400-700°C)
  - Material verbrennt ohne Sauerstoff nicht, sondern zersetzt sich chemisch
  - CFK: zerfällt in Kohlenstofffasern, Gase und Öle – Fasern können wiederverwendet werden
- Herstellung von Carbon-Pellets zur Weiterverarbeitung
- selten **Solvolyse** (chemisch):
  - chemisches Recyclingverfahren, bei dem das Harz mithilfe eines Lösungsmittels, meist hoher Temperatur (150-300 °C) und Druck chemisch aufgebrochen und gelöst wird
  - die Kohlenstofffasern bleiben weitgehend unverändert zurück und können wiederverwendet werden
  - auch die Harzbestandteile können teilweise zurückgewonnen und wiederverwendet werden
- weitere Verfahren in der Entwicklung

Rotoren

Prognose: anfallende Massen an Rotorblättern – CFK



Quelle: Fraunhofer IWES / RDR Wind

Sonstige Bestandteile

Elektronik-Komponenten

- Verkauf auf dem Second-Hand-Markt
- stoffliche Verwertung der Kunststoffe und Metalle

seltene Erden

- Vorkommen in Permanentmagneten, z. B. Neodym, Dysprosium
- Erfassungsquote bei Rückgewinnung 100 %, aber hoher Aufwand (Transport / Entmagnetisierung) und noch selten angewandt

Kupfer, Aluminium

- Einschmelzen und Wiederverwendung

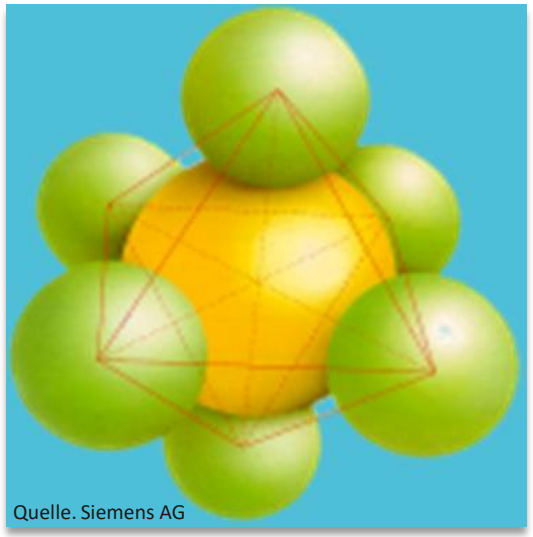
Betriebsflüssigkeiten

- meist Öle – werden abgesaugt, raffiniert / aufgearbeitet zu Basis-Ölen

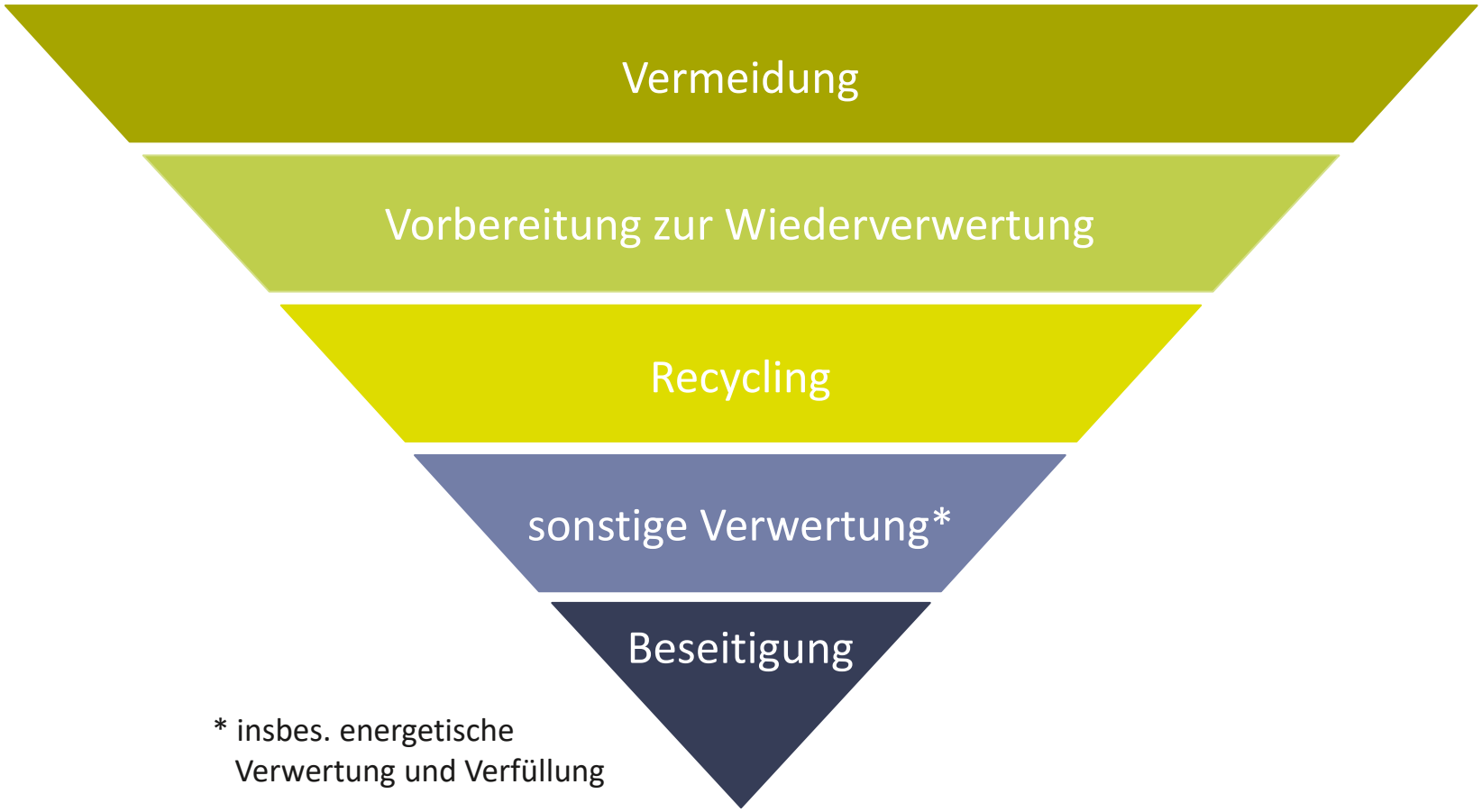
links:
Neodym (ND)
oben:
Dysprosium (Dy)

Exkurs: Schwefel-Hexafluorid (SF_6)

- Isoliergas in Schaltanlagen, u. a. von Windenergieanlagen (ca. 6 kg)
- stärkstes bekanntes Treibhausgas, 22.800-mal so schädlich wie CO_2
- bleibt > 3.000 Jahre erhalten
- Selbstverpflichtung von 2005: Zielwert < 2 %SF6-Emissionen, Leckrate auf 0,1% / Jahr limitiert
- wird abgesaugt – gewonnene SF_6-Mengen müssen lokal wiederverwendet / recycelt oder durch zertifizierte Lieferanten entsorgt und dokumentiert werden
- Novellierung der EU F-Gase-Regulierung: Verbot der Verwendung in Mittel-spannungsschaltanlagen ab 2026 (< 24 kV) bzw. ab 2030 (< 52 kV)
- SF6-Wartung nach 2035 nur noch mit zurückgewonnenem / recyceltem SF_6
- marktreife Alternativen vorhanden, z. B. Gas aus natürlichen Bestandteilen der Umgebungsluft


Quelle. Siemens AG

Fazit



* insbes. energetische Verwertung und Verfüllung

Second Live

Komponentenverkauf

Stahlrecycling

Recyclingbeton

Pyrolyse

WPC-Produkte

thermische Verwertung

stoffliche Verwertung

Quelle: FA Wind und Solar, eigene Darstellung

Ein Blick in die Zukunft

Aktuelle Forschungsprojekte

- **ReusaBlade**: Fraunhofer IWES; Erforschung recyclingfähiger Rotorblatt-Materialien und Recyclingverfahren; lösbare Harzsysteme, um Faser- und Kernmaterialien sortenrein zurückzugewinnen
- **EoLO-HUBs**: EU-Projekt; Entwicklung innovative Recyclingverfahren für Rotorblätter, um Glas- und Carbonfasern zurückzugewinnen zur kreislauforientierten Nutzung von Verbundwerkstoffen
- **RE SORT**: Fraunhofer IWES; Entwicklung wirtschaftlicher Pyrolyseverfahren zum Recycling von dickwandigen, faserverstärkten Verbundwerkstoffen
- **REWIND**: EU-Projekt; Entwicklung innovativer Technologien für die effiziente Stilllegung, Wiederverwendung und das Recycling von Rotorblättern
- abgeschlossen: RecycleWind, ZEBRA, DecomBlades, WindLoop

Ein Blick in die Zukunft

Handlungsempfehlungen bzgl. Rotorblätter (nach UBA 2022)

- „Design for Recycling“ für Rotorblätter – neue, chemisch trennbare Kompositmaterialien, bereits im Angebot mehrerer Hersteller, sollten rechtlich als Standard festgeschrieben werden
- Verbesserung der Informationslage durch digitalen Produktpass
- Vollzugshilfe für die Demontage-, Recycling- und Entsorgungsüberwachung und ergänzende Zertifizierung von Verwertungsbetrieben
- Weitere Forschung an hochwertigen Recyclingverfahren für Verbundstoffe

Bestreben, schon bei der Produktion auf Nachhaltigkeit zu achten

Weiterführende Informationen

- FA Wind und Solar (2024): Kompaktwissen Ökobilanz der Windenergie.
- FA Wind (2024): Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Dokumentation.
- FA Wind (2023): Kompaktwissen Rückbau und Recycling.
- FA Wind (2021): Rückbau von Windenergieanlagen – Ein Blick auf die Rückbauverpflichtung und weitere städtebauliche Instrumente.
- 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.
- Umweltbundesamt (2023): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. UBA Texte 48/2023.
- Umweltbundesamt (2022): Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Abschlussbericht. UBA Texte 92/2022.
- Umweltbundesamt (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcen-sichernden Rückbau von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. UBA Texte 117/2019.
- Deutsches Institut für Normung (2020): DIN SPEC 4866: 2020-10, Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen.
- *In Vorbereitung: FA Wind und Solar (2025): Hintergrundpapier Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen.*

FACHAGENTUR
WIND UND SOLAR

Noch Fragen?

Claudia Bredemann, Dipl.-Ing., Dipl.-Ökologin
T. +49 173 60 88 995
bredemann@fa-wind-solar.de

www.fachagentur-wind-solar.de