



# ENTWICKLUNG EINES KONZEPTS UND MAßNAHMEN FÜR EINEN RESSOURCENSICHERNDEN RÜCKBAU VON WINDENERGIEANLAGEN

**Ferdinand Zotz**  
**Dessau, 20. September 2019**

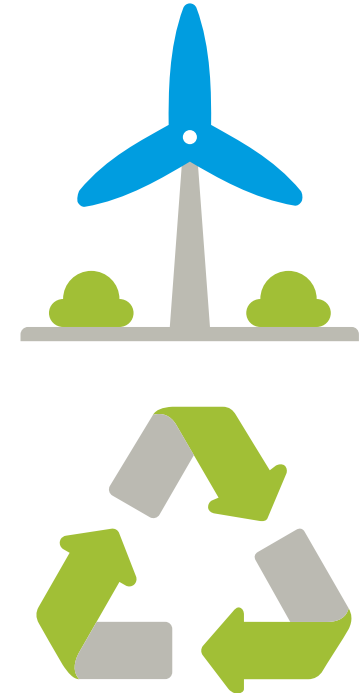
# **HINTERGRUND DES VORHABENS VORSTELLUNG PROJEKTTEAM**



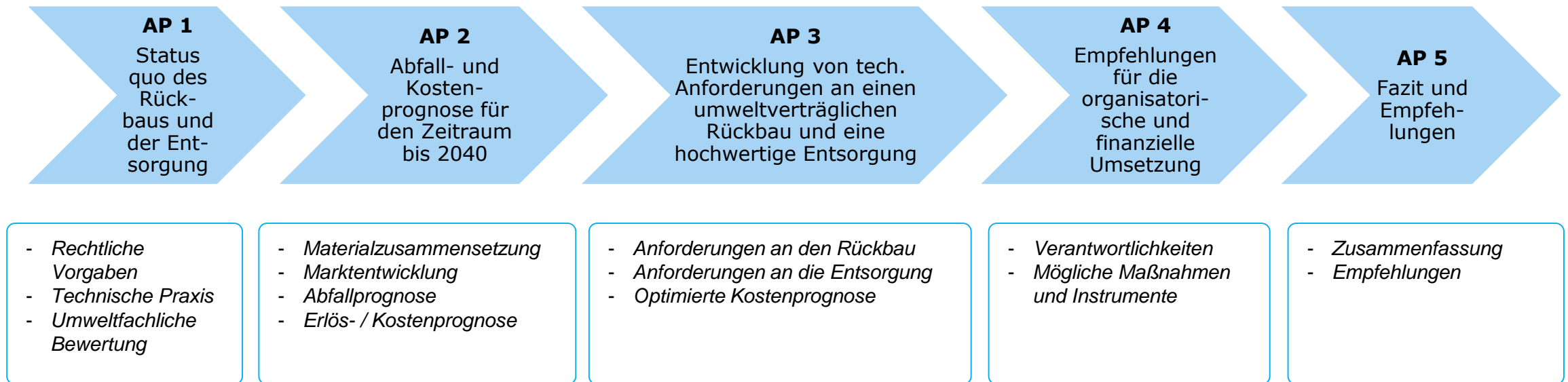
# HINTERGRUND DES VORHABENS

## Ausgangspunkt

- Prognose verstärkter Rückbau von Windenergieanlagen (WEA) ab 2020
- Herausforderungen durch enthaltene Verbundwerkstoffe und Materialvielfalt



# PROJEKTSCHRITTE



# EINFÜHRUNG / VORSTELLUNG PROJEKTTEAM





# RAMBOLL AUF EINEN BLICK

- Unabhängiges Ingenieur-, Planungs- und Management-beratungsunternehmen
- 1945 in Dänemark gegründet
- Starke Präsenz in Skandinavien, Großbritannien, Nord-amerika, Kontinentaleuropa, Naher Osten und Asien-Pazifik
- Im Besitz der Ramboll Stiftung



**14,000  
Experten**



**300 Büros  
in 35 Ländern**



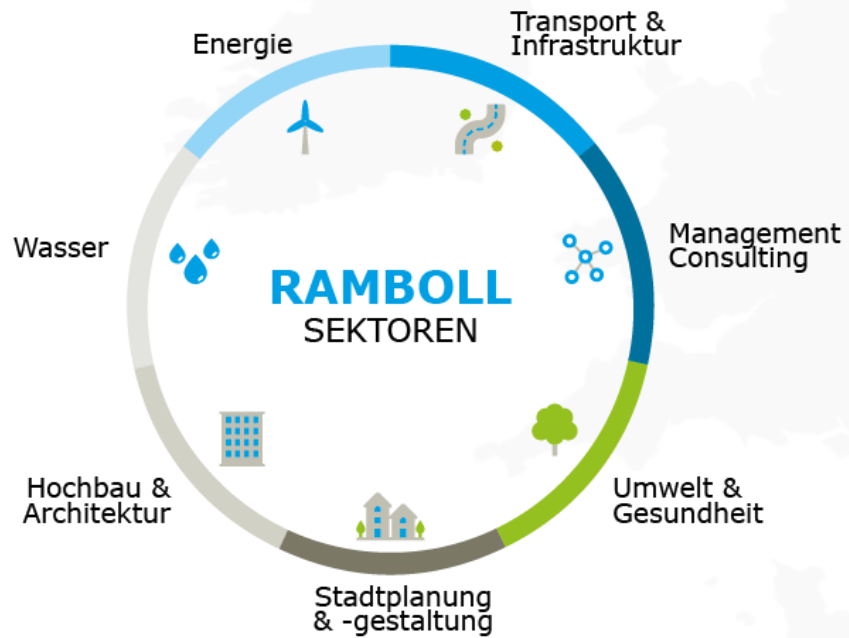
**1,4 Milliarden  
Euro Umsatz**

## Services in den Bereichen:

- Hochbau & Architektur
- Transport & Infrastruktur
- Stadtplanung & -gestaltung
- Wasser
- Umwelt & Gesundheit
- Energie
- Management Consulting

**RAMBOLL**

# RAMBOLL IN DEUTSCHLAND



**500  
Experten**



**Etabliert  
in 2000**



**Headquarter  
in Hamburg**





# AP 1. STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG





# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA

## AS 1.1

Rechtliche Vorgaben für  
Rückbau und Entsorgung  
von WEA

## AS 1.2

Technische Praxis von  
Rückbau und Entsorgung

## AS 1.3

Umweltfachliche  
Bewertung der Praxis und  
Aufzeigen von Problemen

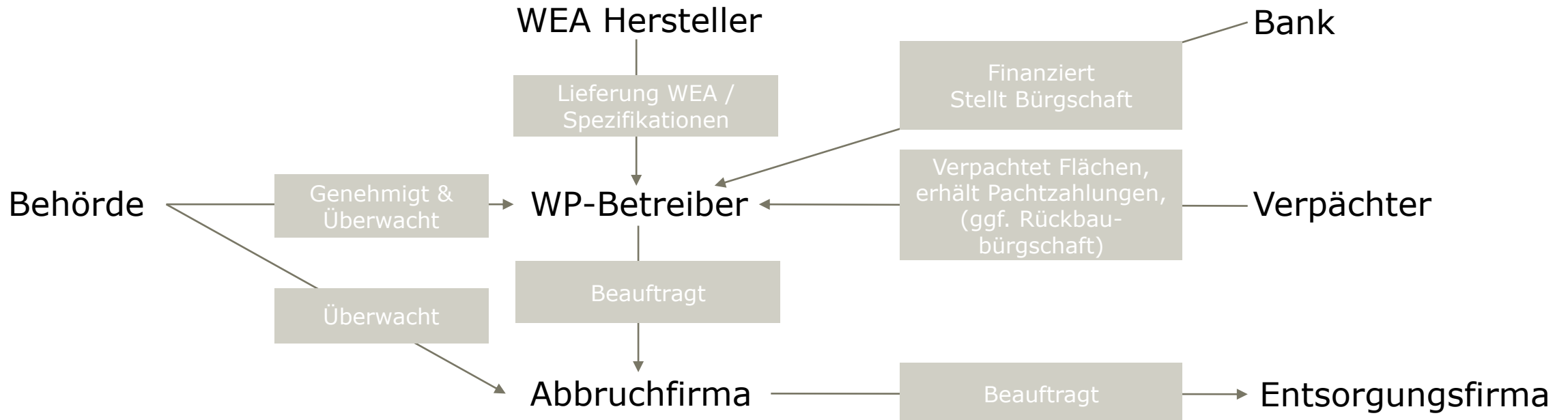
# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: RECHTLICHE VORGABEN

- Zwei anwendbare Genehmigungsregime (Baurecht und Immissionsschutzrecht), abhängig von der Gesamthöhe der Anlage
- Ausgestaltung und Maßstab der Pflichten zu Rückbau (hier: rechtliche Unklarheiten) und Entsorgung der entstehenden Abfälle (hier: klare gesetzliche Regelung der Verantwortlichkeiten zu Getrennterfassung und Zuführung zur Entsorgung in GewAbfV, stoffstromspezifischen Vorschriften oder KrWG)
- Finanzielle Rücklagen zur Sicherung des Rückbaus (Verpflichtungserklärung, § 35 Abs. 5 BauGB)
- „Flucht in die Insolvenz“ als Massenphänomen?

# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: BETEILIGTE AKTEURE

## 2. Technische Praxis von Rückbau und Entsorgung

- Beteiligte Akteure & Schnittstellen:



# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: PRAXIS VON RÜCKBAU UND ENTSORGUNG

- Komponenten einer WEA (Teil 1):

Komponente	Stoffliche Zusammensetzung
Rotorblatt	Grundsätzlich sehr heterogen! Überwiegend: GFK, teilweise CFK, geringe Mengen an Metallen (Stahl, Cu, Al)
Rotornabe	Stahl, Elektrokomponenten, GFK
Gondel (Gehäuse)	GFK, teilweise Aluminium
Gondel (Antriebsstrang)	Stahl, Kupfer, Aluminium, Elektrokomponenten
Turm	Stahl, Aluminium, Beton (bei Hybridtürmen)
Fundament	Beton, Stahl



# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: PRAXIS VON RÜCKBAU UND ENTSORGUNG

- Komponenten einer WEA (Teil 2):

Komponente	Stoffliche Zusammensetzung
Elektrogeräte, Elektronik, IT Ausstattung	Diverse Metalle
Kranstellflächen	Gesteinsschotter, Textil
Schwefelhexafluorid (SF6)	SF6 (Anm.: Nicht in jeder WEA vorhanden)
Schmier- & Kühlmittel	Öle, Fette, Kühlmittel (meist Glykole)
Batterien & Akkus	Batterien & Akkumulatoren (Notstromversorgung: Pitchsystem, Befeuerung, Schaltschränke)
Lacke & Beschichtungen	Diverse Stoffe

# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: RÜCKBAUPROZESS

- Vorbereitungsarbeiten
- Kran: Demontage Rotorblätter / Rotor, Nabe, Gondel, Turm (ggf. Sprengung)
- Demontage Fundament (Bagger, Sprengung) – unterschiedliche Sichtweisen bzgl. der erforderlichen Tiefe
- Demontage der Stellflächen
- Bearbeitung / Zerlegung der Komponenten (für den Transport) und Entsorgung

# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: PRAXIS DER ENTSORGUNG

- Beton: Füllstoff, (RC-Beton)
- Stahl, Aluminium & Kupfer: Einschmelzen
- Elektrogeräte/-schrott: Stoffliche Verwertung der Metalle (soweit trennbar)
- GFK: Zementwerk, Füllstoff, energetische Verwertung, (Pyrolyse)
- CFK: derzeit geringer Anteil, keine hochwertige Verwertungswege etabliert
- Seltene Erden: Keine industriell nutzbaren Verfahren (Mischschrott)
- Schotter: Erneute Nutzung möglich

# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: AUSWEICHREAKTIONEN

- Ausweichreaktionen / unzulässige Praktiken / Probleme:
  - Fehlende Standards:
    - Umziehen von WEA
    - Zerlegung von Rotorblättern vor Ort ohne staub-mindernde Maßnahmen
    - Rückbau der Fundamente (Tiefe)
  - Kontrolle / Eingriffe durch Behörden nicht einheitlich
  - Subcontracting
  - Entsorgung: CFK/GFK wird als nicht optimal empfunden
  - Weitenutzung im Ausland (=Deponierung im Ausland?)



# AP 1: STATUS QUO DES RÜCKBAUS UND DER ENTSORGUNG VON WEA: RELEVANTE UMWELTASPEKTE

- Wiederherstellen des ursprünglichen Zustands der Fläche
- Flurschäden und Bodenverdichtungen (Folgenutzung?)
- Emissionen
- Recycling von Wertstoffen, Entsorgung kritischer Fraktionen

## AP 2. ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040



# AP 2: ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040

## AS 2.1

Materialzusammensetzung der WEA und  
übliche Lebensdauern

## AS 2.2

Marktentwicklung und –wachstum für  
WEA

## AS 2.3

Abfallprognose auf der Grundlage der  
Materialanalyse

## AS 2.4

Prognose über Erlöse und Kosten

# AP 2: ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040: INVENTAR UND BILDUNG VON CLUSTERN

- Datenbank „Windpark Deutschland“ (31.12.2017):
  - Interne Datenbank von Ramboll
  - Hersteller, WEA-Typ, Nennleistung, Rotordurchmesser, Nabenhöhe, Koordinaten, Inbetriebnahme ...
  - Bis 31.12.2017: 27.426 WEA bzw. 49.803,64 MW
  - 647 vers. WEA-Konfigurationen
  - Sinnvolle Vereinheitlichung von Bezeichnungen, WEA-Kennzahlen
  - Recherche des Turmkonzepts / des Antriebsstrangkonzpts
  - Bildung von Clustern nach
    - WEA-Typ (Modell/Hersteller, Nennleistung)
    - Turm-Typ (Beton, Stahlrohr, Hybrid, (selten:) Gitternetz)

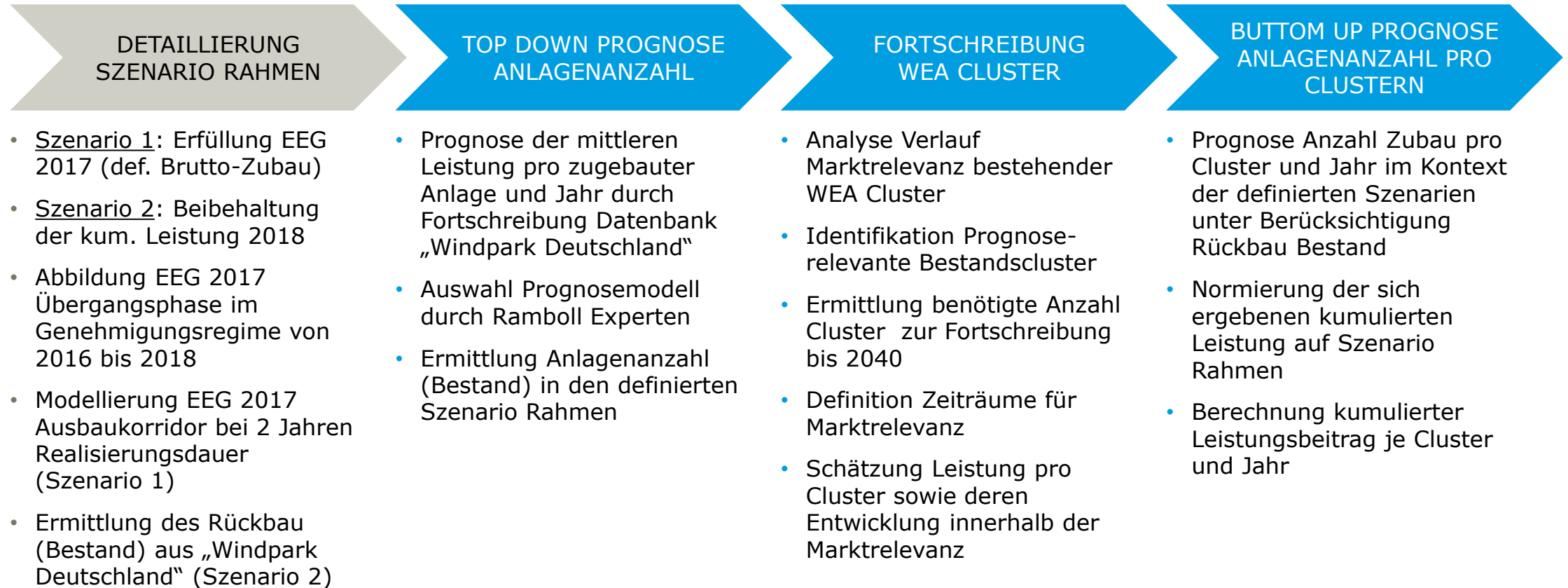




# AP 2: ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040: MATERIALZUSAMMENSETZUNG UND LEBENSDAUER

- Mengenmäßig dominierende Abfallmassenfraktion: Beton (83%), Stahl (15%). CFK <1%.
- Angenommene Lebensdauer:
  - Grundsätzlicher Ansatz von 20 Jahren (Standicherheit, Vergütung, Genehmigung)
  - Erste Rückbauwelle nach dem 31.12.2020

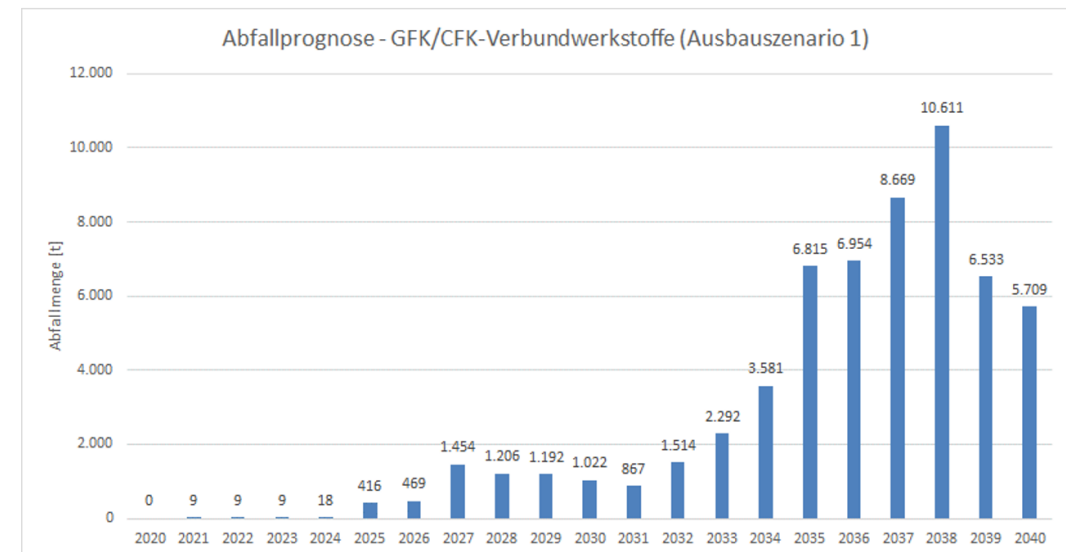
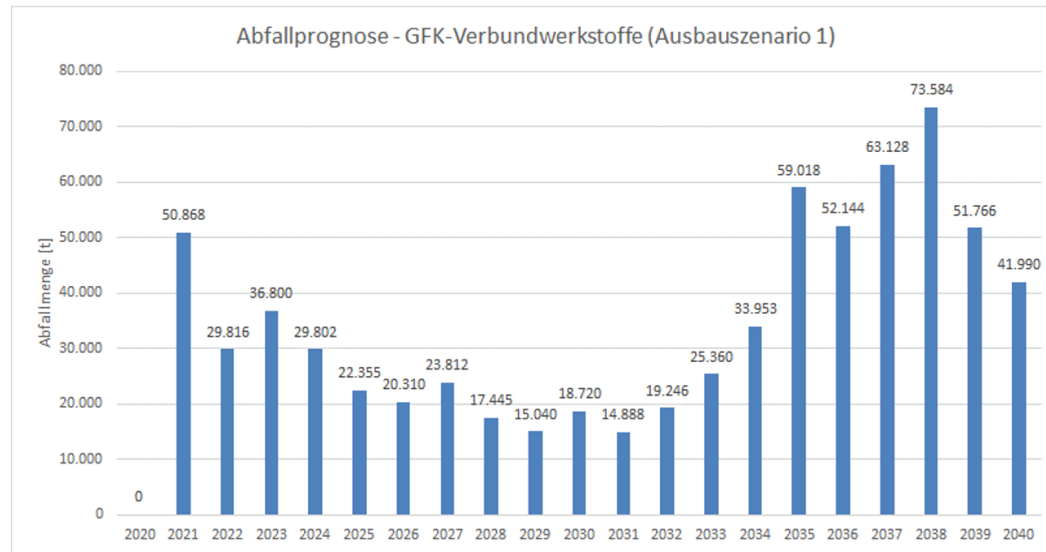
# PROGNOSE DER MARKTENTWICKLUNG ANHAND BESTEHENDER UND FORTZUSCHREIBENDER WEA CLUSTER



## AP 2: ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040: ABFALLPROGNOSE

- Deutsches WEA-Portfolio gemäß der „WP-Deutschland“ Datenbank
- Zuordnung der einzelnen WEA zu den „WEA-Clustern“ & den „Turm-Clustern“
- Verwendung der Materialien aus den jeweiligen Clustern
- Ansatz der Lebensdauer gemäß EEG – Rückbau im Folgejahr
- Kein Weiterverkauf von WEA ins Ausland, keine Laufzeitverlängerung

# AP 2: ABFALL- UND KOSTENPROGNOSE FÜR DEN ZEITRAUM BIS 2040 (AUSZUG)





# PROGNOSE RÜCKBAUKOSTEN (BASIS: AKTUELLER STAND DER TECHNIK) ...

- Entwicklung eines Berechnungsmodells der Rückbaukosten
- Grundsätzliche Ansätze:
  - Rückbau mittels Kran
  - Rückbau von Betonturmsegmenten mittels Sprengung
  - Vollständige Entfernung der Fundamente
  - Wiederverfüllung der Fundamentgruben
  - Vollständige Entsorgung der rückgebauten WEA / Komponenten

# KOSTENSÄTZE WURDEN EXTERN IN EXPERTENINTERVIEWS ERMITTELT UND INTERN DURCH RAMBOLL VALIDIERT

- Rückbaukosten = Kosten Vorbereitung + Rückbaukosten + Entsorgungskosten
  - Kosten Vorbereitung
    - Personalkosten, BS-Einrichtung
  - Rückbaukosten
    - Personalkosten, Krankkosten (inkl. Rüstkosten, Versicherungen ...), Rückbau Fundamente (Verrichtung, Materialaufnahme, Verfüllung), Sprengung (bei Hybridtürmen)
  - Entsorgungskosten
    - je Komponente (inkl- ext. Transport) für CFK-haltiges Material, GFK-haltiges Material, Stahl (inkl. Bewehrung), Kupfer, Aluminium, Beton, Elektroschrott, Betriebsflüssigkeiten

# MODELLRECHNUNG: ABGLEICH MIT ABSCHÄTZUNG RÜCKSTELLUNGEN

## HESSSEN ERLASS (2013)

*Nabenhöhe der Windenergieanlage  
[m] × **1.000 [€/m]** =  
Betrag der Sicherheitsleistung [€]*



Zur Abschätzung im Rahmen der Prognose GEEIGNET, da Nabenhöhen im Bestand meldepflichtig also bekannt und fortschreibbar.

## SACHSEN-ANHALT ERLASS

(im Bericht: BVERWG) (2003)  
*Installierte elektrische Leistung [MW]  
\* **30.000 [€/MW]** =  
Betrag der Sicherheitsleistung [€]*



Zur Abschätzung im Rahmen der Prognose GEEIGNET, da installierte elektrische Leistung im Bestand meldepflichtig also bekannt und fortschreibbar.

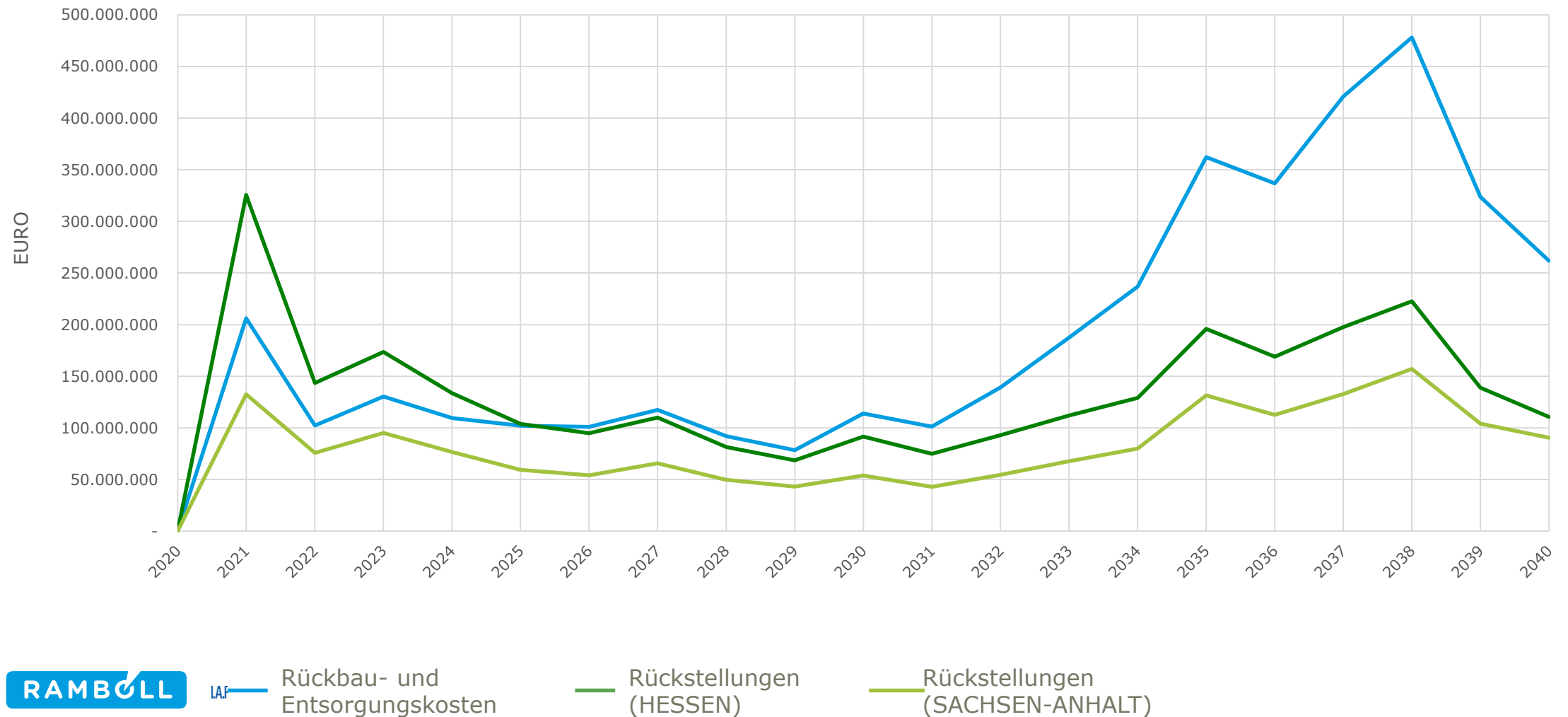
## NRW ERLASS (2015)

*Investitionssumme [€] \* **6,5%** =  
Betrag der Sicherheitsleistung [€]*



Zur Abschätzung im Rahmen der Prognose NICHT geeignet, da Investitionssummen für Bestand unbekannt und daher auch nicht fortschreibbar.

# AB 2025 SIND RÜCKBAU- UND ENTSORGUNGSKOSTEN NICHT MEHR DURCH RÜCKSTELLUNGEN GEDECKT



IAF Rückbau- und Entsorgungskosten

Rückstellungen (HESSEN)

Rückstellungen (SACHSEN-ANHALT)

\* Berücksichtigung Inflation von 2% bei Rückbau- und Entsorgungskosten (Basisjahr 2018)

\*\* Keine Berücksichtigung Verzinsung der Rückstellungen (da oftmals Absicherung durch nicht verzinsten Bankbürgschaften)

# GETRIEBEN DURCH RÜCKBAU BESTEHEN SPÄTESTENS AB 2025 FINANZIERUNGSLÜCKEN IM BESTANDSPORTFOLIO

- Mit zunehmenden Nabenhöhen übersteigen in dieser Modellrechnung insbesondere die Rückbaukosten, die gebildeten Rückstellungen nach beiden berücksichtigten Richtwerten (HESSEN und SACHSEN-ANHALT)
- Einsetzend ab 2025 und verstärkt ab 2031 werden Anlagen aus der EEG Förderung herausfallen und wahrscheinlich zurückgebaut werden, deren Rückstellungen die Rückbaukosten vermutlich nicht decken
- Die Entsorgung der betrachteten Abfallfraktionen generiert für alle Cluster Erlöse, mit denen Finanzierungslücken im Rückbau allerdings nur teilkompensiert werden können.

# **AP 3: ENTWICKLUNG TECHNISCHER ANFORDERUNGEN AN UMWELTVERTRÄGLICHEN RÜCKBAU UND HOCHWERTIGE ENTSORGUNG**





# AP 3: ENTWICKLUNG TECHNISCHER ANFORDERUNGEN AN UMWELTVERTRÄGLICHEN RÜCKBAU UND HOCHWERTIGE ENTSORGUNG

AS 3.1  
Anforderungen an den  
Rückbau

AS 3.2  
Anforderungen an die  
Entsorgung

AS 3.3  
Kostenprognose

# AP 3: ENTWICKLUNG TECHNISCHER ANFORDERUNGEN AN UMWELTVERTRÄGLICHEN RÜCKBAU

- Rückbauumfang
- Zulässigkeit verschiedener Rückbaumethoden (Sicherheit / Arbeitssicherheit)
- Verarbeitung / Zerlegung / Aufbereitung
- Mindeststandards an technischer Dokumentation
- Stärkung von Kontrollstrukturen (Stärkere Einbindung von Behörden; Nachweise der fachgerechten Entsorgung / Umgang mit ins Ausland verkaufte WEA)
- Nutzung von Synergieeffekten (Kooperationsmöglichkeiten verschiedener Betreiber; Einführung eines Portals (Marktstammdatenregister))

## AP 3: (HOCHWERTIGE) ENTSORGUNG: VERBUNDWERKSTOFF CFK (1)

- **WEA-Anfall:** hauptsächlich in Rotorblättern zur Stabilisierung, derzeit nur geringe Mengenrelevanz
- **Verwertungsanforderungen:** Keine speziellen AVV-Schlüsselnummern, keine Konkretisierung und Ergänzung allgemeiner Anforderungen des KrWG zur Getrennthaltung oder zum Umgang, Gefahr durch Stäube oder lungengängige Partikel
- **Treiber/Herausforderungen:** Deutlich höherer Marktwert als GFK, abzutrennender Störstoff bei GFK-haltigen Bauteilen derzeit nur durch trial und error detektierbar, Mechanische Verarbeitung führt zu unerwünschten Faserlängenkürzungen, hohe Energiedichte erfordert angepasste Verbrennungsprozesse, hohe elektrische Leitfähigkeit und lungengängige Partikel erschweren die Verarbeitung

## AP 3: (HOCHWERTIGE) ENTSORGUNG: VERBUNDWERKSTOFF CFK (2)

- **Logistik:** Zerlegung in transportfähige Stücke am Anfallort
- **Verwertungsoptionen:** Bislang für post-consumer CFK keine etablierten Verwertungswege vorhanden
- **Techn. Potentialverbesserungen (Forschung):** Forschungsarbeiten zur Pyrolyse, elektrodynamische Fragmentierung, Mikrobiologischer Abbau von Polyetherharzen

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- Ca. 80-90 % der Komponenten aus einer WEA können verwertet werden.
- „Etablierte Route“ bedeutet nicht automatisch auch hochwertigste Verwertung
- Neue Werkstoffkombinationen erfordern adaptierte Prozesse und Prozessketten für ein werkstoffliches Recycling
- Bsp. SEE: Logistikgestaltung und Technikentwicklung ist gekoppelt an betriebswirtschaftlichem Nutzen

# KOSTENPROGNOSE (SOWEIT NEUE ANFORDERUNGEN)

		ANTEIL GESAMTKOSTEN	
		MIN	MAX
RÜCKBAU	GESAMT	74,96%	90,42%
	Kran	21,15%	49,63%
	Fundament	13,40%	24,92%
	Abtransport	5,76%	11,85%
	Sonstige Kosten	9,06%	35,23%
ENTSORGUNG	GESAMT	9,58%	25,04%
	GFK / CFK	1,30%	15,18%
	Beton	5,98%	12,63%
	Elektroschrott	0,26%	1,36%
	Betriebsflüssigkeiten	0,10%	0,77%





# AP 4: MÖGLICHE MAßNAHMEN ZUR UMSETZUNG EINES UMWELTGERECHTEN UND RESSOURCENSICHERNDEN RÜCKBAUS VON WEA



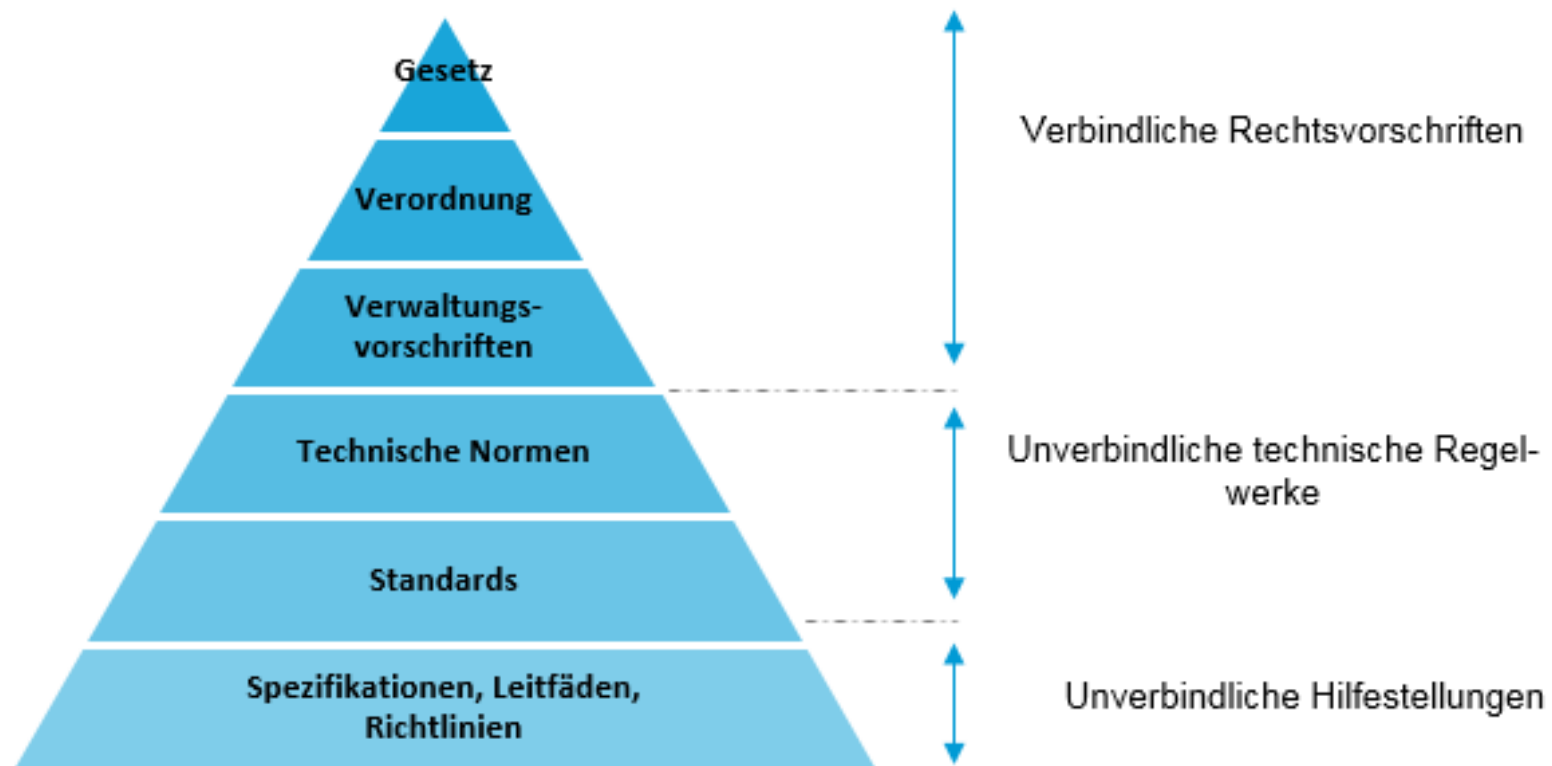
# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG

## Reichweite möglicher Maßnahmen

	Rückbau	Entsorgung
Bestehende WEA		
Zukünftige WEA		

# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG

**Überblick möglicher Instrumententypen und Maßnahmen („Werkzeugkasten“):**



## AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG: LÜCKEN/BEDARF IM BEREICH RÜCKBAU VON WEA:

- Klarstellung des Umfangs bestehender genehmigungsrechtlicher Pflichten
  - Rückbauumfang, insbesondere bezüglich des Rückbaus von Fundamenten und der Nebeneinrichtungen, wie Kabelsysteme, Stellflächen oder Zuwegung;
  - Angewandte Rückbaumethoden (Kran, Sprengung, Umziehen) für die jeweiligen Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte
- Anforderungen bezüglich Sicherheits- und Arbeitssicherheits-Aspekte unter anderem vorzuweisende Ausbildungs-/Fortbildungsnachweise oder Prüfplaketten;
- Datenbereithaltung vom Betreiber eines Wind-parks - bzw. der entsprechenden Daten, vom Hersteller
- Mögliche, mittelfristig auftretende Finanzierungslücke zwischen gebildeten Sicherheitsleistungen der Windpark-Betreiber und den zukünftig zu erwarteten Rückbaukosten

## AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG: LÜCKEN/BEDARF IM BEREICH ENTSORGUNG VON WEA:

- Umsetzung bestehender Pflichten zur Entsorgung in die Praxis, z.B. Getrennthaltung von bestimmten Stoffströmen (GewAbfV)
- Derzeit Defizite mit Blick auf hochwertige Verwertung von
  - Altbeton-Ströme aus WEA (Turm und Fundamente), z.B. durch fehlenden Einsatz und Akzeptanz von Recyclingbaustoffen;
  - SEE-Magneten aus WEA (Synchrongeneratoren), z.B. aufgrund fehlender Mengen für eine wirtschaftliche Verwertung;
  - GFK- und CFK-haltigen Abfälle aus WEA (Rotorblätter), z.B. aufgrund fehlender Vorgaben zur fachgerechten Verarbeitung/Zerlegung von Rotorblätter vor Ort

# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG

## Übersicht möglicher Maßnahmen:

	Rückbau	Entsorgung
Bestehende WEA	<ul style="list-style-type: none"><li>• Technische Leitlinien/Verwaltungsvorschriften zum Rückbau</li><li>• Normen zu ausgewählten Rückbau-Tätigkeiten</li><li>• Nachträgliche Anordnungen für BImSchG-genehmigte Anlagen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Technische Leitlinien zur Entsorgung</li><li>• Normen zu ausgewählten Entsorgungstätigkeiten</li></ul>



# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG: MÖGLICHE MASSNAHMEN IM BEREICH RÜCKBAU

- Hilfestellung für Wirtschaftsakteure und Behörden über nachträgliche Anordnungen bei genehmigungspflichtigen Anlagen bzw. Auflagen bei genehmigungspflichtigem Rückbau (Länderabhängig) als
  - Unverbindlichen technischen Leitlinien zum Rückbau ;
  - Verwaltungsvorschriften;
  - Technischen Normen zum Rückbau;
- Rechtliche Vorgaben zum Rückbau
- Anforderungen und Standards für den Rückbau-Prozess im Prinzip auch für bereits errichtete Anlagen gültig
- Standard konkretisiert nur bestehende gesetzliche abstrakte Pflicht, wie z.B. die immissionsschutzrechtliche Grundpflicht nach § 5 Abs. 3 Nr. 1 BImSchG

# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG: MÖGLICHE MASSNAHMEN IM BEREICH ENTSORGUNG

- Erweiterung der Vorgaben zum Rückbau in Leitlinie bzw. Norm um Entsorgungsrelevante Aspekte
- Keine Aufnahme von herkunftsübergreifenden Stoffstrom-Problemen
- Vorgaben zur Getrennthaltung und Aufbereitung der Stoffströme
- Verweis auf bestehende Normen bezüglich rezyklierter Gesteinskörnungen oder Beton
- Elemente der Produktverantwortung

# AP 4: EMPFEHLUNGEN FÜR ORGANISATORISCHE UND FINANZIELLE UMSETZUNG

	Rückbau	Entsorgung
Bestehende WEA	Technische Leitlinien/Verwaltungsvorschriften zum Rückbau Normen zu ausgewählten Rückbau-Tätigkeiten Nachträgliche Anordnungen für BImSchG-genehmigte Anlagen	Technische Leitlinien zur Entsorgung Normen zu ausgewählten Entsorgungstätigkeiten
Zukünftige WEA	Maßnahmen wie bei bestehenden WEA (außer nachträgliche Anordnungen) Rechtliche Leitlinien zur Konkretisierung der Nebenbestimmungen zu den BImSchG-Genehmigungen (Informationspflicht, Fundament-Rückbau, Sicherheitsleistungen, etc.)	Maßnahmen wie bei bestehenden WEA Elemente einer Produktverantwortung für WEA-Komponenten
Sonstige	Einführung und ggfs. Erweiterung des Marktstammdatenregisters zur Schaffung von Synergien bei Rückbau und Entsorgung	
Forschungsbedarf	Optimierung der Bewirtschaftung spezifischer Abfallströme Wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierungsbedarf	

**VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!**

**FZ@RAMBOLL.COM**



Bright ideas. Sustainable change.

