

Quo vadis Stoffströme – die Wege des Rückbaus sind (un)ergründlich

- Ergebnisse Projekt RecycleWind –



Autoren:

Dr. Detlef Spuziak-Salzenberg

Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH



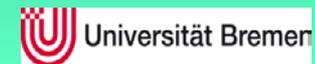
Dr. Carmen Arndt

brands & values GmbH



Dipl.-Ing. Michael Steinfeldt

Universität Bremen, FB Produktionstechnik/ Fachgebiet Resiliente Energiesysteme



gefördert durch



Die Senatorin für Klimaschutz,
Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung
und Wohnungsbau



ZIEL DES PROJEKTES

Konzeption eines selbstlernenden und belastbaren Recycling-Netzwerks zur nachhaltigen Steuerung der Stoffströme von Windenergieanlagen am Beispiel von Rotorblättern.

1.
Selbstlernend

Definition und Anpassungen von Standards innerhalb des Netzes auf der Grundlage von zuvor vereinbarten Grundsätzen

2.
Resilient

Robuster, d.h. sicherer Ansatz für ein hochwertiges Recycling, auch wenn sich die Rahmenbedingungen ändern (u.a. Markt, Technologie, Recht)

1. Aufnahme Akteursnetzwerk

- relevante Akteure der Prozessketten
- Aufgaben, Einfluss, Verantwortlichkeiten, Interaktionen der Akteure
- Handlungsoptionen

→ **BPMN = Business Process Model and Notation**

2. Aufnahme Verwertungssystem

- Massen der Bauteile und Materialien
- Rückbau, Aufbereitungs- und Verwertungstechnologien
- Materialqualitäten und -werte
- Stoffstrommodelle der Prozessketten

→ **Aufbau zentrale Datenbank**

→ **Sankey-Diagramme**

3. Definition Kennzahlen/ Begriffe

- Kreislauffähigkeit, Recyclingfähigkeit
- Hochwertiges Recycling
- Recyclingquote, Sekundärstoffquote
- Verwertungsquote

→ **Steuerung im geplanten Verwertungsnetzwerk**

4. Konzept Verwertungsnetzwerk

- Organisation des Netzwerkes*)
- Festlegung von Zielen
- Festlegung von Standards
- mit regelmäßigen Evaluationen

→ **selbstlernend und resilient**

*) mit Vertreter aller Wertschöpfungsketten, FuE, Behörden

Warum dieser sozio-technische Ansatz?

Der nunmehr nach 20 Jahren EEG-Förderung beginnenden Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen ist geprägt durch

- eine noch relativ junge Vergangenheit der Technologie mit entsprechend großer Experimentierphase zu den Anfangszeiten 1995 – 2000
- eine über 20-bis 30-jährigen Nutzungsphase
- eine über die letzten 20 Jahre fortlaufende größere Technologieentwicklung bei allen Hauptkomponenten mit deutlicher Zunahme der Leistungsgrößen der Anlagen (onshore wie offshore)
- häufig fehlende Dokumentation bei Altanlagen über die stoffliche Zusammensetzung und Konstruktion von verbauten Produkten, zudem der Herstellermarkt sich stark gewandelt bzw. konsolidiert hat, sowie deren Änderungen durch Reparatur, Austausch oder Instandsetzung beim Betrieb



die Anforderungen beim Recycling werden in den nächsten 10-20 Jahren daher andere sein, als in den darauffolgenden 10-20 Jahren

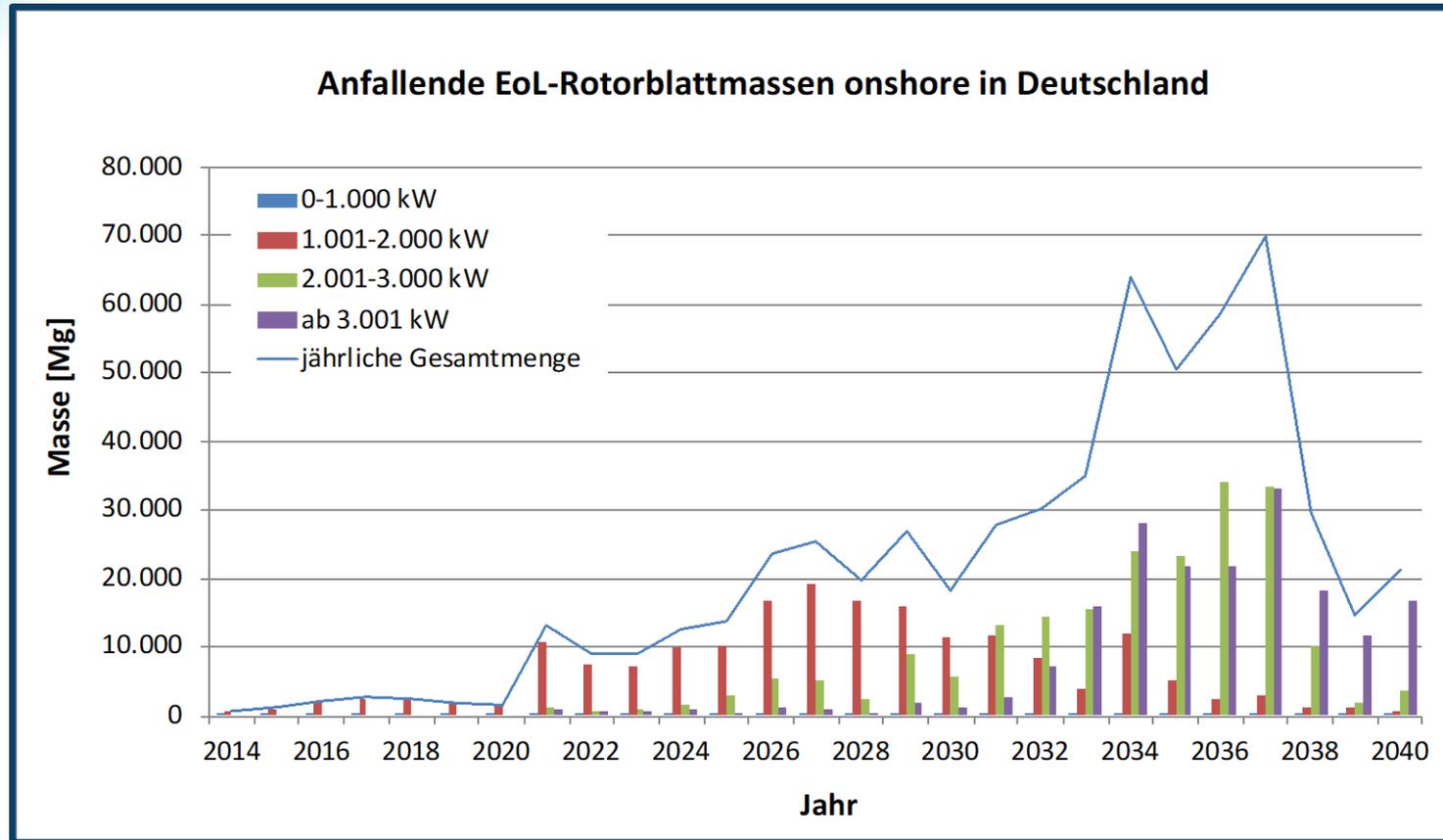
Folgende Grundlagen werden als wesentlich für ein effizientes Verwertungsnetzwerk angesehen:

- **Datensharing via Umweltproduktdeklarationen (EPD)** getrennt für alle Hauptkomponenten einer WEA mit
 - Darlegung der stofflichen Zusammensetzung in Gew,-%
 - Darlegung von Demontagehinweisen inkl. Skizzen für relevante Stoffe
 - Darlegung der Recycling- und Kreislauffähigkeit
- **Datenbank aller WEA onshore und offshore (D bzw. EU)**, inkl. Materialzuordnungen
- **Detailerfassung der Stoff- und Energieflüsse** für Rückbau, Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren, inkl. der damit verbundenen substituierten Stoffe durch den Sekundärstoffeinsatz
- **LCA-Auswertungen für die Rückbau- und Recyclingprozesse**



Sinnvoll: Etablierung eines europaweiten Netzwerkes

Abschätzung Mengenaufkommen an EoL-Rotorblättern



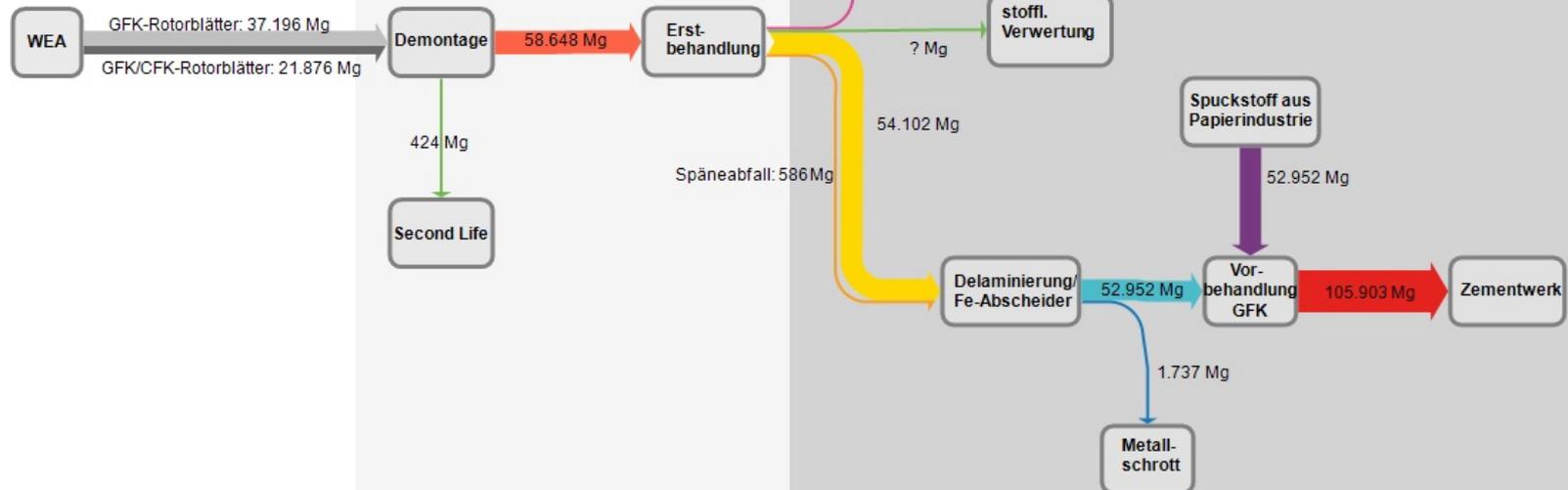
Quelle: eigene Datenbank IEKrW, Basis Marktstammdatenregister Stand 31.12.2020;
Second-Life (bei nicht repowerten Anlagen < 1 MWel 90%; Anlagen 1-2 MWel. 10%);
Laufzeiten Anlagen < 2 MWel 65% mit 25 Jahren, 35% mit 20 Jahren; alle anderen
Anlagengrößen mit 20 Jahren

Quo vadis - wo verbleiben die EoL-Rotorblattmengen ?

Ausgangslage Projektstart August 2020

Prognose Stoffstrom EoL-Rotorblätter Entsorgung im Jahr 2036

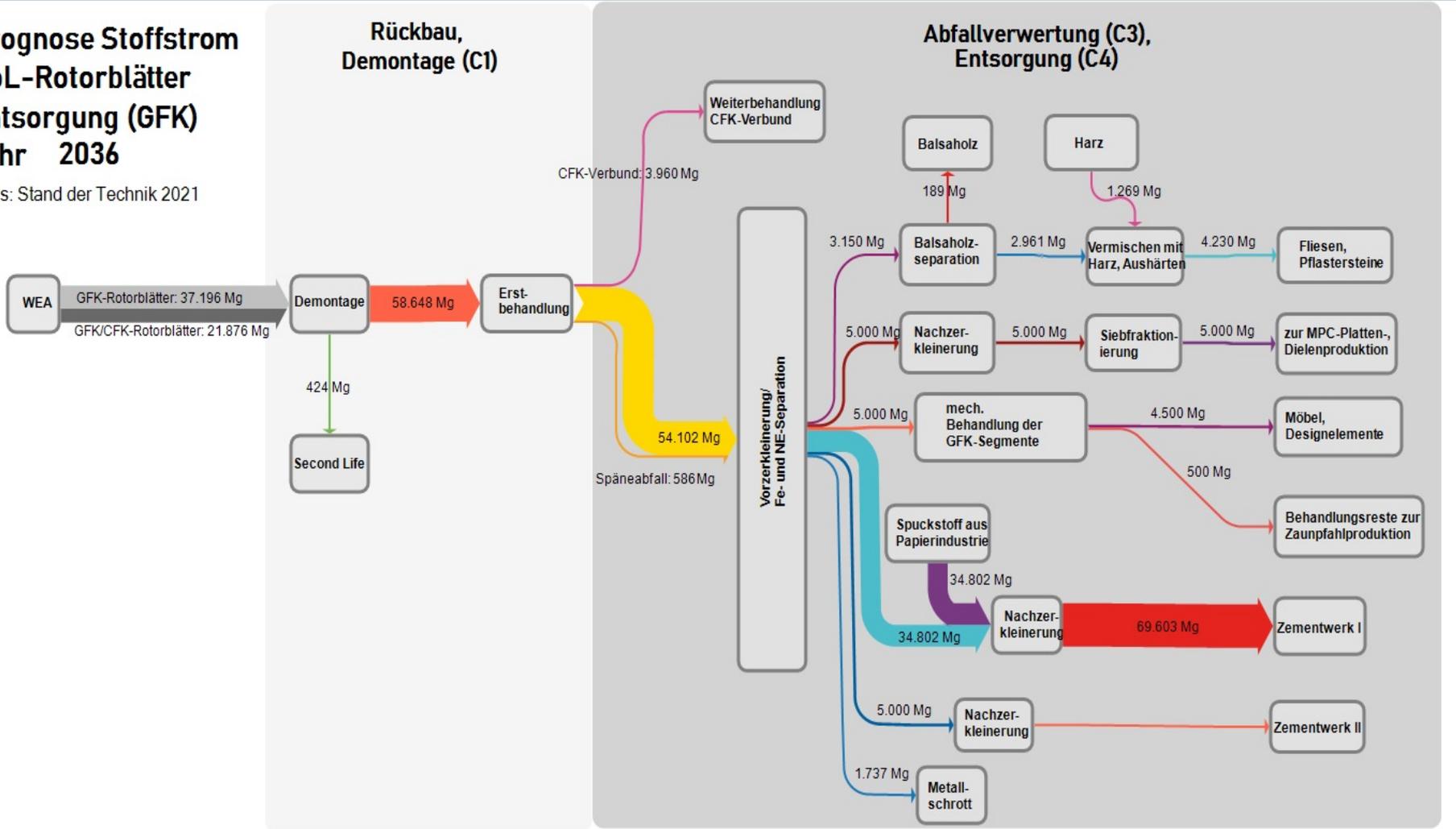
Basis: Stand der Technik,
Ausgangssituation 2020



Marktangebote Okt. 2021

Prognose Stoffstrom EoL-Rotorblätter Entsorgung (GFK) Jahr 2036

Basis: Stand der Technik 2021



Screening LCA's zur Bewertung der Recyclingoptionen

Voraussetzungen:

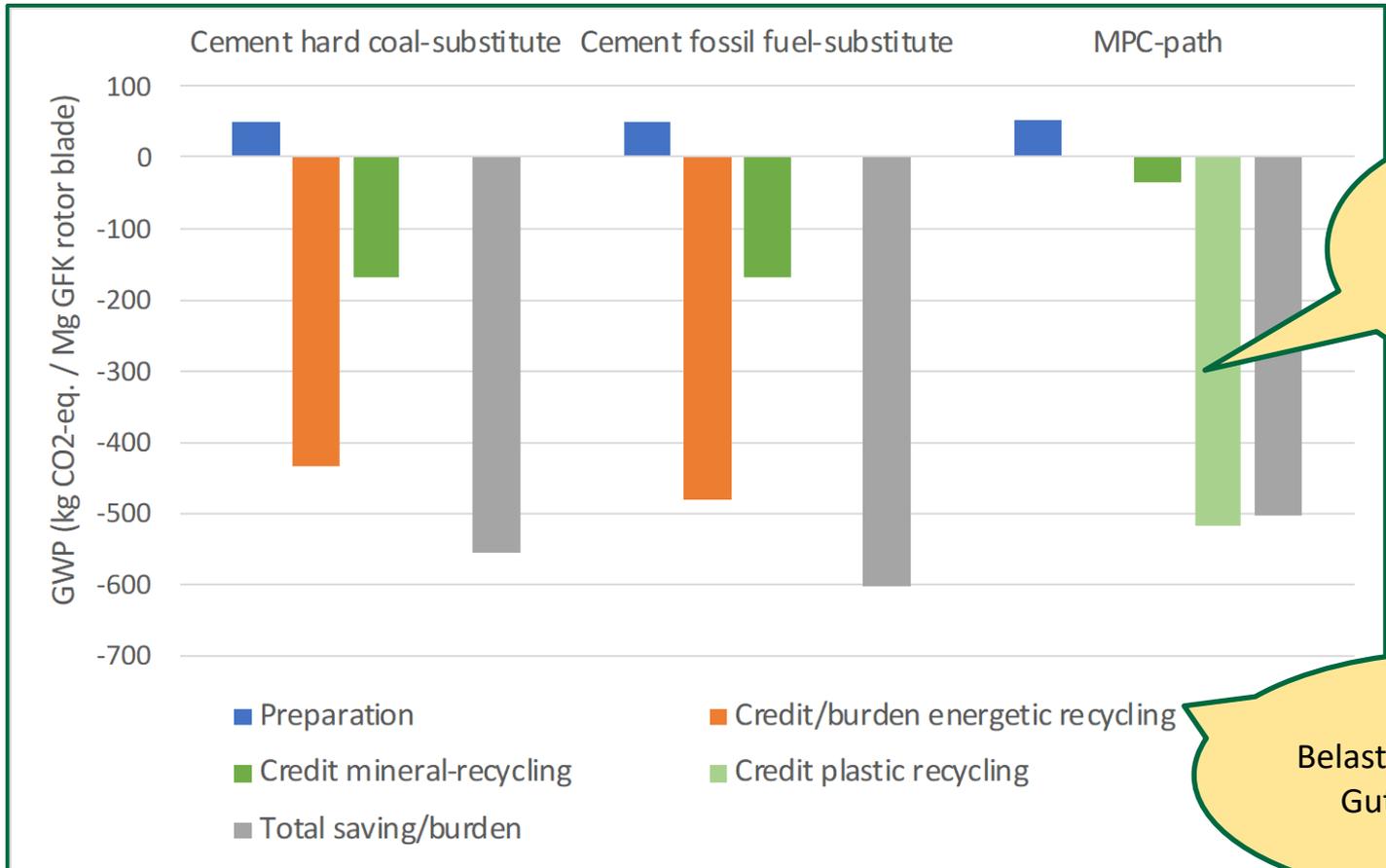
- Ausreichende Daten über Stoff- und Energieflüsse bei der Aufbereitung bis zur Nutzung als Sekundärrohstoff
- Ausreichende Daten zum Verwertungsprozess und zu den substituierten Stoffen, Materialien und Energien

Im Vorhaben RecycleWind 2.0 wurden die Prozesse

- Rückbau WEA onshore
- Zementpfad GFK
- Pyrolysepfad CFK
- MPC-Dielen/ GFK-Pflastersteine

vertiefend betrachtet und Screening LCA's erstellt.

Screening LCA's für die Recyclingoptionen Zementpfad u. MPC-Pfad



30% Substitution an PP

Differenz Belastung Verbrenng./ Gutschrift Subst. Brennstoff

Die vorgenannten Gutschriften beziehen sich auf die Verwertung einer Tonne an GFK/ Sandwich-Material aus einem Rotorblatt mit einer bestimmten Zusammensetzung (GFK-Blatt).

Ändert sich die prozentuale Zusammensetzung, dann ändern sich auch die Gutschriften.

Quelle IEkrW:
eigene Trendanalyse WEA
leistungsklassenbezogen

GFK-Anteil aus Rotorblättern 1-2 MW WEA GFK			
	Gew.-Anteil %	Masse (Mg)	Substituierter Stoff
Epoxid /Kunststoffanteil ***) gesamt aus Rotorblatt (1-2MW) im Brennstoffmix mit Hu = 35MJ/kg OS	42,8	7,83	Kohle
Glasanteil ***) aus Rotorblatt (1-2 MW) im Brennstoffmix	55,6	10,17	
			Sand/Ton
davon SiO₂:	54,00	5,49	
			Tonmineral
davon Al₂O₃:	14,00	1,42	
			Kalkstein/ Kreide
davon CaO:	20,00	2,03	
davon B₂O₃:	8,00	0,81	
davon Rest u.a. MgO, Fe₂O₃	4,00	0,41	
Balsaholzanteil ***) aus Rotorblatt (1-2 MW) im Brennstoffmix mit Hu = 15 MJ/kg OS	1,4	0,26	Kohle

Im Rahmen der Diskussion von Recyclingquoten sind die CO₂-Einsparungen bezogen auf ein Rotorblatt bzw. Gesamt WEA von Interesse.

Für WEA 1-2 MW wurden im Mittel 6,3 Mg für ein Rotorblatt
Ohne die Stahlbolzen aus dem Flansch von rd. 3% gehen
Verwertung mit der genannten stofflichen Zusammensetzung

Mit den vorgenannten Gutschriften und den notwendigen
Aufbereitung (nach der Erstbehandlung beim Recycling)
Rotorblatt bzw. GFK_{gesamt} (Rotorblätter + GFK und Nabenv
Mg) folgende CO₂-Gutschriften beim Recyclingpfad:

Einzel-Rotorblatt: 2605 kg CO_{2 eq} / Rotorblatt WEA 1-2 MW

Rotorblätter_{gesamt}: 7815 kg CO_{2 eq} / Rotorblatt WEA 1-2 MW

GFK/ Sandwich WEA_{gesamt}: 8762 kg CO_{2 eq} / Rotorblatt WEA 1-2 MW

Aber nur, wenn
auch das GFK-
Material aus dem
Flanschbereich
den Weg ins
Zementwerk
findet

20-25 Gew.%
vom Rotorblatt
sind im Flansch
verbaut

LCA-Bewertungen versus Zirkularität/ Ressourcenrelevanz

Neben LCA-Bewertungen sind beim Recycling auch die Fragen zur Zirkularität und Ressourcenrelevanz zu beantworten.

Wenn in 25 Jahren nur noch erneuerbare Energien am Markt sind, dann spielt das Global Warming Potenzial (GWP) beim Recycling keine große Rolle mehr.

Von daher betrachten wir in einer EPD zusätzlich zur Recyclingquote für ein Produkt

- auch die Kreislauffähigkeit der damit verbundenen Recyclingwege
- und betrachten diese Aspekte für folgende verbauten Stoffe nochmals getrennt
 - verbaute „energieintensive Stoffe“; > 2 –facher Heizwert von Röhöl
 - verbaute „kritische Rohstoffe“ gemäß EU-Listung
 - verbaute „gefährliche Stoffe“ gemäß EU-Regularien, soweit deren Wirkung im EoL-Material noch relevant sind

Bzgl. der Bewertung der Recyclingfähigkeit wird für die klima- und ressourcenrelevanten Materialien geprüft, ob für diese verbauten Stoffe Demontagehinweise zur Separation und vorhandene Recyclingverfahren, -wege vorhanden sind sowie deren Effektivität bzgl. einer realen Kreislaufwirtschaft bzw. Kaskadennutzung bewertet.

Tab. 1: Kenndaten zu GWP/ PED verbauter Primärprodukte; GFK/ CFK Rotorblatt

<u>CO₂-Fußabdruck high GWP-Rohstoffe</u> <u>bzw. PED</u> <u>(Lit. GaBi Version 10.5)</u>			Einstufung als kritischer Rohstoff	Masse im Rotorblatt (Gew.-%) EU 207	Energiekennzahl verbauter Materialien Angabe in MJ/ kg Rotorblatt**)
verbaute Primärprodukte Rotorblatt	GWP (kg CO ₂ -eq./kg)	PED _{ges.} (MJ/kg)	EU-Klassifizierung, Stand 2/2021*)		
Carbonfaser	20	407	indirekt Kokskohle	11,3	46,1
E-Glasfaser	1,71	29,4	wg. Anteil Borat	41,2	12,1
Epoxidharz, inkl. Härter	6,15	129		33,6	43,4
Hartschaum/ PVC	2,24	57,3			
Hartschaum/ PET	2,95	79,6		0,7	0,6
Beschichtung PU	4,3	95,7		1,5	1,4
Blitzschutz/Platten Al	8,8	166	indirekt Bauxit	0,6	1,0
Cu-Kabel 5-adrig	3,16	60,71			
Cu-Kabel 3-adrig	2,86	53,47			
Stahl (-bolzen)	1,97	27,4		3,0	0,8
Balsaholz	-1,02	16,3		7,9	1,3

*)= MITTEILUNG DER EU-KOMMISSION: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken; Brüssel 3.9.2020; wenn verbaut, dann immer gesonderte Betrachtung, ergo gefährliche Stoffe

)= Summe PED MJ/kg Stoff *Gew.% im Rotorblatt; > 20% von der Produktgesamtenergie, dann als **energieintensiver Stoff eingestuft

Recycling-, Verwertungsquote; Kreislaufunterstützung

Potenzielle Verwertungsquoten und Einstufung bzgl. Unterstützung einer Kreislaufwirtschaft, beispielhaft für ein GFK/ CFK-Rotorblatt, Stand der Technik und Markt 2021:

Verwertungsart	Marktzuordnung	Anteil am EoL - Output Gew.- % ^{*)}	Unterstützung Kreislaufwirtschaft Gew.- % ^{*)}
Recycling			
	etablierter Markt	42,4	3,4 (Stahl, NE) 3,8 (GFK-Mobiliar ¹⁾)
	entwickelnder Markt	10,5	2,7 (rCF für Thermoplast-Textilgewebe ²⁾)
Energ. Verwertung	etablierter Markt	42,0	
Verlust gesamt / Beseitigung		05,0	
Verwertung _{ges.} / Kreislaufführg. _{ges.}		95,0	9,9

^{*)}= Gew.-% Zusammensetzung Rotorblatt minus pauschal 5% Verlust durch Aufbereitung

1)= gemäß prozentuellem Anteil GFK WEA im Verhältnis Kapazität GFK Behandlung Mobilar am Gesamtanteil Recyclingkapazität Zement-, MPC-, Pflastersteinpfad, Mobilar

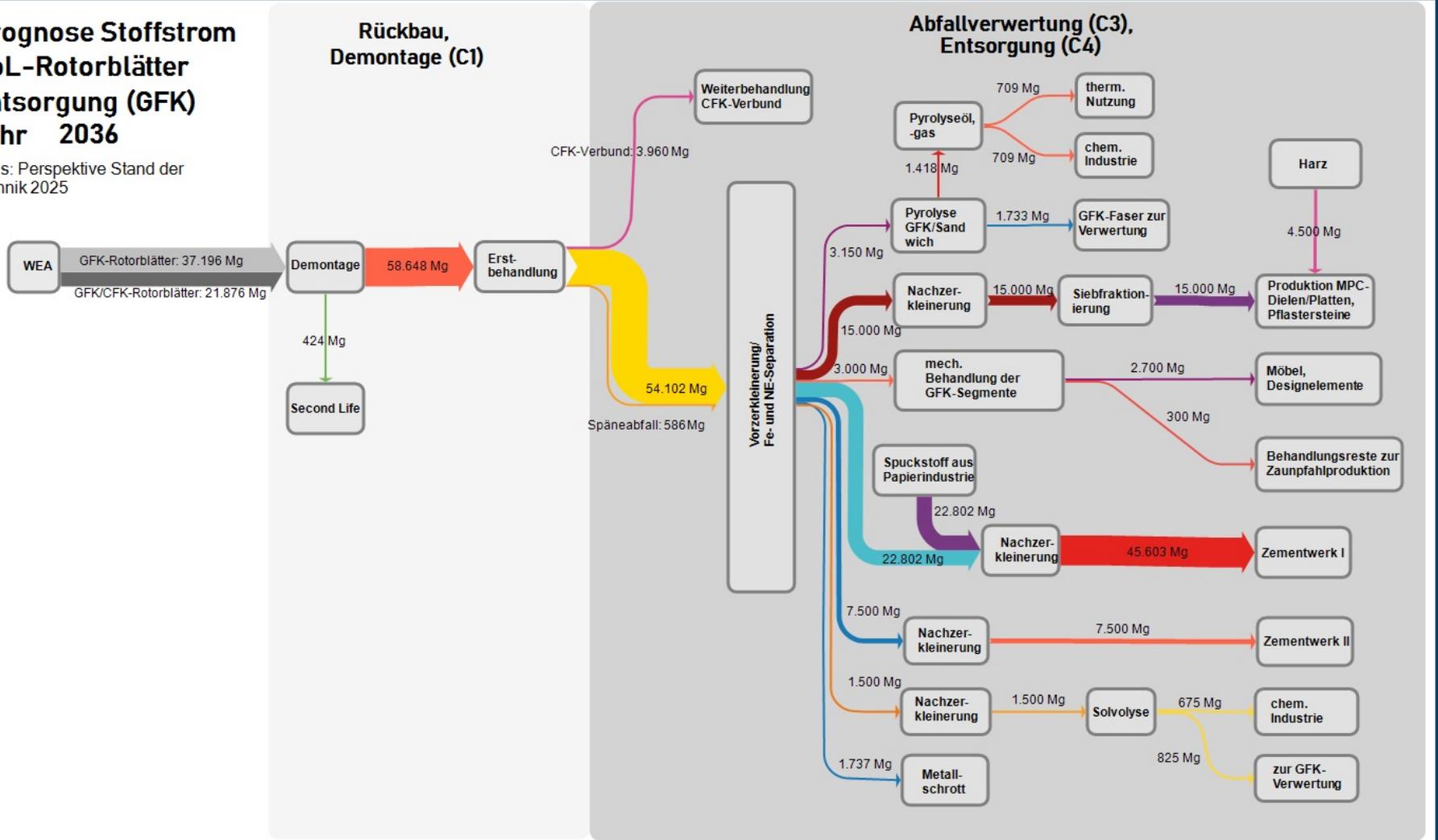
2)= da verlässliche Zahlen über Anteil am Gesamtumsatz dazu fehlen, Annahme hier 25% für Thermoplast-Textilgewebe und Substitution vCF oder vGF; der überwiegende Teil von rCF wird als Mahlgut < 0,5mm im Spritzguss verwendet; Substitution überwiegend Aluminiumleichtbauteile (hier nicht als Kreislauffähig bewertet)

Quo vadis - Rotorblattverwertung übermorgen 2030 ?

Abschätzung Technik- und Marktentwicklung 2025-2030, Stand Okt. 2021

Prognose Stoffstrom EoL-Rotorblätter Entsorgung (GFK) Jahr 2036

Basis: Perspektive Stand der Technik 2025



Nur transparente Daten ermöglichen Wegegabelungen

- Nicht nur von den Herstellern über verbaute Stoffe und Demontagehinweise
 - Hochwertiges Recycling und Kreislaufwirtschaft bedeutet, dass aus Abfällen wieder Produkte werden; und hier greift das Produktrecht inkl. REACH allumfassend
- Sondern auch von den Rückbauern, Aufbereitern und Verwertern
 - Nur damit lassen sich Screening-LCA's transparent gestalten und darüber verschiedene Recyclingoptionen bewerten sowie
 - Wege zu einer zukünftigen Kreislaufwirtschaft auch für bisher dafür nicht genutzte Komponenten einer Windenergieanlage finden

Ausblick

Materialdatenbanken über installierte WEA's treffen in einem Verwertungsnetzwerk auf Detailerfassungen von Rückbau-, Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren sowie deren Kapazitäten und sichern so Wege in ein hochwertiges Recycling und in eine Zirkularität

Zukunft: Simulation im Verwertungsnetzwerk

Agentenbasierte Modellierung dient der Simulation von Rahmenbedingungen, die für ein aktives Verwertungsnetzwerk nötig sind, und untersucht die Rollen der besonders relevanten Akteure (WEA-Hersteller, WEA-Betreiber, Rückbauer, Abfallaufbereiter und –behandler, Verwerter, Staat).

In Simulationen kann die Entwicklung der Preise, des Recyclingmarktes, der Recyclingmengen, der Recyclingkapazitäten und der Qualität des Recyclings für verschiedene Szenarien untersucht werden.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Kontakt Daten RecycleWind

www.recyclewind.hs-bremen.de

d.spuziak-salzenberg@iekrw.de

Tel. 0421 5905-3566

04205 2268 (home-office)

Michael Steinfeldt

mstein@uni-bremen.de

Tel. 0421 218-64891



Quelle Fraunhofer IWES 11.2020