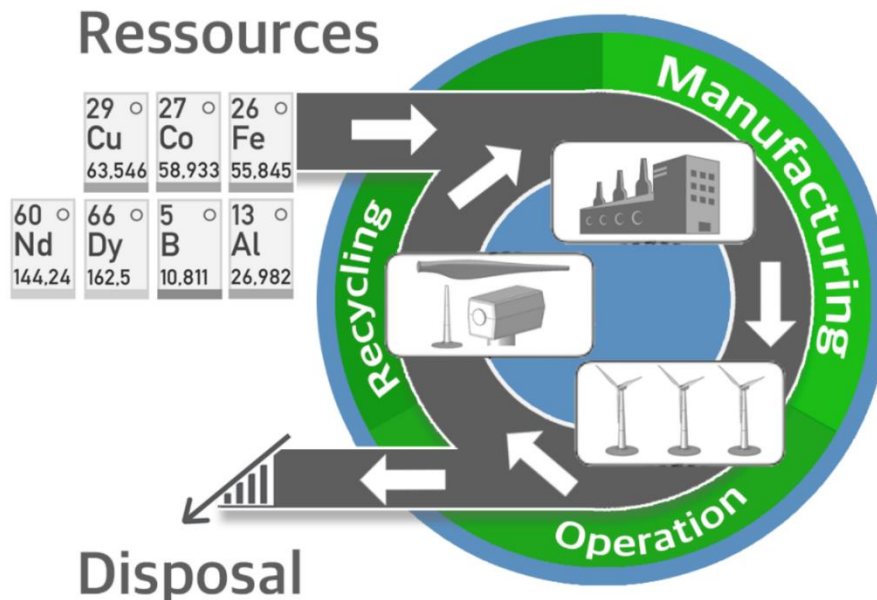


WindLoop
**Effiziente Rückführung von Selten-Erde- und Nicht-Eisen-Metallen aus
 Windenergieanlagen in den Stoffkreislauf**



Projektkonsortium:

	Partner / Adresse	Ansprechpartner/Kontakt
	KOORDINATION Lars Walch GmbH & Co. KG (Walch) Raiffeisenstraße 24 91460 Baudenbach	Matthias Walch +49 9164 99 81 10 matthias.walch@walch-recycling.de
	TU Bergakademie Freiberg Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART) Agr. Recyclingmaschinen Lampadiusstraße 4 09599 Freiberg	Dr. Hans-Georg Jäckel Tel.: +49 3731 39 36 92 hjaeckel@iam.tu-freiberg.de
	Hagedorn Service GmbH (Hagedorn) Werner-von-Siemens-Str. 18 33334 Gütersloh	Frank Kreimer Tel.: +49 151 550 55 127 kreimer@ug-hagedorn.de
	Nefino GmbH (Nefino) Andreaestraße 2a 30159 Hannover	Dr. André Koukal Tel.: +49 511 54688520 andre.koukal@nefino.de
	Assoziierte Partner / Adresse	Ansprechpartner/Kontakt
	Scholz Recycling GmbH (Scholz) Berndt-Ulrich-Scholz-Straße 1 73457 Essingen	Dr. Lutz Wuschke Tel.: +49 34206 614 344 lutz.wuschke@scholz-recycling.de

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Zusammenfassung

Die Zielstellung des DBU-geförderten FuE-Projektes WindLoop bestand im Wesentlichen darin, die Kreislaufführung von Rohstoffen aus dem Rückbau von Windenergieanlagen (WEA) auf eine möglichst wirtschaftliche vor allem aber nachhaltige Art und Weise neu zu organisieren. Neben den klassischen metallischen Werkstoffen Stahl, Kupfer und Aluminium, deren stoffliche Verwertung bereits seit langem Stand der Technik ist, liegen dabei insbesondere die in den WEA-Generatoren verbauten SE-haltigen Permanentmagnete im Fokus des Interesses. Nach Literaturangaben werden die in den Magnetlegierungen enthaltenen SE-Metalle Neodym, Dysprosium und Praseodym, die als strategische Rohstoffe gelten, bisher nur zu weniger als 1 % erfasst und der Wirtschaft als Sekundärrohstoffe zur Verfügung gestellt. Verursacht wird diese geringfügige Recyclingquote zum einen dadurch, dass nur wenig belastbare Informationen zur Altersstruktur, zu den Baugrößen bzw. zur stofflichen Zusammensetzung insbesondere der WEA-Generatoren innerhalb des deutschen WEA-Bestandes vorliegen. Zum anderen ist bisher nur sehr wenig über die Organisation der Rückbauaktivitäten sowie die Zerlegung der technologisch hochentwickelten WEA-Generatoren als Voraussetzung für die Erfassung der SE-Magneten bekannt geworden.

Zur Lösung des komplexen Verbundvorhabens, die Stoffkreisläufe für ausgewählte WEA-Konstruktions- und Funktionswerkstoffe nachhaltig zu schließen, wurde ein Konsortium aus Forschungsinstituten und Firmen gebildet, wobei jeder Projektteilnehmer einen wichtigen Komplex der Teilaufgaben entlang der Prozesskette zu bearbeiten hatte. In diesem Zusammenhang hatte die Fa. Nefino GmbH Hannover die Aufgabe, ein GIS-basiertes Datenbanksystem zur Verarbeitung aller für Rückbau- und Recyclingvorhaben relevanten WEA-Daten auf räumlicher und zeitlicher Ebene zu entwickeln. Diese Datenbasis sollte dann ein Rückbauunternehmen wie die Fa. *Hagedorn Osnabrück* in die Lage versetzen, anstehende Rückbauvorhaben effizient vor auszuplanen und die stoffliche Verwertung der enthaltenen Sekundärrohstoffe (Stahl, NE, SE, Beton u.a.) zielgerichtet zu organisieren. Als Projektkoordinator fungierte die Fa. *Walch Baudenbach*, die auf dem Recyclingmarkt als ausgewiesener Fachbetrieb für die Zerlegung großformatiger Werkstoffverbunde z.B. der WEA-Generatoren bekannt geworden ist. Die wissenschaftliche Begleitung der Zerlegearbeiten bei der Fa. Walch sowie die erforderlichen Untersuchungen zur Entmagnetisierung der Magnetschrotte wurden vom *Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART) der TU Bergakademie Freiberg* übernommen. Zur Charakterisierung des Zerlegeaufwandes und der zu erwartenden Kosten- und Erlösstrukturen erfolgten des Weiteren ein Variantenvergleich verschiedener Entmagnetisierungsmöglichkeiten und abschließend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Insgesamt ist festzustellen, dass im Rahmen des DBU-Projektes eine Reihe von wichtigen Teilergebnissen zur Schließung der Stoffkreisläufe bei WEA erzielt werden konnten. Diese ermöglichen, dass insbesondere die Rückbau- und Recyclingvorhaben zukünftig wesentlich effizienter und umweltschonender zu organisieren und durchzuführen sind. Der Zugriff auf detaillierte WEA-Daten verschiedenster Hersteller, Betreiber erlaubt darüber hinaus eine Vorausschau auf zukünftig pro Jahr anfallende Mengen an Sekundärrohstoffen (Metallen, Beton), die der Wirtschaft national zur Verfügung stehen und hilft dadurch den Importbedarf deutlich zu reduzieren. Die Forschungsergebnisse zur Entmagnetisierung erlauben darüber hinaus durch die Optimierung des Zerlegeaufwandes eine deutliche Reduzierung der Umweltbelastungen auf den klassischen Verwertungswegen, wobei sich bei allen Beteiligten Ansatzpunkte für weitere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ergaben.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Stand der Technik	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Arbeitsplanung.....	3
2	Analyse der Ausgangssituation und Entwicklung von Rückgewinnungstechnologien	4
2.1	Analyse der Verbauungstypen und Mengen von FeNdB-, NE-Metallen und Stahl in WEA.....	4
2.2	GIS-basierte Softwarelösung der Aufkommenssituation	6
2.3	Entmagnetisierungsuntersuchungen	9
2.4	Variantenvergleich Entmagnetisierung nach VDI 2225	13
3	Praktische Umsetzung und Systemintegration	15
3.1	Zerlegeuntersuchungen.....	15
3.2	Anwendung des WebGIS im praktischen Rückbau.....	18
3.3	Integration von Rückbauaktivitäten in bestehende Prozesse	20
4	Wirtschaftliche Bewertung und Marktanalyse.....	21
4.1	Analyse der Kostenstrukturen, Absatz- und Erlösoptionen der Recyclingprozesse	21
4.2	Marktpotenzialanalyse für das Recycling von FeNdB-Magneten aus WEA	22
4.3	Marktpotenzialanalyse für die Kreislaufführung der NE-Metall-Konzentrate aus WEA	23
4.4	Darstellung des Gesamtpotenzials der GIS-basierten Datenbanklösung	23
5	Fazit und Ausblick	26
	Literaturverzeichnis	28

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beitrag des Recyclings zur Deckung der Rohstoffnachfrage bei Technologiemetallen (Recyclingeinsatzquote) [1]	1
Abb. 2: Fließbild der Zusammenarbeit der Konsortialpartner in einem ganzheitlichen Ansatz zur Erfassung, Verarbeitung und Rückführung der SEM- und NE-Metalle	3
Abb. 3: Beispielhafter Screenshot des WebGIS	7
Abb. 4: Prognose der Anzahl zurückzubauender permanentmagnetisch erregter WEA in Deutschland (2022 - 2042) - On-/Offshore und jährliche Gesamtmenge	8
Abb. 5: Prognose anfallender Massen an PM in WEA durch Rückbau in Deutschland (2022 - 2042) - On-/ Offshore und jährliche Gesamtmenge	8
Abb. 6: Prognose der Anzahl zurückzubauender permanentmagnetisch erregter WEA in Deutschland (Rückbauzeitpunkt unbekannt) - On-/Offshore	8
Abb. 7: Prognose anfallender Massen an PM in WEA durch Rückbau in Deutschland (Rückbauzeitpunkt unbekannt) - On-/Offshore	8
Abb. 8: FeNdB-Magnetformate aus WEA-Generatoren (Typ a-c)	9
Abb. 9: Teslameter FM 302 mit Sonden - Fa. Projekt Elektronik GmbH Berlin [Quelle: Firmenprospekt]	10
Abb. 10: Versuchstechnik zur Entmagnetisierung der WEA-Magnete [Quellen: Firmenprospekte]	10
Abb. 11: Mittels FLIR-IR-Kamera ermittelte Magnettemperaturen T_{mag} in Abhängigkeit von der Heizdauer t_B (obere Temperaturgrenze 450°C)	11
Abb. 12: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit von der Magnettemperatur T_{mag}	11
Abb. 13: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer t_V	12
Abb. 14: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit vom massebezogenen Energie-Input w_{spezif}	12
Abb. 15: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 1	15
Abb. 16: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 2	16
Abb. 17: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 3	16
Abb. 18: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 4	16
Abb. 19: Abhängigkeit des Demontageaufwandes A_D von der Generatormasse m_{PMG}	17
Abb. 20: Rückbauphasen eines Repowering Projektes bei Hagedorn	19
Abb. 21: Anwendung der GIS-Datenbanklösung	19

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: WEA-Generatortypen [2]	4
Tab. 2: WEA-Generatorbauformen und PM-Einbauszustände (nach [3])	5
Tab. 3: Mittlere SE-Metallgehalte im WEA-Rückbau 2035, Preise [6] sowie SEM-Wertinhalte	6
Tab. 4: WEA-Hersteller mit dazugehöriger Anlagenanzahl und installierter Gesamtleistung	7
Tab. 5: Vergleichsmatrix für alternative Techniken am Beispiel des Kostenaufwandes bzw. der Produktqualität	13
Tab. 6: Vergleichsmatrix für alternative Techniken zur Zerlegung der WEA-Generatoren nach VDI 2225	14
Tab. 7: Demontageprotokoll (Charakterisierung des Generator-Ausgangszustandes)	17
Tab. 8: Demontageprotokoll (Personal-/gerätetechnischer Aufwand)	17
Tab. 9: Demontageprotokoll (Charakterisierung des Generator-Ausgangszustandes)	18

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
CFK.....	Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
Cu	Kupfer
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GIS.....	Geoinformationssystem
MaStR.....	Marktstammdatenregister
NE.....	Nicht-Eisen
PM	Permanentmagnet
SE	Seltene Erde
SEM	Seltene-Erde-Metall
UBA	Umweltbundesamt
WEA.....	Windenergieanlage

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Stand der Technik

Die Rückgewinnungsquote von SE-Magnetschrotten aus den Schrotten der Elektrotechnik/Elektronik, z.B. Festplatten, Lautsprecher, Mikrofone oder auch Windenergieanlagen (WEA) ist im europäischen Maßstab aktuell noch sehr gering (s. **Abb. 1**).

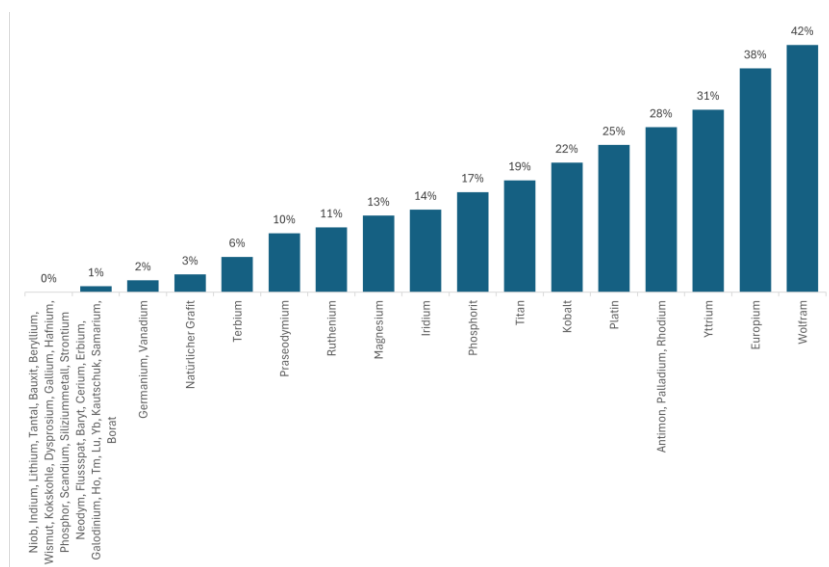


Abb. 1: Beitrag des Recyclings zur Deckung der Rohstoffnachfrage bei Technologiemetallen (Recyclingeinsatzquote) [1]

Der Beitrag des Recyclings zur Deckung der Rohstoffnachfrage bei Technologiemetallen (Recyclingeinsatzquote) bei den WEA-relevanten Seltenen-Erden-Metallen (SEM) Neodym (1%) und Dysprosium (0%) bestätigt dies [1]. Die Ursachen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Hierzulande sind die Kenntnisse zu Inhalten und Einbauzuständen der Seltenen-Erde (SE) -Magnete in End-of-Life-Geräten eher gering, da ein Großteil der Hersteller elektronischer Geräte und Baugruppen außereuropäisch ist. Da zudem die Magnethersteller überwiegend im asiatischen Raum angesiedelt sind, ist darüber hinaus der Abnehmermarkt für Magnetwerkstoff-Recyclate in Europa derzeit überschaubar. Die Erlöseite wird aktuell entsprechend auch lediglich von wenigen großen Magnetherstellern dominiert und reguliert.
- Die Identifikation und Abtrennung der außerordentlich leistungsfähigen SE-Magnete aus End-of-Life-Geräten sind komplex, da diese oft speziell geformt, gekapselt oder verklebt sind. Bei konventioneller Aufschlusszerkleinerung bilden die Magnetwerkstoffpartikel mit stark magnetischen Werkstoffen (z.B. Stahl) sekundäre Verbunde, die ohne eine energetisch aufwändige, thermische Behandlung (Entmagnetisierung) nicht mehr trennbar sind.

Bisher erfolgte bei zurückgebauten WEA-Generatoren zumeist eine weitestgehende Demontage der Maschinenhäuser. Dabei landen die Magnetschrotte, meist eingebaut in die Stahlmatrix des Rotor-/Statorsystems, überwiegend als Stahlschrott in den Elektro Stahlwerken und sind damit trotz ihres vergleichsweise hohen spezifischen Wertes verloren.

Eine grundlegende Herausforderung bezüglich der Rückgewinnbarkeit von SE-Magneten im Rahmen von WEA-Rückbauaktivitäten besteht somit darin, anlagentypspezifische Informationen über die Einbauzustände von SE-Magneten in den Generatoren zu generieren. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die fortlaufende Modernisierung der magneterregten Direktantriebe in der Vergangenheit bewirkte, dass sich neben den verbauten Mengen auch die Einbauzustände der Permanentmagneten

kontinuierlich geändert haben. Gleiches gilt für die Rückgewinnbarkeit von Nicht-Eisen (NE) -Metallen, deren verbaute Mengen und Einbauzustände ebenfalls je nach WEA-Konzept und Generatortyp eines WEA-Typs stark schwanken.

1.2 Zielsetzung

Der vorliegende Förderantrag soll einen nachhaltigen Ansatz zur deutlichen Verbesserung der Möglichkeiten zur Erfassung, Verarbeitung und Rückführung sowohl der hochwertigen Magnetwerkstoffe (SE-Metalle) als auch der NE-Metalle (Kupfer (Cu), Aluminium (Al)) aus WEA in den Wirtschaftskreislauf liefern.

Insofern über den WEA-Rückbau ein gewichtiger Beitrag zur Rohstoffversorgung mit strategischen Metallen erreicht werden soll, ist ein lückenloser Überblick über die zeitliche und regionale Verteilung der zu erwartenden SE- sowie NE-Inhalte zum Demontagezeitpunkt der WEA erforderlich. Für die Planung der Rückbauaktivitäten ist es deshalb empfehlenswert, eine Reihe von Beurteilungskriterien der Komponenten- bzw. WEA-Hersteller und Anlagenbetreiber sowie kommunaler Verwaltungsstrukturen im Rahmen eines Datenbanksystems zusammenzufassen. Des Weiteren sind geeignete Szenarien bezüglich der Demontage der SE-Permanentmagnete zu entwickeln und bezüglich der Handhabbarkeit vor Ort sowie des Aufwandes zu beurteilen. Insbesondere liegt der Fokus auf einer anwendungsreifen und wirtschaftlich darstellbaren Gesamtlösung zur Reduzierung der Metallverluste (SEM, Cu, Al) in der WEA-Schrottaufbereitung.

Es kann angenommen werden, dass die WEA-Verwertungsaktivitäten zukünftig größtenteils von den WEA-Betreibern ausgehen werden. Diese beauftragen spezialisierte Demontageunternehmen (z.B.: Fa. Hagedorn) als Generalauftragnehmer mit der Organisation des Rückbaus. Je nach installiertem Generatortyp (magnet- oder elektrisch erregt) werden von diesen dann die eigentlichen Schrottverwertungsunternehmen (z.B.: Fa. Walch für Magnetschrotte und Fa. Scholz für NE-Metallschrotte) angesprochen. Die Informationen zum Generatortyp bzw. die damit verbundenen Angaben zu den Metallressourcen kann der Generalauftragnehmer im Vorfeld aus der Geoinformationssystem (GIS) -basierten WEA-Datenbank der Nefino GmbH beziehen. Im Ergebnis dessen wird es möglich insbesondere die magneterregten Generatorsysteme vergleichsweise frühzeitig zu erkennen und den Zugriff auf die beträchtlichen SEM-Ressourcen noch vor der professionellen Verschrottung der Generatoren zu gewährleisten.

In wissenschaftlicher Hinsicht werden die Aktivitäten zur Demontage der WEA-Maschinenhäuser bzw. -Generatoren zur Rückgewinnung sortenreiner FeNdB-Magnetschrotte sowie im Weiteren der Aufschlusszerkleinerung von Cu- bzw. Al-haltigen Verbunden zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Cu-/Al-Produkte durch das IART der TU Bergakademie Freiberg begleitet. Das IART definiert dazu im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen und Variantenvergleichen die in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht optimalen Erfassungs- bzw. Verwertungskonzepte. Im Zusammenhang mit den Möglichkeiten zur Erfassung NE-metallhaltiger Schrotte (Cu/Al) aus WEA kann allgemein von guten bis sehr guten Aussichten bezüglich einer wirtschaftlichen Verwertung ausgegangen werden. Sollte darüber hinaus eine vollständige Vor-Ort-Erfassung der SE-Magnetschrotte gelingen, ist ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Grundversorgung der europäischen Industrien mit SE-metallhaltigen Konzentraten und somit der Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

1.3 Arbeitsplanung

Das Projekt wird von der Lars Walch GmbH & Co. KG in Baudenbach koordiniert. Für die Bearbeitung wurde ein schlagkräftiges Konsortium aus Spezialisten verschiedener Fachgebiete (Grundlagenforschung zu Aufbereitungs- und Recyclingmaschinen, WEA-Rückbau, NE- bzw. Magnetschrottaufbereitung und Softwareengineering & Data Analytics) formiert. **Abb. 2** verdeutlicht in einem Fließbild die angestrebte Zusammenarbeit der Konsortialpartner in einem ganzheitlichen Ansatz zur Erfassung, Verarbeitung und Rückführung der SEM- und NE-Metalle aus WEA in den Wirtschaftskreislauf.

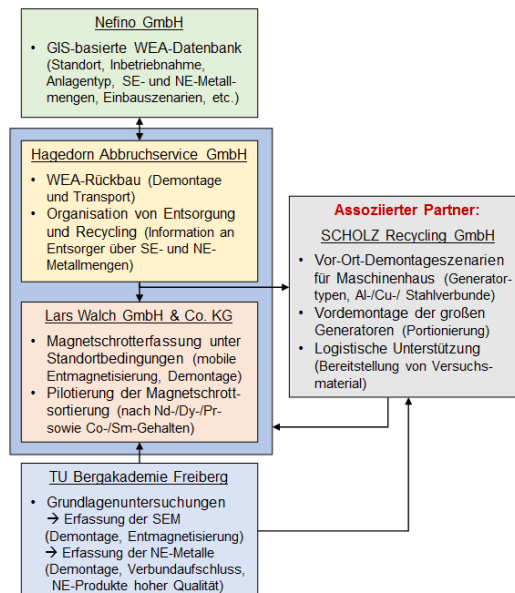


Abb. 2: Fließbild der Zusammenarbeit der Konsortialpartner in einem ganzheitlichen Ansatz zur Erfassung, Verarbeitung und Rückführung der SEM- und NE-Metalle

Das Gesamtvorhaben gliedert sich in fünf wissenschaftlich-technische Arbeitspakete. Zunächst erfolgt eine Analyse der Aufkommenssituation von SE-/NE-Metallen in Windenergieanlagen, wobei typenspezifische Untersuchungen und die Entwicklung einer GIS-basierten Softwarelösung zur Erfassung dieser Daten im Vordergrund stehen. Danach wird die Rückgewinnung der SE-/NE-Metallschrotte durch Labor- und Pilotmaßstabversuche untersucht, um die Verfahren zu optimieren und deren Wirtschaftlichkeit am WEA-Standort zu prüfen. Die Demontage und Rückgewinnung von SE-/NE-Metallen aus verschiedenen Baugruppen der WEA wird bewertet, wobei spezifische Energie- und Kostenfaktoren analysiert werden, um den Aufwand für die Rückgewinnung zu quantifizieren. Weiterhin werden Marktpotenziale für recycelte Materialien evaluiert, sowie Kosten-Nutzen-Analysen für die Demontage und Rückgewinnung durchgeführt. Abschließend wird das Gesamtkonzept zur Rückgewinnung und Kreislaufführung von SE-/NE-Metallen dargestellt und in eine umfassende GIS-basierte Datenbank integriert, um eine effiziente Lösung für die Zukunft zu entwickeln.

Die Forschungsergebnisse sollen im Rahmen wissenschaftlicher Tagungen der Öffentlichkeit präsentiert und in Form von Beiträgen in Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Darüber hinaus wird von der beteiligten Universität der wissenschaftliche Nachwuchs aktiv in die Arbeiten eingebunden (Bachelor-/Masterarbeiten, Dissertationen).

2 Analyse der Ausgangssituation und Entwicklung von Rückgewinnungstechnologien

Für die Untersuchungen der SE- und NE-Metall- sowie Stahlmengen in WEA in Deutschland wurde die Datengrundlage der Nefino GmbH verwendet (Stand: 07.2024). Nefinos WEA-Datenbank enthält alle Informationen des aktuellen deutschen WEA-Bestands, wie

- Marktstammdatenregister (MaStR)-Nummer,
- Standortinformationen,
- Hersteller und Turbinentyp der Anlage,
- grundlegende Charakteristika (Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Nennleistung),
- ggf. In- und Außerbetriebnahmedatum,
- Betriebsstatus der WEA,
- sowie detaillierte Eigentümerinformationen.

Für AP 1 wurde die Datenbank der Nefino GmbH um Angaben zum Antriebstyp des Generators und zum Turmtyp erweitert. Diese Anlageneigenschaften wurden verwendet, um die Materialmengen- gewichte (SE- und NE-Metalle sowie Stahl) zu bestimmen.

Für die Zuordnung der Antriebstypen und Turmtypen wurden eine Internetrecherche durchgeführt und das Netzwerk des RDRWind genutzt, um Kontakt mit führenden Rückbauunternehmen aufzunehmen und die entsprechenden Informationen den Datenblättern zu entnehmen.

2.1 Analyse der Verbaustypen und Mengen von FeNdB-, NE-Metallen und Stahl in WEA

Die Erfassung der in WEA-Generatoren verbauten SE-Hochleistungsmagnete (FeNdB) ist problematisch, weil eine ganze Reihe von nationalen sowie internationalen Herstellerfirmen verschiedene Generator- typen mit verschiedenen Magnet-Einbauszuständen im Markt untergebracht hat. Zudem ist über die letzten 20 Jahre eine ständige Zunahme der installierten Leistung zu verzeichnen, die sich in einem Spektrum unterschiedlicher Baugrößen äußert. Je nach Erregungstyp sowie Konfigurationen mit/ohne Getriebe sind die Generatoren hierbei durch unterschiedliche Mengen an SE-Magneten gekennzeichnet.

Tab. 1: WEA-Generatortypen [2]

Nr.	Erregung	Asynchrongeneratoren	Synchrongeneratoren
1	Elektrisch	mit Getriebe (High Speed) → VESTAS → SIEMENS	Direct Drive
			High Temperature Super Conductor
2	Permanent- magnetisch		mit Getriebe (middle speed)
			mit Getriebe (high speed) → VESTAS
			Direct Drive → SIEMENS → GOLDWIND → VENSYS
3	Reluktanz- getrieben		Reluktanz-Generator

Nach **Tab. 1** lassen sich WEA-Generatoren prinzipiell in elektrisch erregte Asynchron- (1), permanentmagnetisch erregte Synchron- (2) bzw. Reluktanzgetriebene Systeme (3) mit bzw. ohne Getriebe (Direktantrieb) untergliedern. Reluktanz-Generatoren haben in der Vergangenheit nur eine untergeordnete Rolle gespielt und enthalten wie auch die elektrisch erregten Asynchrongeneratoren keine SE-Magnete. Permanent (PM) -Synchrongeneratoren je nach Ausführung mit/ohne Getriebe sind dagegen mehr oder weniger stark magnethaltig.

Einen Überblick über die Vielfalt der Generatorbauformen mit jeweils verschiedenen Einbauzuständen der FeNdB-Magnete erlaubt **Tab. 2** (nach [3]). Die Bauformen haben sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt, so dass entsprechende Informationen für die Rückbauphase, insbesondere aber für die nachfolgende Generatorzerlegung von enormer Bedeutung sind.

Tab. 2: WEA-Generatorbauformen und PM-Einbauzustände (nach [3])

Nr.	Generatorbauform	Besonderheiten/PM-Einbauzustand
a)	Axial-Flux-Generator	AF-PMG: insbesondere für WEA mit vertikaler Welle
b)	Radial-Flux-Generator	RF-PMG: insbesondere für konventionelle WEA mit horizontaler Welle
c)	Transvers-Flux-Generator	TF-PMG: Kombination der Vorteile aus a) + b)
d)	Variabel-Flux-Generator	Syn-PMG: mit Permanentmagneten (PM) im Rotor
e)	Consequent-Pol-Generator	CP-PMG: mit PM auf Rotor und Ankerwicklungen im Stator
f)	Klauenpol-Hybrid-Generator	KP-PMG: mit PM im Rotor und Ankerwicklungen im Stator
g)	Flux-Switching-Generator	mit hybrider Erregung und PM im Stator

Die Rückführung der Stahlteile in die Elektro Stahlwerke erfordert in den meisten Fällen eine Portionierung der Hauptkomponenten Rotor und Stator. Transportgerechte Stückmassen bzw. Stückgrößen werden in der Regel durch Plasma- bzw. Brennschneiden realisiert, wobei neben dem hohen Energieverbrauch auch erhebliche Umweltbelastungen auftreten. Letztere werden vor Allem durch den Einsatz von Gasbrennern zur Entmagnetisierung der SE-Magnete verursacht.

Bestimmung der Mengen und des Verbaustyps von FeNdB-Magneten

Die Herleitung der Größe und der Gewichte von PM im Generator folgt komplexen Berechnungen über die Dimension des Rotors und Stators. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts war es nicht möglich, diese Dimensionen für den gesamten Anlagenbestand Deutschlands zu erfassen bzw. ausreichend anzunähern. Stattdessen wird ein empirischer Ansatz gewählt, der sich an Literaturangaben orientiert. Das Magnetgewicht wird in der Literatur häufig im Zusammenhang mit der Leistungsklasse und dem Antriebstyp des jeweiligen Anlagentyps betrachtet. Der Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) der Europäischen Kommission für Windenergie analysiert vier verschiedene Studien (darunter Ergebnisse von Jack Lifton und Avalon Rare Metals Inc). [4] Diese Studien zeigen, dass für getriebelose Generatoren ein durchschnittliches Magnetgewicht von 650 kg/MW ermittelt wurde. Bei Generatoren mit Getriebe, die mit mittlerer oder hoher Drehzahl arbeiten, liegen die Werte zwischen 160 kg/MW und 80 kg/MW.

Die Angaben der UBA-Studie bestätigen im Wesentlichen die aus der Nefino-Datenbank ableitbaren Abschätzungen der Magnetmengen [5]. Dort wird davon ausgegangen, dass in 2035 beispielsweise ca. 110 PM-WEA einer mittleren installierten Leistung von ca. 4 MW zurückgebaut werden. Handelt es sich dabei um Direct-Drive-Systeme enthalten diese ca. 286 t SE-Magnete. Eine analoge Abschätzung der Wertinhalte anhand einer beispielhaften Legierungszusammensetzung sowie aktueller Börsenpreise für SE-Metalle zeigt **Tab. 3**.

Tab. 3: Mittlere SE-Metallgehalte im WEA-Rückbau 2035, Preise [6] sowie SEM-Wertinhalte

Element	SE-Metallgehalt [%]	SE-Metall-Inhalt aus dem Rückbau in D 2035		
		[t]	[€/kg] ^[7]	[T €]
Nd	19,23	54,9978	90	4.950
Dy	1,81	5,1766	392	2.029
Pr	5,74	16,4164	121	1.986
				8.965

Für die Bestimmung der Stahl- und NE-Metallmengen hat die Hagedorn GmbH die Turmgewichte aus vergangenen Rückbauarbeiten von 203 verschiedenen WEA- und Turmausführungen zur Verfügung gestellt. Unabhängig von diesen Daten wurden die vom Umweltbundesamt (UBA) 2019 [5] definierten Turm-Cluster verwendet, um für alle Anlagen Deutschlands in Abhängigkeit der Nabenhöhe und des Anlagentyps den Turmtyp zu bestimmen. Ein stichprobenartiger Abgleich der Materialmengenabschätzungen mit den aktuellen Dokumentationen von Rückbauarbeiten hat gezeigt, dass sich mit der UBA-Methode die Materialmengen in WEA flächendeckend und präzise abschätzen lassen.

2.2 GIS-basierte Softwarelösung der Aufkommenssituation

Mit Hilfe eines webbasierten GIS soll Unternehmen eine effizientere Planung und die Identifikation des optimalen Standortes für Recyclinganlagen ermöglicht werden. Das System bietet nicht nur die detaillierte Datengrundlage, sondern visualisiert auch die räumliche Aufkommenssituation von FeNdB-Magneten und NE-Metallen.

Auf Basis der in Kapitel 2.1 erweiterten Datenbank der Nefino GmbH wurde eine interaktive GIS-basierte Software entwickelt. Das WebGIS kann über dem Link (s. Anhang A1) aufgerufen werden. Es veranschaulicht standortgenau alle zurzeit aktiven (blau) sowie bereits stillgelegte (rot) und geplante (grün) WEA in Deutschland. Ein Steuerfeld in der Benutzeroberfläche erlaubt das Filtern der Anzeige nach folgenden Möglichkeiten:

1. Anzeigen des gesamten Anlagenbestands/Anzeigen ausschließlich permanentmagnetisch erregter Anlagen.
2. Einfache Darstellung des gesamten Anlagenbestands oder als Bubble-Map zur Veranschaulichung der Stahl-, Kupfer- und Aluminiummengen in WEA anhand der Größe der Bubbles.
3. Filtern des Anlagenbestands nach einem bestimmten Anlagentyp.
4. Navigation anhand einer Such- und Zoomfunktion (nach Ort oder Postleitzahl).

Bei der Auswahl einer WEA wird dem Nutzer ein Steckbrief mit windpark- und anlagenspezifischen Informationen angezeigt (s. **Abb. 3**). Dieser enthält Angaben zu Nennleistung, Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Antriebskonzept. Zusätzlich sind Details zum Inbetriebnahmedatum, dem Turmtyp und das Maschinenhaus- und Turmgewicht sowie Informationen zu verbauten Materialien, wie Stahl, Kupfer, Aluminium und permanentmagnetischen Komponenten und deren Gewichtsanteilen (sofern vorhanden) enthalten.



Abb. 3: Beispielhafter Screenshot des WebGIS

Im Hinblick auf das Aufkommen von WEA mit PM-Generatoren zeigen sich sowohl zeitliche als auch räumliche Besonderheiten. Generell ist eine höhere Verbreitung von WEA im nördlichen Teil Deutschlands zu beobachten, insbesondere bei Anlagen mit permanenterregten Generatoren. Ein genauerer Blick auf die Hersteller dieser Anlagen zeigt, dass Siemens das größte Portfolio an verschiedenen Anlagentypen mit Permanentmagnetgeneratoren aufweist. Jedoch übernimmt Vestas mit 1.742 Anlagen und einer Gesamtleistung von rund 9,3 GW die führende Rolle bei der Integration von permanentmagnetisch erregten WEA. Dies liegt vor allem daran, dass diese Anlagen vorwiegend Offshore betrieben werden und eine hohe Leistung aufweisen. Die nachstehende **Tab. 4** präsentiert exemplarisch die sieben Hersteller von Windenergieanlagen mit der höchsten Anzahl an permanentmagnetisch erregten Anlagen sowie die dazugehörige installierte Gesamtleistung.

Tab. 4: WEA-Hersteller mit dazugehöriger Anlagenanzahl und installierter Gesamtleistung

Hersteller	Anzahl WEA in Deutschland	Gesamtleistung in MW
Vestas	1.742	9.277,3
Siemens	762	4.477,0
Enercon	566	2.683,4
Adwen	186	930,0
Vensys	168	434,4
GE	67	402,0
AREVA	11	55,0

Bisher haben nur acht Anlagen mit PM das Ende ihrer Lebenszeit erreicht, was auf die junge Technologie hinweist. In der Zukunft ist jedoch ein erheblicher Rückbau von WEA zu erwarten, wie Prognosen für den Zeitraum von 2022 bis 2042 zeigen (s. **Abb. 4** und **Abb. 5**). Dies betrifft sowohl Onshore- als auch Offshore-Anlagen, wobei ein signifikanter Anstieg des Rückbaus ab 2031 prognostiziert wird. Besonders Offshore-Anlagen werden durch ihre höhere Leistung große Mengen an recycelbaren Materialien wie Permanentmagneten erzeugen.

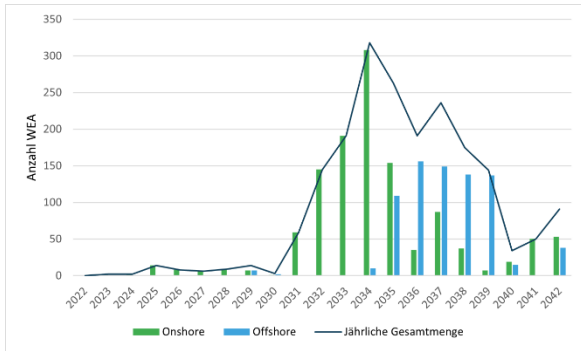


Abb. 4: Prognose der Anzahl zurückzubauender permanentmagnetisch erregter WEA in Deutschland (2022 - 2042) - On-/Offshore und jährliche Gesamtmenge

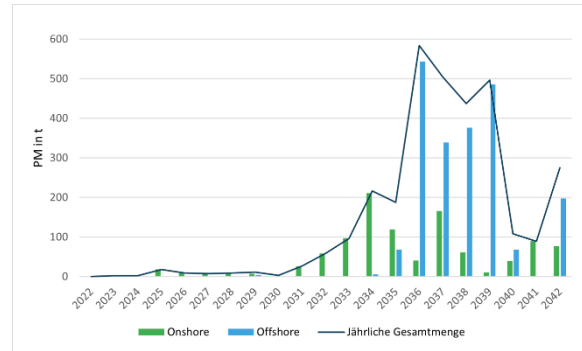


Abb. 5: Prognose anfallender Massen an PM in WEA durch Rückbau in Deutschland (2022 - 2042) - On-/Offshore und jährliche Gesamtmenge

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass sich eine beträchtliche Anzahl von WEA inklusive entsprechender Massen an PM noch in der Planung befindet. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, frühzeitig Strategien zur Bewältigung der Rückbaumengen zu entwickeln.

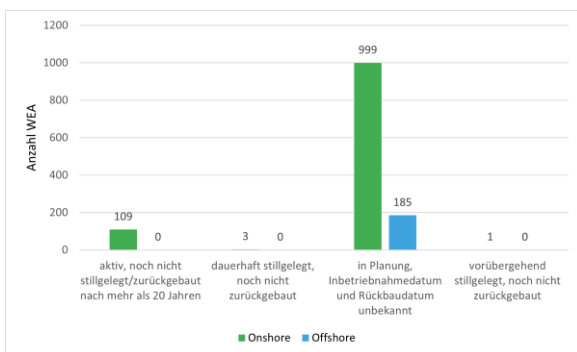


Abb. 6: Prognose der Anzahl zurückzubauender permanentmagnetisch erregter WEA in Deutschland (Rückbauzeitpunkt unbekannt) - On-/Offshore

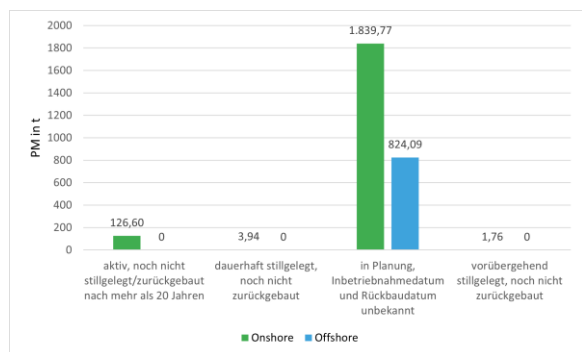


Abb. 7: Prognose anfallender Massen an PM in WEA durch Rückbau in Deutschland (Rückbauzeitpunkt unbekannt) - On-/Offshore

Die Planungen für neue WEA sind besonders in Nordrhein-Westfalen und nördlichen Bundesländern konzentriert, während in Bayern ein deutlich geringeres Wachstum zu verzeichnen ist. Die Prognosen zeigen zudem, dass ab 2023 ein langsamer, aber zunehmender Rückbau von permanentmagnetisch erregten WEA zu erwarten ist. Ein stärkerer Anstieg ist ab 2031 zu erwarten. Vor allem Offshore-WEA werden dabei eine entscheidende Rolle spielen, da sie aufgrund ihrer höheren Leistung große Mengen an wertvollen Materialien für das Recycling enthalten werden.

Um interessante geographische Räume mit hohem Potenzial der Rückführung von Kupfer, Aluminium und Stahl herauszustellen, wurden jeweils 300 WEA mit dem höchsten jeweiligen Materialanteil untersucht. Der Materialeinsatz in WEA variiert stark je nach Anlagentyp und Region. Aluminium wird verstärkt in Vestas-Anlagen verwendet, insbesondere bei Anlagen mit hoher Nabenhöhe und Stahlrohrtürmen. Kupfer findet vor allem in leistungsstarken Enercon-Anlagen in Küstennähe Verwendung, während Stahl in großen Mengen in Nordex- und Siemens-Anlagen vorzufinden ist. Geografisch zeigt sich eine leichtere Konzentration von Kupfer im Norden Deutschlands, während Aluminium und Stahl über das gesamte Land verteilt sind, jedoch in südlichen Regionen tendenziell weniger häufig auftreten.

Der Einsatz von Kupfer ist besonders in leistungsstarken WEA von Enercon zu beobachten, deren Leistung zwischen 4 und 7,5 MW liegt. Hierbei werden je Anlage etwa 21 bis 29 Tonnen Kupfer verwendet. Zu den entsprechenden Anlagentypen zählen unter anderem die E-112/6.0, E-114/4.5, E-115/4.2 EP3, E-126/6.0, E-126/7.5, E-141/4.2 und E-141/4.3 EP5 E1. Etwa 18 % der kupferreichen Anlagen wurden bereits genehmigt und befinden sich noch in der Planungsphase, wobei ein Teil der älteren Anlagen, wie eine E-112/6.0, bereits 2003 stillgelegt wurde. Hohe Kupferanteile kommen verstärkt in WEA in Küstenregionen an der Nordsee vor, vor allem in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen. Die genannten Anlagentypen sind werden jedoch nicht als Offshore-Anlagen betrieben. In den 300 Anlagen mit dem höchsten Aluminiumanteil liegt das Gewicht pro Anlage bei etwa 1-1,3 t. Auffällig ist, dass der Großteil (86 %) der betrachteten Anlagen noch in Planung ist. Besonders Vestas-Anlagen im 6-7,2 MW-Bereich weisen hohe Aluminiummassen auf. Weitere Modelle, in denen Aluminium in signifikanten Mengen verwendet wird, sind unter anderem die E-82/E2-2.3 (Enercon), GE 137/3.4 sowie die Siemens SG 167/8.0 und Nordex N175/6.X. Die Nabenhöhe der Stahlrohtürme dieser Anlagentypen liegt zwischen 169 m und 198 m. Bei der Betrachtung der hohen Stahlmassen fällt ebenfalls auf, dass sich ein Großteil dieser Anlagen noch in der Planungsphase befindet (89 %). 785-927 t Stahl werden pro Anlage verbaut, hauptsächlich in Anlagen im Leistungsbereich von 6 MW oder höher (N163/6.X, N175/6.X (Nordex), SG 155/6.6, SG 167/8.0, SG 179/6.6 (Siemens), V162/7.2 und V172/7.2 (Vestas)). In Betrieb befinden sich aktuell nur die N163/6.X und die Anlagen von Siemens der Gamesa-Reihe. Die großen Stahlmassen resultieren aus den hohen Nabenhöhen der Stahlrohtürme (164 m – 198 m). Hohe Aluminium- und Stahlmengen treten in allen Regionen Deutschlands auf, wobei es keine signifikanten Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland gibt. Allerdings gibt es Analogien zum allgemeinen Ausbau von WEA in Deutschland, sodass das Aufkommen in Süddeutschland abnimmt.

2.3 Entmagnetisierungsuntersuchungen

Um bezüglich der Materialrückgewinnung Erfahrungen zu sammeln, erfolgten am IART der TU Bergakademie Freiberg zunächst Entmagnetisierungsuntersuchungen an 3 Formaten von WEA-Einzelmagneten, die von der Fa. Walch zur Verfügung gestellt wurden und in **Abb. 8** dargestellt sind.

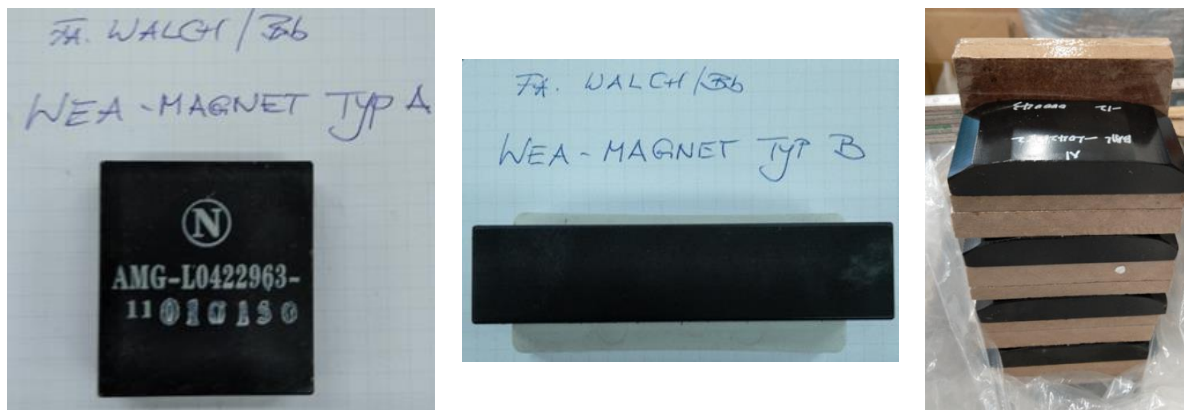


Abb. 8: FeNdB-Magnetformate aus WEA-Generatoren (Typ a-c)

Die in WEA-Generatoren eingesetzten FeNdB-Magnete sind durch außerordentlich hohe Magnetkräfte gekennzeichnet. Ein Maß für die Kraftwirkungen ist hierbei die magnetische Flussdichte B [mT]. Erwärmt man die Magnete über die sog. „Curie-Temperatur“ hinaus, verlieren die bisher ausgerichtet vorliegenden Elementarmagnete ihre Orientierung und das Magnetfeld schwächt sich ab oder geht ganz verloren. Die Curie-Temperatur bei den FeNdB-Magneten liegt je nach Legierungszusammensetzung bei ca. 310 °C, wobei für die vollständige Entmagnetisierung eine bestimmte Haltezeit, d.h. thermische Beanspruchungsdauer erforderlich ist.

Um das Ausmaß der bei verschiedenen Parametern jeweils erreichten Entmagnetisierung zu charakterisieren, definiert man einen Entmagnetisierungsgrad E (**Gl. 1**).

$$E = 100 - (B_x [mT] * 100 / B_0 [mT]) \quad (1)$$

Dieser beschreibt anhand des Messwertes B_x , um wieviel Prozent der Ausgangswert der magnetischen Flussdichte B_0 für die jeweilige Parameterkonstellation der Wärmebehandlung reduziert wurde.

Die Ermittlung der Flussdichten vor (B_0) bzw. nach den Versuchen (B_x) erfolgten mit dem in **Abb. 9** gezeigten Teslameter FM 302 der Fa. Projekt Elektronik GmbH Berlin unter Verwendung der Messsonde AS-NTM-2.

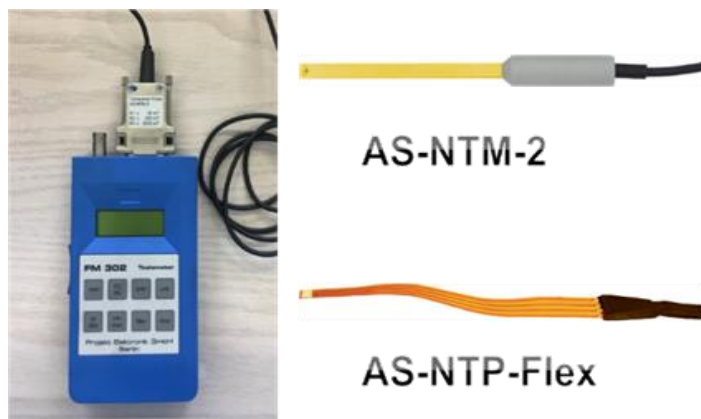


Abb. 9: Teslameter FM 302 mit Sonden - Fa. Projekt Elektronik GmbH Berlin [Quelle: Firmenprospekt]

Im Rahmen der Untersuchungen zur Entmagnetisierung der WEA-Magnete waren insbesondere die folgenden Abhängigkeiten des Entmagnetisierungsgrades E zu klären:

- a) von der Entmagnetisierungstemperatur T_{mag} [°C],
- b) von der Behandlungsdauer t_B [min] sowie
- c) vom spezifischen E-Input w_{spezif} [kWh/t]



Abb. 10: Versuchstechnik zur Entmagnetisierung der WEA-Magnete [Quellen: Firmenprospekte]
a) Muffelofen L15/13/C450, Fa. Nabertherm/Bremen; b) Heißluftgebläse HL 2020 E mit digitaler Temperaturanzeige, Fa. Steinel/Herzbrock; c+d) Lokale Entmagnetisierung mittels MFG LIK 10-400, Fa. Leifert/Oldenburg)

Als alternative Entmagnetisierungstechniken wurden neben der Ausgangsvariante mittels Muffelofen der Fa. Nabertherm Bremen (**Abb. 10a**), ein Heißluftgebläse HL 2020 E mit digitaler Temperaturanzeige der Fa. Steinel/Herzebrock (**Abb. 10b**) sowie ein MF-Generator LIK 10-400 der Fa. Leifert/Oldenburg (**Abb. 10c**) eingesetzt.

Insbesondere galt es zu klären, welche energetischen Vorteile zu erwarten sind, wenn man die Wärmebehandlung ausschließlich auf die magnethaltigen Bereiche fokussiert, d.h. anstelle der energieintensiven Gesamterwärmung eine lokale Erwärmung zur Entmagnetisierung nutzt.

Die Kontrolle der bei den verschiedenen Parameterkonstellationen erreichten Magnettemperaturen erfolgte dabei mittels Kontaktthermometer bzw. einer FLIR-Handykamera, mit welcher sich die Oberflächentemperaturen der Versuchsmagnete separat erfassen ließen. Eine Serie von IR-Bildern für eine ausgewählte Versuchseinstellung wird beispielhaft in **Abb. 11** gezeigt.

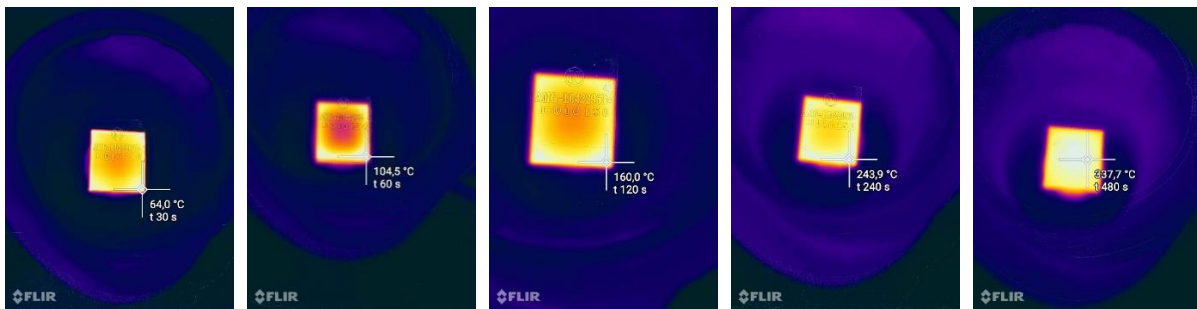


Abb. 11: Mittels FLIR-IR-Kamera ermittelte Magnettemperaturen T_{mag} in Abhängigkeit von der Heizdauer t_B (obere Temperaturgrenze 450°C)

Die Abbildungen belegen deutlich, welche Temperaturniveaus sich bei Magnettyp A und lokaler Entmagnetisierung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer einstellen, wenn eine obere Temperaturgrenze von 450 °C vorgegeben wird.

Als Schlussfolgerung lässt sich ableiten, dass die ausgewiesenen Temperaturen Maximalwerte an der Außenhaut darstellen. Weil die Tiefenwirkung lokaler Erwärmungstechniken nur gering ausgeprägt ist, muss die Entmagnetisierung in den Kernbereichen der Magneten weitestgehend durch eine vergleichsweise zeitaufwändige Wärmeleitung erfolgen.

Die Ergebnisse des Vergleichs der Standard-Ofenvariante (Gesamterwärmung) mit den unterschiedlichen lokalen Entmagnetisierungstechniken sind beispielhaft für den WEA-Magnettyp A in den folgenden Diagrammen (**Abb. 12 - Abb. 14**) zusammengefasst.

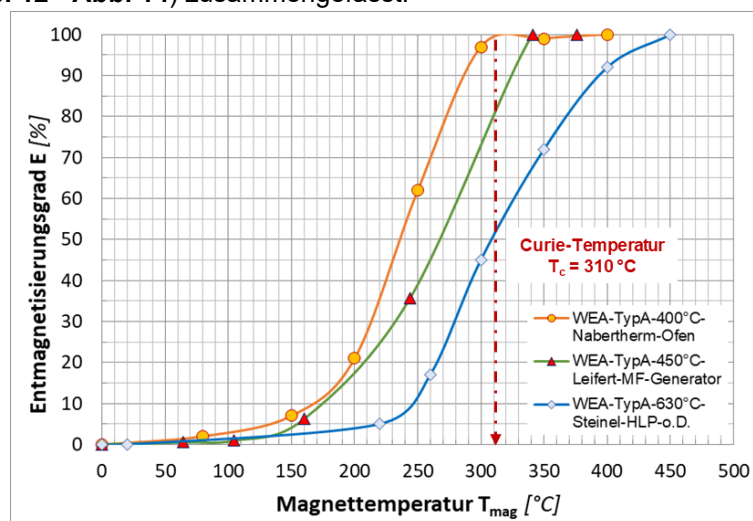


Abb. 12: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit von der Magnettemperatur T_{mag}

Aus **Abb. 12** wird deutlich, dass prinzipiell alle untersuchten Techniken Entmagnetisierungsgrade über 90 % realisieren können. Die Standardvariante einer Wärmebehandlung mittels Muffelofen weist dabei

mit $E \approx 100\%$ bei Curie-Temperatur $T_c = 310^\circ\text{C}$ den besten Entmagnetisierungseffekt aus. Es folgen mit ca. 80 % die lokal-elektrische bzw. ca. 50 % die lokale Wärmebehandlung mittels Heißluft. Hauptursache für die geringere Effizienz der lokalen Entmagnetisierung sind offensichtlich die Wärmeverluste durch eine vergleichsweise schlechte Wärmeleitung der SE-Magnete. Um auch im Magnetkern die Curie-Temperatur zu erreichen, muss deshalb mit deutlich höhere Ausgangstemperaturen (Heizleistungen) gearbeitet werden.

Wie **Abb. 13** zeigt, hat dies signifikante Auswirkungen auf die erforderliche Behandlungsdauer. Während die Entmagnetisierung im Muffelofen erst bei ca. 60 min maximal ist, lassen sich hier deutliche Vorteile für die lokale Wärmebehandlung nachweisen. Insbesondere die lokal-elektrische Variante beachtet durch einen extrem kurzen Zeitbedarf zur vollständigen Entmagnetisierung.

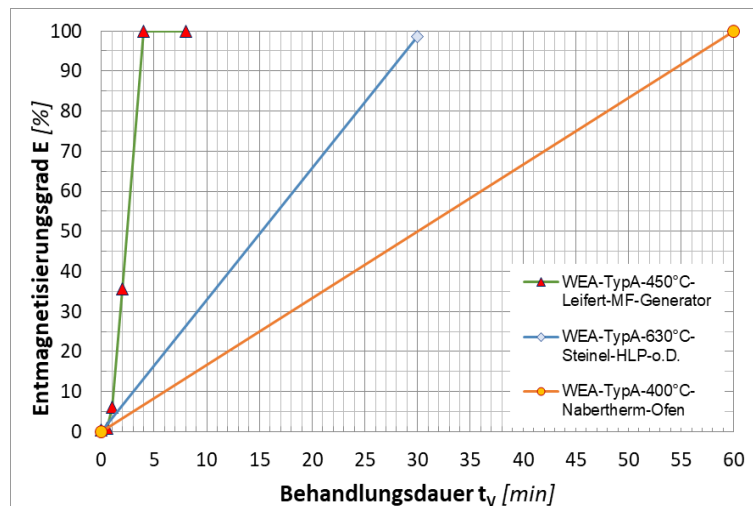


Abb. 13: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer t_v

Bezieht man den jeweiligen Energiebedarf zur Entmagnetisierung auf die behandelte Magnetmasse lässt sich für die verwendeten Geräte ein massebezogener Energie-Input w_{spezif} abschätzen.

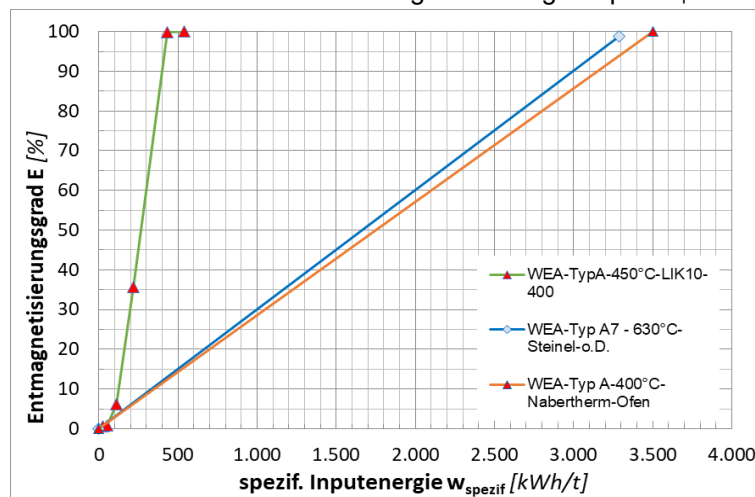


Abb. 14: Entmagnetisierungsgrad E in Abhängigkeit vom massebezogenen Energie-Input w_{spezif}

Abb. 14 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Entmagnetisierungsgrad E und dieser spezifischen Kenngröße. Trotz einer Inputtemperatur deutlich über der Curie-Temperatur (s. **Abb. 12**) weist die lokal-elektrische Entmagnetisierungsvariante auf Grund der geringen Behandlungsdauern (s. **Abb. 13**) die höchste Effizienz auf. Zur 100%-igen Entmagnetisierung benötigt diese Variante mit ca. 430 kWh/t nur ca. 13% der Input-Energie gegenüber der Standard-Ofenvariante. Ob sich eine Energieeinsparung dieser Größenordnung vom Labor- in den technischen Maßstab übertragen lässt, wäre im Rahmen weiterer Untersuchungen beim Industriepartner zu klären.

2.4 Variantenvergleich Entmagnetisierung nach VDI 2225

Der Variantenvergleich nach VDI 2225 stellt eine zertifizierte Möglichkeit dar, die Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher technischer Lösungen zur Zerlegung der WEA-Generatoren auf der Basis von Kriterien aus verschiedenen Bereichen, z.B. Logistik, maschinentechnischer Aufwand, Kosten, Produktqualität sowie Umwelt zu beurteilen. Ausgehend von der aktuellen Zerlegetechnologie des Schrottverwerfers wird zunächst ein Kriterienkatalog erstellt, wobei man den Hauptkriterien jeweils eine bestimmte Wichtung zuordnet, die dann auf eine größere Anzahl an Unterkriterien aufzuteilen ist. Diese werden dann nach einem Notensystem bewertet (s. **Tab. 5**). Die Bestnote 4 beschreibt hierbei die ideale technische Lösung, die alle Anforderungen optimal erfüllt. Auf diese fiktive Lösungsvariante bezogen, realisieren die Standard-Zerlegevariante der Fa. Walch sowie die alternativen technischen Lösungen entsprechende prozentuale Anteile.

Tab. 5: Vergleichsmatrix für alternative Techniken am Beispiel des Kostenaufwandes bzw. der Produktqualität

Aufwand/Kosten	Note	Qualität
Sehr hoch	0	Sehr schlecht
Hoch	1	Schlecht
Mäßig	2	Befriedigend
Gering	3	Gut
Sehr gering	4	Sehr gut

Als prinzipiell geeignete Zerlegevarianten, bestehend aus Zerlegungs- und Entmagnetisierungstechnologie, wurden die nachfolgend aufgeführten Technologien in den Vergleich einbezogen (s. **Tab. 6**):

- **Var. 1:** nur Plasmabrenner bzw. Entmagnetisierung mittels Gas-Schneidbrenner (1a ... aktuelle Zerlegevariante der Fa. Walch; 1b ... Zerlegung am WEA-Standort)
- **Var. 2:** Plasmabrenner und Entmagnetisierung mittels Großofen
- **Var. 3:** Plasmabrenner und lokal-elektrische Entmagnetisierung
- **Var. 4:** Plasmabrenner und lokale Entmagnetisierung mittels Heißluftgebläse

Im Ergebnis dieser Vorgehensweise ergibt sich ein guter Überblick über die Wertigkeit der Technologien, wobei sich zeigt, dass auf den Einsatz des Plasmabrenners zur Trennung großer Metallquerschnitte prinzipiell nicht verzichtet werden kann. Das Einsparpotential durch alternative Entmagnetisierungstechnologien ist jedoch signifikant ausweisbar. Dies beruht vor allem auf deutlich geringeren Investkosten sowie einem reduzierten Energiebedarf der Zerlegevarianten mit lokaler Entmagnetisierung. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass damit auch die durch den Einsatz des Gasbrenners unvermeidlichen Umweltbelastungen reduzierbar sind.

Tab. 6: Vergleichsmatrix für alternative Techniken zur Zerlegung der WEA-Generatoren nach VDI 2225

Kriterienkatalog	Wichtung	Vordemontage:		Variante 1: Fa. Walch				Variante 2: Ofen+Brenner		Variante 3: Brenner+MFG		Variante 4: Brenner+HLP	
		ideale Lösung	Wertung	Schrottplatz Plasmabrenner Schneidbrenner	vor Ort Plasmabrenner Schneidbrenner	Schrottplatz Plasmabrenner Ofen (Bauteil)	Schrottplatz Plasmabrenner Ofen (Bauteil)	Schrottplatz Plasmabrenner lokal (elektrisch)	Schrottplatz Plasmabrenner Heißluft (lokal)				
Logistik	10%												
Vor-Ort-Zerlegeaufwand	5	4	0,2	3	0,15	1	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Transportaufwand	5	4	0,2	1	0,05	1	0,05	1	0,05	1	0,05	1	0,05
Masch.-technischer Aufwand	35%												
Vordemontage	10	4	0,4	3	0,30	2	0,20	3	0,30	3	0,30	3	0,30
Zerteilen	10	4	0,4	2	0,20	2	0,20	3	0,30	1	0,10	1	0,10
Entmagnetsieren	8	4	0,32	3	0,24	3	0,24	0	0,00	3	0,24	1	0,08
Produkthandling	3	4	0,12	3	0,09	3	0,09	2	0,06	3	0,09	3	0,09
Flexibilität/Scalierbarkeit	4	4	0,16	3	0,12	3	0,12	2	0,08	3	0,12	3	0,12
Kosten	20%												
Gerätekosten/Invest	8	4	0,32	3	0,24	3	0,24	1	0,08	3	0,24	2	0,16
Verbrauch Gas	4	4	0,16	1	0,04	1	0,04	2	0,08	2	0,08	2	0,08
Verbrauch Strom	3	4	0,12	2	0,06	2	0,06	3	0,09	2	0,06	2	0,06
Peripherie	5	4	0,2	2	0,10	2	0,10	1	0,05	2	0,10	2	0,10
Produktqualität	20%												
Magnetprodukt	7	4	0,28	3	0,21	3	0,21	3	0,21	3	0,21	3	0,21
Cu-Produkt	4	4	0,16	3	0,12	3	0,12	3	0,12	3	0,12	3	0,12
Stahlprodukt	4	4	0,16	2	0,08	2	0,08	2	0,08	2	0,08	2	0,08
Metallverluste	5	4	0,2	1	0,05	1	0,05	2	0,10	3	0,15	2	0,10
Umweltkriterien	15%												
Abluft/Staubbelastung	6	4	0,24	0	0,00	0	0,00	1	0,06	2	0,12	1	0,06
Schwermetallbelastung	3	4	0,12	1	0,03	1	0,03	2	0,06	2	0,06	2	0,06
Abwasser	3	4	0,12	4	0,12	4	0,12	4	0,12	4	0,12	4	0,12
Genehmigungsfähigkeit	3	4	0,12	2	0,06	2	0,06	2	0,06	3	0,09	3	0,09
		Summe	4	Summe	2,26	Summe	2,06	Summe	2,05	Summe	2,48	Summe	2,13
	100%	%	100,0	%	56,5	%	51,5	%	51,3	%	62,0	%	53,3

Vorbehaltlich ihrer Erprobung im technischen Maßstab kann Variante 3 mit ca. 62 % der Idealtechnologie als Vorzugsvariante zur Zerlegung und Entmagnetsierung der WEA-Generatoren ausgewiesen werden.

3 Praktische Umsetzung und Systemintegration

3.1 Zerlegeuntersuchungen

Aus den Recherchen zur Rückbauproblematik bei WEA ergibt sich, dass es selbst bei langsam weiter steigenden Stilllegungszahlen pro Jahr erst ab ca. 2032 nennenswerte PM-Mengen und wirtschaftlich interessante Wertinhalte geben wird. Dies resultiert u.a. daraus, dass die PM-haltigen Generatoren, vor allem die Direct-Drive-Systeme, mit vergleichsweise großen PM-Inhalten erst dann die Altersgrenze von 20 Jahren erreichen.

Aufgrund der komplizierten Einbausituationen der Permanentmagnete war hier von vornherein mit einem entsprechend großen Zerlegeaufwand mittels kostenintensiver Plasma- bzw. Gasbrenner zu rechnen. Da die in diesem Zusammenhang erwartbaren Gasemissionen eine starke Umweltbelastung darstellen, stellten sich im Projektrahmen einige Fragen bezüglich der Möglichkeiten, sowohl den Zerlegeaufwand (personell, energetisch) als auch die schädlichen Gasemissionen durch den Einsatz alternativer Zerletechniken deutlich zu reduzieren.

Im Rahmen des DBU-Projektes WindLoop galt es daher schwerpunktmäßig, die Randbedingungen der Generatorzerlegung (Fa. Walch) zu erfassen sowie Untersuchungen zu den Möglichkeiten alternativer Entmagnetisierungstechniken (IART/TU BAF) durchzuführen. Eine wesentliche Voraussetzung dafür war die Verfügbarkeit geeigneter WEA-Generatoren bzw. WEA-Permanentmagnete im Projektzeitraum. Durch das vorbildliche Engagement der Fa. Walch und deren Kontakte in die Windenergiebranche konnte das Problem letztendlich gelöst werden.

Von 2022 bis 2024 erfolgte bei der Fa. Walch am Standort Baudenbach die Demontage von 5 WEA-Generatoren, wovon 4 Exemplare Permanentmagnete enthielten und 1 Exemplar elektrisch erregt war. Die **Abb. 15 - Abb. 18** geben auszugsweise Einblick in die Arbeitsschritte, die von der Anlieferung bis zur Verpackung der marktfähigen Produkte zu vollziehen sind.

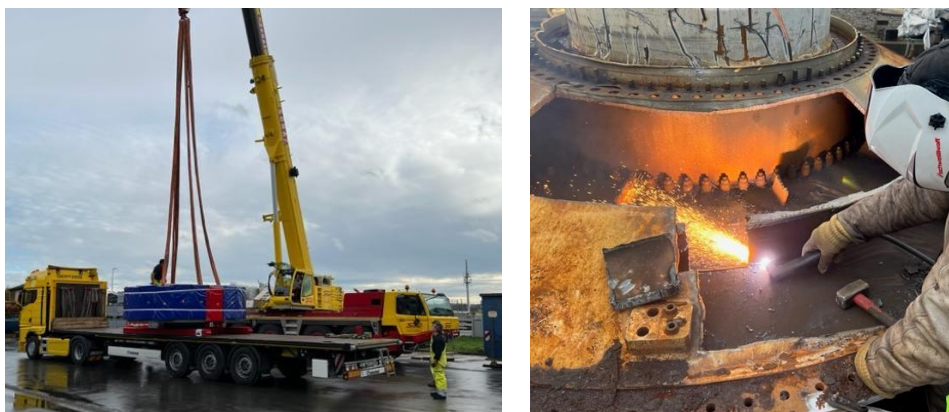


Abb. 15: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 1
links: Anlieferung eines PM-Generators mittels Schwertransport und Entladung 11/22
rechts: Zerlegung mittels Plasmabrenner



Abb. 16: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 2
links: Stahlteile mit Rotorelement
rechts: Statorwand



Abb. 17: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 3
links: Rotoroberfläche mit Trafoblechen und SE-Magneten
rechts: Statorwand



Abb. 18: Fotodokumentation der Generatorzerlegung am Standort Baudenbach 4
links: Produktqualität Cu-Wicklungen
rechts: Produktqualität SE-Magnete

Zur Charakterisierung der Demontageabläufe, des Zerlegeaufwands und daraus resultierend der stofflichen Zusammensetzung wurden spezielle Demontageprotokolle (**Tab. 5-7**) entwickelt sowie jeweils separate Fotodokumentationen (s. **Abb. 6-9**) erstellt.

Tab. 7: Demontageprotokoll (Charakterisierung des Generator-Ausgangszustandes)

Demontage-Protokoll		
Firma		
Ort		
1. Char. Ausgangszustand		
Hersteller	XX	
Bauelement	Generator	
Typ	XX	
Baujahr	XX	
Installierte Leistung	XX	kW
Gesamtmasse	XX	t

Tab. 7 zeigt einen Ausschnitt aus dem Demontageprotokoll, welches die Zuordnung der Ausgangsdaten zu den Listen zur Charakterisierung des Zerlegeaufwands (Tab. 8) sowie zur stofflichen Zusammensetzung (Tab. 7) erlaubt. Da am Markt ein starker Wettbewerb insbesondere um die metallischen WEA-Komponenten einschließlich der Permanentmagnete herrscht, sind die konkreten Daten der jeweiligen Generatoren weitestgehend anonymisiert. Die frei gegebenen prozentualen Anteile bestätigen aber Erfahrungswerte bzw. aus Veröffentlichungen zum Thema bekannt gewordene Verhältnisse.

Tab. 8: Demontageprotokoll (Personal-/gerätetechnischer Aufwand)

Pos.	Gerät	Arbeitsstunden		Spezif. Verbrauch *		E-Bedarf, ges. **
		[h]	[%]	[l/h]	[kW/h]	[%]
1	Personal	x	ca. 50	-	-	-
2	Plasmabrenner	x	ca. 8	x	x	x
	Gasbrenner	x	ca. 12	x	x	x
3	Flex	x	ca. 25	x	x	x
4	Bagger	x	ca. 3	x	x	x
5	Gabelstapler	x	ca. 2	x	x	x
6	Sonstiges	x	< 1	x	x	x
		x	100,0	x	x	x

So lässt sich Tab. 8 entnehmen, dass der händische Zerlegeaufwand insgesamt sehr hoch und mit ca. 50 % stark personallastig ist. Einen weiteren Schwerpunkt (ca. 45 %) machen mit den Brennern und der Flex energieintensive Werkzeuge aus, die z.T. für umfangreiche Emissionen bekannt sind.

Insgesamt kann man aus den auf wenigen WEA-Generatoren beruhenden Ergebnissen bereits interessante Tendenzen ableiten. Beispielhaft sei hier die Abhängigkeit des zeitlichen Demontageaufwandes A_D von der Generator Masse m_G genannt, welche in Abb. 19 in Diagrammform dargestellt ist.

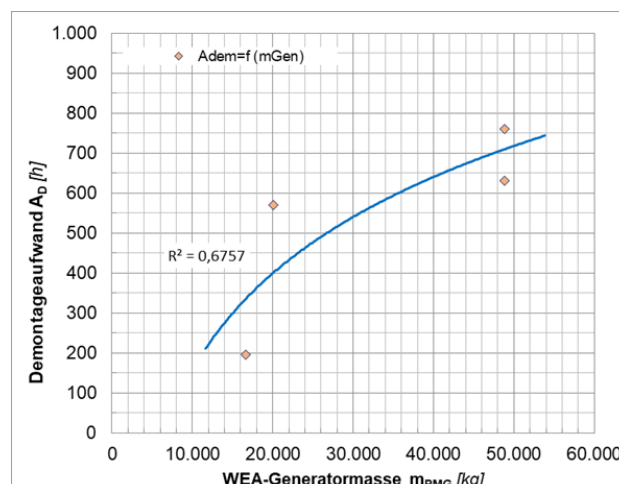


Abb. 19: Abhängigkeit des Demontageaufwandes A_D von der Generatormasse m_{PMG}

Als Fazit ergibt sich ein vergleichsweise starker Anstieg des zeitlichen Aufwandes zur WEA-Demontage mit der Generatorbaugröße, wobei der degressive Anstieg auf einen höheren Aufwand bei den aktuell kleineren Typen hinweist. D.h., eine Verdopplung der Generatormasse von ca. 25 auf ca. 50 t bewirkt dann nur noch eine Zunahme des Demontageaufwandes um ca. 30 %.

In **Tab. 9** wurden die anhand eines Werkstoffkatalogs und der marktfähigen Produktklassen jeweils für Rotor und Stator separat aufgelisteten Daten zu einer Gesamtzusammensetzung für den kompletten Generator zusammengefasst. So wird dokumentiert, welche Massenanteile an sekundären metallischen Werkstoffen bzw. zu entsorgenden Abfällen nach der Zerlegung zu erwarten und hinsichtlich ihrer Vermarktung zu berücksichtigen sind.

Tab. 9: Demontageprotokoll (Charakterisierung des Generator-Ausgangszustandes)

Baugruppe		Werkstoff	Masseanteil	
		[-]	[kg]	[%]
1	WEA-Generator	Stahl, unlegiert	x	ca. 80
2	WEA-Generator	Stahl, legiert	x	ca. 4
3	WEA-Generator	Cu-Draht	x	ca. 6
4	WEA-Generator	Al-Band	x	0
5	WEA-Generator	FeNdB-Magnete	x	ca. 5
6	WEA-Generator	Kunststoff 1	x	ca. 3
7	WEA-Generator	Kunststoff 2	x	< 1
8	WEA-Generator	Lacke/Kleber	x	< 1
9	WEA-Generator	Sonstiges	x	< 0,2
10	WEA-Generator	Verluste	x	< 0,3
		gesamt	x	100,0

Die Zerleguntersuchungen haben ergeben, dass sich der Personalaufwand zukünftig wohl kaum weiter verringern lassen wird. Bereits nach wenigen Zerlegungen konnte das prinzipielle Prozedere weitestgehend optimiert werden. Auf die Produktmassen bezogen ist die Zerlegung kleinerer Generatoren aber grundsätzlich aufwändiger als bei großen. Auch wird sich der Aufwand für das Portionieren der Generator-Massivteile (Rotor/Stator) mittels Plasmabrenner kaum deutlich reduzieren lassen. Eine mechanisierte Zerlegung erscheint zwar prinzipiell möglich, jedoch dürfte die Vielfalt an Geometrien und Baugrößen alternative Zerlegevarianten maßgeblich verkomplizieren und damit verteuern. Den größten Spielraum für alternative Techniken bietet daher die Entmagnetisierungstechnologie mittels Gasbrenner, die auch maßgeblich am Energieverbrauch sowie an den Umweltbelastungen beteiligt ist. Als aktueller technischer Stand der Entmagnetisierung wurde die Ofenvariante herangezogen, bei welcher Rotor bzw. Stator separat und als Komplettlement einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Als wesentlicher Kritikpunkt dieser Variante gilt insbesondere die Tatsache, dass der Energiebedarf zur Erwärmung der überwiegend metallischen Gesamtmasse des WEA-Generators über die Curietemperatur hinaus ein Vielfaches der Inputenergie zum Entmagnetisieren nur der SE-Magneten annehmen dürfte.

3.2 Anwendung des WebGIS im praktischen Rückbau

Im Rückbauprojekten von Windkraftanlagen kann das Projekt in die Phasen Vertrieb, Planung, Durchführung und Abschluss untergliedert werden (s. **Abb. 20**). Das WebGIS kommt dabei in der Vertriebs- und Planungsphase zum Einsatz.

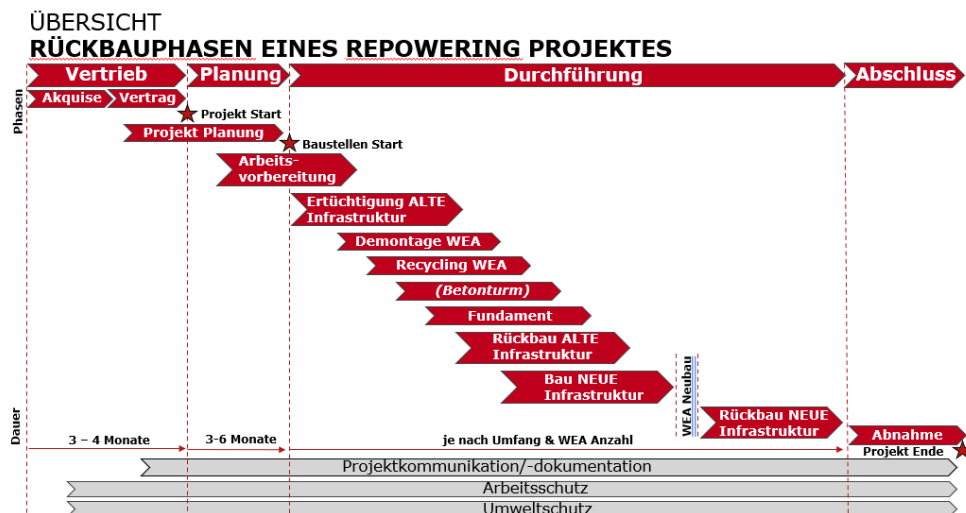


Abb. 20: Rückbauphasen eines Repowering Projektes bei Hagedorn

Damit Hagedorn ein möglichst genaues Angebot für ein Rückbauprojekt abgeben kann, werden folgende Dokumente benötigt: Bodengutachten, Gewichte der einzelnen Komponenten der Windkraftanlage (u.a. Gondel, Nabe, einzelne Turmsegmente), Informationen zu den Einbauten in den Anlagen, Fundament- und Betonturmpläne, Anforderungen an Erdarbeiten, Windparklayout sowie die Abbaureihenfolge der Anlagen.

Bei vielen alten Bestandsanlagen ist es eine besondere Herausforderung Herstellerinformationen bezüglich der Gewichte herauszufinden. Ein Teil der Hersteller ist inzwischen auch nicht mehr am Markt vertreten. Diese Informationen werden dringend benötigt, um z.B. den passenden Kran für die Demontage auszuwählen, für die Kalkulation der erwarteten Schrottvergütungen sowie um den Arbeitsaufwand für das Recycling zu bestimmen.

Hier kann das WebGIS unterstützen, die fehlenden Informationen zu beschaffen. Es werden innerhalb Deutschlands alle Windparks mit Punkten angezeigt. Es kann nach Anlagenmodellen gefiltert werden und nach Auswahl eines Windparks werden die Betreiberdaten sowie Informationen zu Gewichten und Permanentmagneten angezeigt. Diese Informationen können mit in die Angebotskalkulation einfließen.

Für die Rückbauprojekte aus dem Jahr 2023 war die Vertriebsphase bereits abgeschlossen als die WebGIS zur Verfügung stand. Die Informationen konnten aber zum Abgleich der vom Kunden übermittelten Anlagendaten verwendet werden. Am folgenden Beispiel sieht man in der folgenden Abbildung die Lage der Anlage sowie auf der rechten Seite die Informationen bezüglich Anlagentyp und Gewichten.

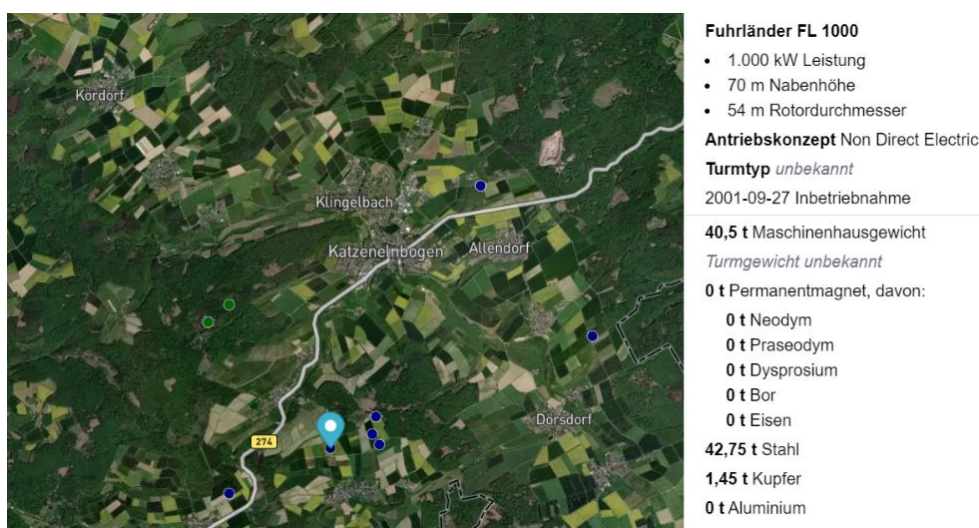


Abb. 21: Anwendung der GIS-Datenbanklösung

Im Abgleich mit den übermittelten Daten des Kunden kann eine Übereinstimmung bei Anlagentyp, Leistung und Nabhöhe festgestellt werden, sowie des Maschinenhausgewichts von 41 t (s. **Abb. 21**).

Transportdaten für FL 1000 NH 70 m						
Bauteile	Abmessungen / m			Gewicht / to	Fläche / m ²	Volumen / m ³
	Länge	Breite	Höhe			
Maschinenhaus	7,40	3,00	3,30	41,0	22,2	73,3
Rotornabe	2,10	2,10	1,60	5,0	3,8	7,1

Nach dem Rückbau der Anlage wurden die entsprechenden Schrotte zur Weiterverwertung an ein entsprechendes Entsorgungsunternehmen übergeben. Anhand der übermittelten Wiegescheine konnte festgestellt werden, dass insgesamt 1,295 t an Kupferkabeln entsorgt wurden. Da bei den Wiegescheinen für Stahl auch die Massen des Turms enthalten sind, kann der Wert von 41 t für die Gondel nicht verifiziert werden. Separiert liegt nur das Gewicht des Getriebes von 19,8 t vor.

3.3 Integration von Rückbauaktivitäten in bestehende Prozesse

Die Integration einer GIS-basierten Datenbank in die bestehenden Prozesse von Rückbauaktivitäten bietet eine Vielzahl von Vorteilen und kann den gesamten Rückbauprozess von WEA effizienter gestalten. Ein zentraler Vorteil liegt in der Visualisierung der deutschlandweiten Verteilung der WEA. Die Übersicht dient nicht nur als Datenquelle der geographischen Lage der Anlagen, sondern bietet auch Einsicht in das potenzielle Aufkommen von Materialien wie Stahl, Kupfer und Aluminium. Diese Informationen ermöglichen es, fundierte Prognosen für die zukünftige Verwertungs- und Vertriebsstrategien zu erstellen.

Darüber hinaus erleichtert die Datenbank die Beschaffung fehlender Herstellerinformationen, insbesondere zu den Gewichten einzelner Anlagenkomponenten. Diese Angaben sind entscheidend, um den Aufwand für die Verwertung und das Recycling genau kalkulieren zu können. Zusätzlich dienen die Gewichtsangaben als Grundlage für die Verhandlung von Preisen mit Verwertungsunternehmen. Neben der Optimierung von Preisverhandlungen tragen die genauen Gewichtsangaben auch zur logistischen Planung bei. Sie ermöglichen es, frühzeitig die entsprechenden Massen bei Verwertungsunternehmen anzumelden und die notwendigen Zeitfenster für die Anlieferung und Abholung zu reservieren. Auf diese Weise können Verzögerungen bei der Räumung der Baustelle zu vermeiden, da nicht abgeholte Schrottmengen den weiteren Rückbau und Recyclingprozess erheblich behindern können.

Die Datenbank bietet darüber hinaus die Möglichkeit, bereits in der Angebotsphase den potenziellen Verwertungsaufwand einzuschätzen, bspw. durch die Angabe, ob PM in den Anlagen vorhanden sind. So können mögliche Zusatzaufwände rechtzeitig in die Planung einbezogen werden. Für eine noch umfassendere Nutzung der Datenbank könnte überlegt werden, zusätzliche Informationen aufzunehmen, wie bspw. die Mengen des verbauten Betons im Turm oder die Gewichte der einzelnen Turmsegmente. Die Erweiterung könnte eine noch genauere Planung und Effizienzsteigerung im Rückbauprozess ermöglichen. Die Implementierung einer solchen GIS-basierten Lösung trägt somit maßgeblich dazu bei, die Rückbauprozesse von WEA zu optimieren und eine nachhaltige sowie ökonomisch effiziente Verwertung der anfallenden Materialien sicherzustellen.

4 Wirtschaftliche Bewertung und Marktanalyse

Das von der Fa. Walch bisher praktizierte Zerlegekonzept für WEA-Generatoren konnte durch die im Rahmen des DBU-Projektes durchgeführten Untersuchungen im Labor- bzw. technischen Maßstab maßgeblich verbessert werden. Insbesondere betrifft das die mit dem Einsatz von Gasbrennern zur Entmagnetisierung verbundenen Umweltbelastungen. Weil aktuell nur wenige magneterregte WEA zurückgebaut werden (s. Kapitel 2.2), sind diese gegenwärtig aber vergleichsweise gering. Eine wesentlich größere Bedeutung wird das verbesserte Zerlegekonzept der Fa. Walch allerdings in den Jahren ab 2032 erlangen, wenn deutlich mehr magneterregte WEA ihre Altersgrenze erreichen und zurückgebaut werden müssen. Eine zukünftig stets aktuelle und zuverlässige Unterstützung bei der Prognose rückführbarer Materialmengen bietet das entwickelte WebGIS der Nefino GmbH.

4.1 Analyse der Kostenstrukturen, Absatz- und Erlösoptionen der Recyclingprozesse

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, wurde im Projektzeitraum die Demontage von vier magneterregten und einer elektrisch erregten WEA bei der Fa. Walch durch das IART begleitet, wobei umfangreiche Daten zum Aufwand an Personal, Werkzeugen und Energie gesammelt werden konnten. Ausgehend von den damit verbundenen Demontageskosten erfolgte weiterführend auch eine Darstellung der Kosten-Erlössituation unter Berücksichtigung der Ankaufpreise für die WEA-Generatoren am Markt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Erlöse aus den separat vorliegenden Generatorwerkstoffen (abzüglich der zu entsorgenden Komponenten) sowohl den Kaufpreis als auch die ausgewiesenen Demontageskosten decken müssen. Zur Abschätzung der überschläglichen Wirtschaftlichkeit wurde ein Excel-Sheet entwickelt, der es erlaubt, anhand der Kosten-Erlös-Balance (Break-Even-Point), den Einfluss der entscheidenden Wirtschaftlichkeitsparameter zu charakterisieren. Da diese Informationen Firmeninterna darstellen, die die Marktposition der Fa. Walch gefährden können, sind die entsprechenden Daten ausgeblendet.

Für die aus den WEA-Generatoren erfassbaren SE-Magnetschrotte gibt es aktuell noch recht gute Absatzmöglichkeiten, weil es sich um vergleichsweise geringe Mengen handelt. Die Fa. Walch verfügt hier über sehr gute Kontakte zu Marktteilnehmern, die an einem Wiedereinsatz als Magnetwerkstoff bzw. der Extrahierung von Seltenen-Erde-Metallen interessiert sind. Für die in den Magnetschrotten enthaltenen SE-Metalle (Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium) wird zukünftig ein hoher Bedarf für Deutschland prognostiziert, so dass das Recycling der SE-Magnete weiter an Bedeutung gewinnen dürfte. Man kann davon ausgehen, dass die Industrie zum gegenwärtigen Zeitpunkt in der Lage ist, das Aufkommen an Recyclaten komplett zu verwerten. Da ein nennenswerter SEM-Rückfluss aus WEA-Demontagen allerdings erst ab 2032 zu erwarten ist, wird der Bedarf bis dahin weiter über den Import von SEM aus primären Quellen erfolgen müssen. Problematisch wäre allerdings, wenn sich die äußerst energieintensive Herstellung der Magnetwerkstoffe auf Grund zu hoher Energiepreise aus Deutschland zurückziehen würde und keine Recyclatabnehmer im nationalen oder europäischen Maßstab mehr vorhanden sind. Durch Preisdiktate bzw. Handelsverbote würde sich dadurch die Monopolstellung asiatischer Lieferanten maßgeblich verschärfen.

Da auch die Daten zu diesem AP geeignet sind, die bisher gute Marktposition der Fa. Walch zu schwächen, wurde entschieden, keine kritischen Ergebnisse in den Abschlussbericht zu übernehmen.

4.2 Marktpotenzialanalyse für das Recycling von FeNdB-Magneten aus WEA

Resultierend aus der Aufkommensanalyse mittels der vorgestellten Nefino-Datenbank (s. a. UBA-Bericht 117/2019) kann in den kommenden Jahren durch die anstehende Rückbauwelle mit einem stetig zunehmenden Anfall an magnethaltigen WEA-Generatoren gerechnet werden. Insbesondere durch den aktuellen Zubau deutlich leistungsstärkerer Offshore-Anlagen werden diese Mengen deutlich zunehmen. Wenn das Aufkommen aus dem WEA-Rückbau etwa ab 2032 eine Größenordnung erreicht, die auch für die großen Schrottaufbereiter interessant wird, ist eine Verschärfung des Wettbewerbs um diese stark werthaltigen Ressourcen zu erwarten. Für die Nefino GmbH bedeutet das, die Bewegungen im Ausbau der deutschen Windflotte weiterhin im Blick zu behalten, eine kontinuierliche Kontrolle der Daten sicherzustellen und regelmäßige Aktualisierungen der Prognosen durchzuführen. Wichtig ist die Berücksichtigung der tatsächlichen EoL-Strategien, welche nach Ende der Lebensdauer von WEA getroffen werden. Für die Spezialisten, wie die Fa. Walch, heißt es, den Wissensvorsprung an energieeffizienten, umweltfreundlichen Demontagetechologien kontinuierlich weiter auszubauen und sich an entsprechenden Ausschreibungen aktiv zu beteiligen. Bezüglich der Infrastruktur zur Durchführung des Recyclings der WEA-Generatoren ist festzustellen, dass alle großen Unternehmen der Schrottaufbereitung (Remondis/TSR, Scholz u.a.) mit Standorten in Deutschland über das Equipment zur Demontage von WEA-Generatoren verfügen und die erforderlichen Recyclingmaßnahmen durchführen können. Es dürfte also prinzipiell ausreichend Unternehmen zur Umsetzung dieser Demontagetechologien auch nach 2032 geben. Unterschiede bestehen allerdings in der Effizienz der Demontageabläufe, die auf konkreten Erfahrungen beruhen. Da diese Erfahrungen zum Einsatz von Personal, Werkzeugen und Energie stark kostenrelevant sind, müsste die Fa. Walch hier einen Kostenvorteil haben, weil sie die Zerlegeprozeduren im Rahmen des Windloop-Projektes optimieren konnte. Mit der Veröffentlichung dieser aufbereitungstechnischen Besonderheiten würde dieser Kostenvorteil sicher eliminiert, weshalb von einer Publikation im Rahmen des Abschlussberichtes abgesehen wurde.

Bezüglich des Marktpotenzials für das Recycling muss von folgenden Verwertungsstrategien für die WEA-Magnetschrotte ausgegangen werden:

- a) Der einfachste und am wenigsten aufwändige Weg wäre ein direkter Wiedereinsatz als Permanentmagnet für sekundäre Einsatzzwecke. Diese Variante ist allerdings eher unwahrscheinlich, weil sie voraussetzt, dass > 20 Jahre alte SE-Magnete wieder aufmagnetisiert und z.B. in WEA eingesetzt werden können. In den letzten 20 Jahren haben sich die WEA aber bezüglich Baugröße und installierter Leistung extrem weiterentwickelt. Gleiches gilt auch für die Magnetformate und die Legierungszusammensetzung der SE-Magnete, die immer höhere magnetische Flussdichten erlaubt, die die Grundlage für die Leistungssteigerung bei den magneterregten Systemen darstellen.
- b) Einen etwas aufwändigeren Weg stellt der Einsatz als Magnetrohstoff für die Herstellung neuer SE-Magnete dar. Die Voraussetzung dafür, die Verfügbarkeit größerer Mengen an geometrisch gleichen und von der Legierungszusammensetzung her vergleichbaren Magneten dürfte gerade bei den Magnetschrotten aus WEA gegeben sein. Bei dieser Variante werden die bereits bei der Demontage entmagnetisierten Magnetschrotte mehrstufig zerkleinert und durch Nachreinigungsprozesse auf Magnetrohstoffqualität gebracht. Im Verschnitt mit neuem Material oder aber direkt werden die Rohstoffmischungen isostatisch in die gewünschten Formen gepresst und oberflächenbeschichtet. Untersuchungen am IART haben darüber hinaus ergeben, dass sich diese Magnete aus Recyclingmaterial nahezu ohne Leistungsverluste aufmagnetisieren und wiederverwenden lassen. Ungeklärt ist allerdings weiterhin, ob diese Verfahrensweise Kostenvorteile gegenüber der Variante c realisieren kann.

- c) Der pyro-/hydrometallurgisch aufwändigste Weg wäre eine separate Rückgewinnung der SE-Metalle aus den Magnetschrotten. Diese Variante ist vorteilhaft für große Mengen an gemischten Magneten unterschiedlicher Geometrie und Legierungszusammensetzungen und ggf. zerkleinerten SE-Magneten, die aus gemischten End-of-Life-Schrotten abgetrennt werden könnten. Da die SE-Metalle aktuell und in der Tendenz weiter steigende, hohe Preisniveaus am Weltmarkt realisieren, dürfte sich der höhere Aufwand ggf. in deutlich höheren Erlöspreisen äußern, als bei Variante b. Da es für die SE-Metalle auch eine Reihe weiterer hochpreisiger Einsatzfälle gibt, dürfte diese Variante insbesondere für die deutschen Unternehmen relevant sein, die Sondermetalle für Funktionswerkstoffanwendungen herstellen (z.B. H.C. Starck u.a.).

4.3 Marktpotenzialanalyse für die Kreislaufführung der NE-Metall-Konzentrate aus WEA

Die Kreislaufführung der NE-Metall-Konzentrate war und ist in der deutschen Schrottwirtschaft bei allen Unternehmen bereits seit langer Zeit Standard. Aus diesem Grunde dürfte auch die Kreislaufführung der NE-Metalle aus WEA unproblematisch sein und prinzipiell als gelöst betrachtet werden können. Obwohl im Projektzeitraum durch die Fa. Walch nur ein elektrisch erregter WEA-Generator zerlegt werden konnte, sind die speziellen Demontageerfahrungen durchaus hilfreich. Vom Demontageaufwand her sind die Systeme prinzipiell vergleichbar. Zwar muss auf Grund der elektrischen Erregung keine Entmagnetisierung erfolgen, aber es müssen in großem Umfang Cu- bzw. Al-Wicklungen extrahiert werden. Diese sind in genuteten Bauteilen fixiert und mit speziellen wärmebeständigen Lacken versehen. Um Preisabschläge zu vermeiden, sollten diese vor der Abgabe an die NE-Metallurgie möglichst entfernt werden. Zur Klärung der umwelttechnischen Relevanz sowie der Zusatzkosten erfolgten dazu bei der Fa. Walch entsprechende Versuche unter Beteiligung des IART Freiberg.

Da die elektrisch erregten WEA ihren Einsatzschwerpunkt schon deutlich früher hatten, ist sowohl beim Rückbau als auch beim Repowering kurz- und mittelfristig mit deutlich größeren Anfallmengen zu rechnen. Wie alle anderen NE-Metallschrotte auch können die zusätzlichen Mengen aus WEA komplett von der einheimischen Metallurgie übernommen werden. Die in diesem Zusammenhang substituierbaren Mengen an Primärrohstoffen sind enorm, wobei mit Energieeinsparungen in der Größenordnung von 70-90% gerechnet werden kann. Der Einsatz der NE-Metalle aus WEA dürfte damit einen gewichtigen Beitrag zur Rohstoffversorgung in Deutschland leisten. Auf diesem Weg erscheint es möglich, den NE-Metallbedarf der deutschen Wirtschaft zu mehr als 50% aus sekundären Quellen zu decken (aktuell ca. 30-40%).

4.4 Darstellung des Gesamtpotenzials der GIS-basierten Datenbanklösung

Mit der GIS-basierten Datenbanklösung wird Rückbauunternehmen die zentrale Speicherung und Verwaltung von Informationen des gesamten Anlagenbestands aus verschiedenen Quellen ermöglicht. Das MaStR bietet bereits eine öffentlich zugängliche Lösung, verfügt jedoch ausschließlich über statische Daten und somit nicht über ausreichend Informationen, um die gesamte effiziente Planung des Rückbaus von WEA zu gewährleisten. Aufbauend auf dem MaStR verfügt das von der Nefino GmbH entwickelte WebGIS neben der Anlagencharakteristika bspw. auch Windpark- und Betreiberinformationen, die die Kommunikation und Planung eines Rückbaus erheblich beschleunigen. Spezifische Materialmengengewichte bieten die Möglichkeit rechtzeitig entsprechende Kapazitäten für die Verwertung und das Recycling von Anlagenkomponenten einzuplanen. Die zentrale Datenverwaltung macht die Nachverfolgung von Materialien von Abbau bis Recycling möglich und verbessert somit die Transparenz und Rückverfolgbarkeit des gesamten Rückbauprozesses. Dies ist besonders wichtig zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und Umweltstandards.

Die interaktive Kartenansicht des WebGIS macht die Bedienbarkeit für den Nutzer intuitiv und verständlich. Die Planung der Demontageorte, der Recyclinganlagen und der Transportwege etc. lässt sich mit dieser Unterstützung zeiteffizienter durchführen und optimieren. Allgemein erleichtert die Visualisierung

der Daten in Karteform das Verständnis komplexer Zusammenhänge und unterstützt gleichzeitig die Entscheidungsfindung. Die GIS-basierte Datenbanklösung ermöglicht darüber hinaus die Bewertung von Marktpotenzialen, indem Analysen vergangener Daten und Prognosen zukünftiger Szenarien durchgeführt werden können.

Technische Anforderungen und Implementierungsstrategien

Die Entwicklung des WebGIS wurde in mehreren Schritten umgesetzt. Entsprechend war eine finanzielle Planung in den verschiedenen fachlichen Bereichen notwendig. Die Softwareentwicklung umfasste umfangreiche Programmier-, Design- und Implementierungsarbeiten, wobei ein bewusst einfach gehaltenes Design gewählt wurde, um die Benutzerfreundlichkeit zu maximieren und eine schnelle Einarbeitung zu ermöglichen. Ein wesentlicher Teil des Zeitaufwandes und der Kosten entfiel auf die Integration und regelmäßige Pflege der Datenbank, einschließlich der Aktualisierung und Bereinigung von Daten, um eine hohe Datenqualität sicherzustellen. Das Einbeziehen des gesamten Anlagenbestands Deutschlands erfordert das effiziente Verarbeiten großer Datenmengen. Hierbei handelt es sich um verschiedene Daten technischer, wirtschaftlicher und geographischer Natur. Sollte die Software in größerem Umfang von Rückbauunternehmen genutzt werden, können zudem Lizenzgebühren anfallen, die in die Gesamtkosten einfließen. Die Betriebskosten umfassen das Serverhosting, das zur Gewährleistung eines reibungslosen Zugriffs auf die Anwendung erforderlich ist. Diese Kosten beinhalten die Bereitstellung und Wartung der Serverinfrastruktur. Darüber hinaus sind regelmäßige Updates und technischer Support notwendig, um die Software auf dem neuesten Stand zu halten und mögliche technische Probleme zeitnah zu beheben. Diese laufenden Wartungskosten sind entscheidend für die langfristige Funktionalität der Anwendung. Um sicherzustellen, dass die Mitarbeiter, die das Programm nutzen, optimal geschult sind, wurden optional entsprechende Kosten eingeplant. Diese beinhalten die Durchführung von Schulungen und Workshops, um den Nutzern eine effektive Anwendung der Software zu ermöglichen. Falls die Software großflächig von Rückbauunternehmen genutzt werden soll, sind zusätzliche Marketing- und Vertriebskosten erforderlich. Diese Kosten dienen der Vermarktung der Software an potenzielle Nutzer und der Positionierung im Markt, einschließlich Werbemaßnahmen und Informationsveranstaltungen.

Die Effizienzsteigerung, die durch das entwickelte WebGIS ermöglicht wird, erlaubt Rückbauunternehmen fundierte Entscheidungen bei der Standortwahl zu treffen, da umfassende Daten bereitgestellt werden, die die Planungszeiten erheblich optimieren. Gleichzeitig werden im Planungsprozess Kosten eingespart, da durch die Identifikation geeigneter Standorte Transportkosten gesenkt und die Materialverfügbarkeit verbessert werden können. Darüber hinaus minimiert das System das Risiko von Fehlentscheidungen, was zusätzliche Kosten reduziert. Die optimierte Standortwahl fördert zudem Recycling und Wiederverwertung und reduziert gleichzeitig die Transportwege. Betrachtet man das Ziel einer langfristigen Nutzung des WebGIS, ist die Verfügbarkeit und Transparenz der Daten wichtig für das Vertrauen der Stakeholder. Durch die Bereitstellung relevanter Informationen wird die Transparenz im gesamten Prozess erhöht, was zu einer nachhaltigen und effizienteren Vorgehensweise im Prozess des Rückbaus führt.

Um das Gesamtpotenzial des WebGIS für die Entwicklung der Recyclingraten von PM und NE-Metallen in Deutschland abschätzen zu können, muss die langfristige und flächendeckende Nutzung analysiert werden. Dies war in dieser Form im Rahmen des Projekts WindLoop bisher noch nicht möglich. Aktuell steht die große Rückbauwelle von permanentmagnetisch angetriebenen WEA noch aus. Die Ergebnisse von Kapitel 2.2 haben gezeigt, dass für die anfallenden NE-Metall- und PM-Mengen in zurückzubauenden WEA der kommenden Jahre ein großflächiger Einsatz des WebGIS eine sinnvolle Unterstützung für das Management und die Analyse von Recyclingprozessen in der Windenergiebranche wäre, um die effiziente Planung von Logistik, Transportwegen und Kapazitätsauslastung der Recyclinganlagen zu gewährleisten. Das WebGIS bietet Möglichkeiten, um einen strategischen Schritt voraus zu sein. Durch den Einsatz dieser technologischen Unterstützung können Materialien rechtzeitig und effizienter zurückgeführt werden. Da China derzeit große geopolitische Vorteile im Bereich der Ressourcenverfügbarkeit

hat, ermöglicht das WebGIS eine bessere Planung und optimierte Ressourcennutzung, um von diesem Vorsprung unabhängig zu werden und nachhaltigere, effizientere Prozesse zu etablieren.

Die Hagedorn GmbH äußerte nach der Integration der GIS-basierten Datenbank in einem ihrer konkreten Rückbauprozesse das Interesse, dies als ein Planungstool in ihre Abläufe zu integrieren. Neben der SE- und NE-Metallgehalte wäre es zudem denkbar, weitere Material- und Komponentengewichte, wie Beton aus Beton- oder Hybridtürmen oder glas- bzw. kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (GFK/CFK) aus Rotorblättern abzubilden.

5 Fazit und Ausblick

Aktuell handelt es sich noch um recht niedrige Rückgewinnungsquoten von SE-Magneten aus WEA in Deutschland. Grund hierfür ist vor allem der immense Energieaufwand zur Magnetrückgewinnung, bedingt durch die Komplexität des Einbautzustandes der PM (gekapselt, verklebt). Ein Blick auf die vergangenen und aktuellen Börsenpreise zeigt eine hohe Wertigkeit von SE- und NE-Metallen. Daraus lässt sich schließen, dass prinzipiell ein hohes Marktpotenzial für die Metalle vorhanden ist. Durch das Recycling anstelle der Primärnutzung der Metalle ist es möglich 70-90 % an Energie einzusparen. Auf diesem Wege könnte ein wichtiger Beitrag zur Rohstoffunabhängigkeit und Nachhaltigkeit der deutschen Wirtschaft geleistet werden.

Das Recycling stellt entsprechende Rückbau- und Recyclingunternehmen jedoch vor eine Reihe technischer Herausforderungen. Grundsätzlich besteht die Notwendigkeit spezifischer Technologien für die Demontage und den Entmagnetisierungsprozess. Eine effiziente Rückgewinnung kann schlussendlich nur durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Verfahren erreicht werden. Standardmethoden der Entmagnetisierung, wie die Ofenvariante, bieten eine vollständige Entmagnetisierung, unterliegen jedoch hohen Energieanforderungen und langen Prozesszeiten. Lokale Entmagnetisierungsmethoden erweisen sich als zeit- und dadurch energiesparender, zeigen wiederum nur begrenzte Tiefenwirkung. Die tatsächliche Übertragbarkeit der im Labormaßstab erzielten Ergebnisse auf industrielle Maßstäbe erfordert zukünftig weiterführende, vertiefende Analysen in Kooperation mit geeigneten Industrieunternehmen. Der Variantenvergleich nach VDI 2225 hat systematisch die Stärken und Schwächen der untersuchten Entmagnetisierungs- und Zerlegevarianten aufgezeigt. Insbesondere die lokal-elektrische Entmagnetisierung und die Variante mittels Plasmabrenner heben sich als die vielversprechendsten Lösungen hervor. Zusammenfassend haben die Untersuchungen gezeigt, dass durch lokale Entmagnetisierungstechnologien eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs und der Umweltbelastungen erzielt werden kann. Der hohe manuelle Aufwand und der Einsatz von Plasmabrennern bei der Zerlegung der großen Metallquerschnitte wird jedoch auch weiterhin unvermeidlich sein. Mechanisierte oder automatisierte Zerlegeprozesse sind aufgrund der Vielfalt an Generatorbauformen und -größen derzeit nicht praktikabel und bisher nicht über ein Versuchsstadium hinausgekommen. Die Entmagnetisierung extrem großer magnethaltiger Bauteile mittels geeigneter Öfen würde zusätzlich erhebliche Investitionen erfordern und einen überproportional hohen Energiebedarf aufweisen. Da der Magnetanteil nur bei etwa 5% der Bauteile liegt, bedingt eine Wärmebehandlung in derartigen gas- bzw. elektrisch beheizten Öfen energetisch hohe Verluste und enorme Umweltbelastungen durch Abgase. Ein entsprechend hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung wird deshalb im Einsatz lokaler Entmagnetisierungstechniken gesehen, die sich vor allem besser auf die verschiedenen Bauteilgrößen und Magnet-Einbautzustände abstimmen lassen.

Rückbauprognosen zeigen, dass etwa ab 2031 ein signifikanter Anstieg des Rückbaus von PM angetriebenen WEA zu erwarten ist. Insbesondere Offshore-Anlagen weisen nicht nur einen hohen Anteil an PM erregten WEA, sondern durch die hohen Leistungsklassen auch hohe Magnetgewichte je Anlage auf. Kupfer-, Aluminium- und Stahlmengen im Maschinenhaus und Turm sind geografisch unterschiedlich verteilt und erfordern regionsspezifische Strategien.

Eine GIS-basierte Datenbank liefert präzise Informationen zu Metallressourcen und Rückbauplanungen. Der Einsatz eines WebGIS ermöglicht Unternehmen auf Grundlage dieser Daten eine systematische und effiziente Demontageplanung. Gleichzeitig sichern die Transparenz und Nachverfolgbarkeit der Daten die Einhaltung gesetzlicher Standards im Planungsprozess. Die Integration der Rückbauprozesse, speziell der Demontage und des Recyclings von SE- und NE-Metallen, in bestehende Schrottverwertungstechnologien ist technisch möglich und würde mit Unterstützung der GIS-basierten Datengrundlage die effiziente Rückführung der Metalle in den Stoffkreislauf unterstützen. Das entwickelte WebGIS ermöglicht durch die Visualisierung des gesamten Anlagenbestand Deutschlands eine präzise Analyse des räumlichen und zeitlichen Vorkommens von WEA mit PM-Generatoren und deren NE-Metallmengen. Durch umfassende Filter- und Navigationsmöglichkeiten wird eine individualisierte Analyse erleichtert, wodurch Unternehmen und Kommunen optimale Standorte für Recyclinganlagen planen können.

Das Recycling von SE-Magneten aus WEA zeigt großes Potenzial für die Verbesserung der Ressourcensicherheit und die Förderung nachhaltiger Wirtschaftspraktiken. Ein erster wichtiger Ansatz zur Bewältigung der damit verbundenen Herausforderungen besteht in der Optimierung von Recyclingprozessen, der Weiterentwicklung von Technologien und der Integration einer effizienten Kreislaufwirtschaft. Optimierte Demontageprozesse und umweltfreundliche Entmagnetisierungsverfahren sind entscheidend, um die Rückgewinnungsraten hochwertiger Magnetwerkstoffe deutlich zu steigern. Die direkte Wiederverwendung von Magnetwerkstoffen könnte zusätzlich einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit leisten. Um dies zu erreichen, werden auch zukünftig weitere intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sein, die sich auf innovative Entmagnetisierungs- und Zerlegeverfahren konzentrieren. Hierbei können die Erfahrungen aus den Pilotversuchen zur wirtschaftlichen Optimierung dieser Technologien bei der Fa. Walch als belastbare Grundlage für die Skalierung industrieller Anwendungen dienen.

GIS-basierte Datenbanken ermöglichen die präzisere Planung von Rückbau- und Recyclingprojekten. Durch die Integration zusätzlicher Daten wie Lebenszyklusanalysen und die Erweiterung auf internationale Märkte könnten diese Systeme noch effektiver gestaltet werden. Gleichzeitig können Algorithmen zur Vorhersage künftiger Rückbaumengen eine nachhaltige Planung unterstützen und helfen, Rückbauwellen besser zu planen. Zur Reduzierung des erheblichen Transportaufwandes sollten insbesondere in norddeutschen Küstenregionen mit hohem Materialaufkommen regionale Sammel- und Aufbereitungszentren für recyclingfähige WEA-Baugruppen etabliert werden. Dies fördert nicht nur eine Circular Economy, sondern stärkt auch die Wertschöpfung vor Ort. Da die Rückbauzahlen von Windkraftanlagen zukünftig kontinuierlich steigen werden, bieten nachhaltige Rückbautechnologien zudem ein erhebliches Einsparpotenzial. Durch optimierte Verfahren zur Rückgewinnung und Vermarktung von WEA-Materialien wie Stahl, Kupfer, Aluminium und Seltene Erden ließe sich so ein erhebliches ökologisches als auch wirtschaftliches Potential erschließen.

Eine erfolgreiche Zukunft des SE-Magnetrecyclings erfordert enge Kooperationen zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Netzwerke, die den Wissenstransfer fördern und Investitionen in innovative Recyclingtechnologien unterstützen, sind ebenso wichtig wie angepasste regulatorische Rahmenbedingungen. Diese können Recyclingprozesse vereinfachen und wirtschaftlich attraktiver gestalten.

Mit diesen Ansätzen wird deutlich, dass Nachhaltigkeit und Effizienz die treibenden Kräfte für die zukünftige Entwicklung des SE-Magnetrecyclings sein müssen. Ziel muss es daher sein, die alternativen Verfahrensansätze zur WEA Demontage u.a. aus dem Windloop-Projekt so weiter zu entwickeln, dass diese wirtschaftlich und ökologisch tragfähig sind und eine ressourcenschonende und wettbewerbsfähige Recyclingwirtschaft stärken.

Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, „Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study,“ : Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [2] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar und J. Ping Liu, „Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient,“ *Advanced Materials Volume 23, Issue 7*, pp. 821 - 842, 2010.
- [3] K. Hart, H. Polinder, A. McDonald und E. Corr, „Improved cost of energy comparison of permanent magnet generators for large offshore wind turbines,“ in *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, 2014.
- [4] L. G. J. Janssen (rapporteur), L. Lacal Arántegui, P. Brønsted und P. Gimondo, Strategic Energy Technology Plan, Luxembourg:: Publications Office of the European Union, 2012.
- [5] F. Zotz, M. Kling, F. Langner, D. P. Hohrath, D. H. Born und A. Feil, „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen,“ Umweltbundesamt, 2019.
- [6] „SE-Metallpreise: Googleanfrage,“ [Online]. Available: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Metallpreis+Neodym+Dysprosium+Praseodym>. [Zugriff am 27. 02. 2024].
- [7] UNEP, „Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel.,“ United Nations Environment Programme, 2011.
- [8] K. Blinnemans, P. T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven, Y. Yang, A. Walton und M. Buchert, „Recycling of rare earths: a critical review,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. Volume 51, Nr. ISSN 0959-6526, pp. 1-22, 2013.
- [9] Deutscher Bundestag, „Wissenschaftliche Dienste: Die rechtliche Einordnung von Kryptowährungen und Token im deutschen Recht,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.bundestag.de/resource/blob/886424/16cb4318a6eaf7b2e5d2221d85e81927/WD-5-003-22-pdf-data.pdf>. [Zugriff am 09 November 2024].
- [10] B. K. Reck und T. E. Graedel, „Challenges in Metal Recycling,“ *Science*, Bd. Vol 337, 2012.
- [11] European Commission, „DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL,“ *Official Journal of the European Union*, 2008.

Anhang

Anhang A1: WebGIS WindLoop

<https://windloop.vercel.app/>