

Schlussbericht zum Verbundvorhaben

**RECVAl-HPM**

Innovative RE-use and ReCycling VALue Chain for High-Power Magnets

**Innovative Reuse- und Recycling-Wertschöpfungskette für Hochleistungspermanentmagnete**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Förderkennzeichen: 033RF002**

Projektmanagement: Projektträger Jülich (PTJ)

**Laufzeit des Vorhabens/ Berichtszeitraum: 01.07.2014 – 31.06.2017**

**Verbundpartner/Autoren:**

---

Fraunhofer Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe  
und Ressourcenstrategie (IWKS)

R. Auerbach, T. Brämer, E. Brouwer, C.  
Dierks, A. Gassmann

---

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung (IPA)

M. Dörr, C. dos Santos, R. Miehe, J. Öhl,  
K. Schmid

---

BASF SE

E. Seikel

---

Robert Bosch GmbH

H. Wüst

---

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhalt

I.	Kurzdarstellung .....	2
1.1.	Aufgabenstellung.....	2
1.2.	Voraussetzung für die Durchführung des Projekts.....	2
1.3.	Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte .....	4
1.4.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projekts) .....	4
II.	Eingehende Darstellung des Projekts .....	5
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	5
2.1.1.	AP1: Projektkoordination.....	5
2.1.2.	AP2 Sammlung und Entnahme von Magneten aus Abfallströmen .....	5
2.1.2.1.	AP2.1: Stoffstromanalyse .....	5
2.1.2.2.	AP2.2: Demontage.....	20
2.1.2.3.	AP2.3: Mechanische Behandlung.....	28
2.1.2.4.	AP2.4: Rückführungslogistik.....	29
2.1.3.	AP3: Wiederverwendung von rückgeführten Magneten .....	30
2.1.3.1.	AP3.1: Direkte Wiederverwendung gebrauchter Magnete .....	30
2.1.3.2.	AP3.2: Aufarbeitung gebrauchter Magnete.....	31
2.1.4.	AP4: Werkstoffliches Recycling zur Rückgewinnung der Magnetlegierung.....	38
2.1.4.1.	AP4.1: Aufarbeitung von Altmagneten in geeignete Ausgangsmaterialien ..	38
2.1.4.2.	AP4.2: Einsatz von Wasserstoff zur Herstellung von Sintermagneten mit rezykliertem Anteil .....	39
2.1.4.3.	AP4.3: dHDDR Prozessierung von Altmagneten zur Herstellung anisotroper kunststoffgebundener Magnete.....	40
2.1.5.	AP5: Rohstoffliches Recycling zur Rückgewinnung der SE-Metall oder SE- Verbindungen .....	46
2.1.5.1.	AP5.1: Schmelzflusselektrolyse .....	46
2.1.5.2.	AP5.2: Chemische Behandlung mit flüssigem Mg.....	54
2.1.5.3.	AP5.3: Hydrometallurgische Behandlung .....	54
2.1.5.4.	AP5.4: Carbochlorierung.....	60
2.1.6.	AP6: Ökonomische und ökologische Bewertung.....	65
2.1.6.1.	Ökonomische Bewertung .....	65
2.1.6.2.	Ökobilanzierung .....	86
2.1.7.	Fazit und Ausblick .....	103
2.2.	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	105
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	105
2.4.	Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans .....	106
2.5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	106
2.6.	Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt.....	107

III.	Literatur .....	108
IV.	Anhang.....	113
	Abkürzungen .....	117
	Abbildungsverzeichnis .....	117
	Tabellenverzeichnis.....	121

## I. Kurzdarstellung

### 1.1. Aufgabenstellung

Hochleistungsp Permanentmagnete auf Basis von Nd-Fe-B sind für viele moderne Anwendungen und Zukunftstechnologien unverzichtbar geworden. Die seltenerdhaltigen Magnete kommen dabei nicht nur in Smartphones, Festplatten und weiteren IT-Anwendungen zum Einsatz, sondern werden vor allem in Elektromotoren und Generatoren verbaut – kurz gesagt, in Anwendungen, die eine kompakte Bauweise und somit den Einsatz von Magneten höchster Energiedichte erfordern. Der Bedarf an solchen Magnetmaterialien ist bereits heute enorm hoch und wird mit dem anstehenden Umstieg auf CO<sub>2</sub>-neutrale Energie- und Mobilitätstechnologien noch weiter ansteigen.

Die Versorgungslage der eingesetzten Seltenen Erden (SE) – zusätzlich zu Neodym noch Praseodym, Terbium und Dysprosium – und auch die durch den Abbau verursachten ökologischen Folgen werden allerdings als sehr kritisch angesehen. Das Recycling von SE-haltigen Altprodukten kann daher einen wichtigen Beitrag leisten, um die hohe Nachfrage auch zukünftig befriedigen zu können – und dies idealerweise bei geringeren ökologischen und ökonomischen Kosten.

Um die begehrten Seltenen Erden in Europas Stoffkreislauf zu halten, reichen effiziente Verfahren zur materialspezifischen Wiederaufarbeitung der Altmagnete allein nicht aus. Vielmehr muss man sich neben den technologischen Aufgabenstellungen auch den Herausforderungen der logistischen Zusammenführung ausreichend großer Stoffströme sowie der zeit- und kosteneffizienten Demontage aus den Geräten stellen – das Problem also ganzheitlich betrachten.

Das übergeordnete Ziel des RECVAL-HPM-Projekts war, effiziente ganzheitliche Verfahren für die Wiederverwendung und das Recycling von Nd-Fe-B Hochleistungsp Permanentmagneten zu entwickeln. Neben der (Weiter-) Entwicklung technologischer Prozesse zum werk- bzw. rohstofflichen Recycling von Nd-Fe-B Magnetmaterial wurden auch Reuse-Strategien evaluiert. Stoffstromanalysen und die ökonomische und ökologische Bewertung der Prozesse komplettierten das Projekt.

### 1.2. Voraussetzung für die Durchführung des Projekts

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) schrieb im Dezember 2012 innerhalb des BMBF-Programms „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland“ die Fördermaßnahme mit dem Titel "Förderung der wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Frankreich zu nachhaltigen Technologien zur Gewinnung, Verarbeitung und Substitution wirtschaftsstrategischer Rohstoffe" aus. Auf französischer Seite erfolgte die Förderung der Beiträge durch die Agence Nationale de la Recherche (ANR) gemäß der Bekanntmachung "Materials and Processes for High Performance Products (Matet-Pro)".

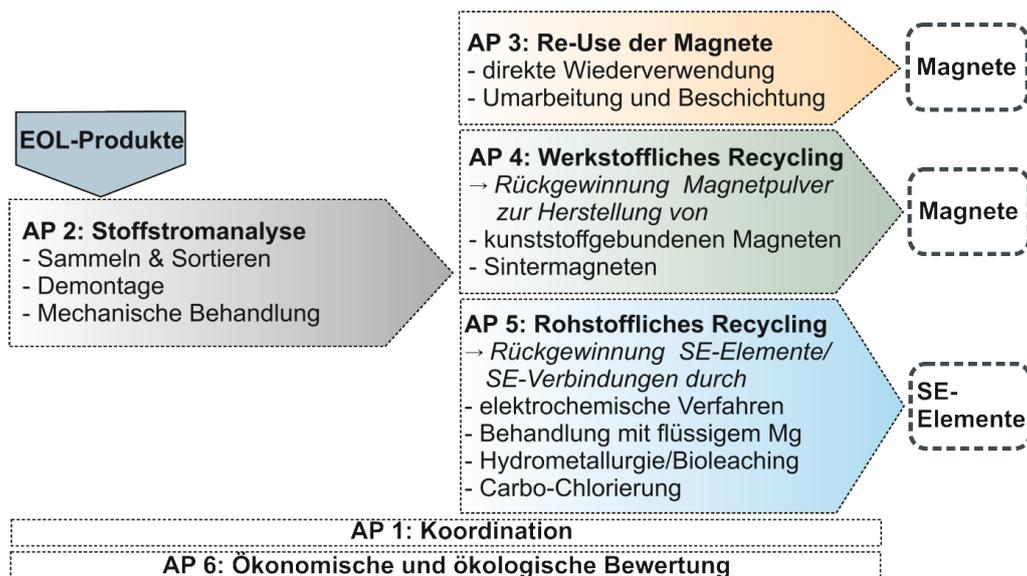
Das RECVAL-HPM als deutsch-französisches Forschungsprojekt stand unter der Gesamtleitung von Prof. Dr. Oliver Gutfleisch von der *Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie* (IWKS). Neben dem IWKS waren mit dem *Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung* (IPA) und dem französischen *Commissariat à l'énergie*

*atomique et aux énergies alternatives* (CEA) zwei weitere Forschungseinrichtungen involviert. Als Industriepartner gehörten das Technologie- und Dienstleistungsunternehmen *Robert Bosch GmbH* (BOSCH), der Chemiekonzern *BASF SE* (BASF) aus Deutschland sowie der Magnethersteller *Arelec* und das Recyclingunternehmen *Veolia* aus Frankreich dem Konsortium an.

Die Laufzeit des RECVAL-HPM erstreckte sich vom 01.07.2014 bis zum 31.06.2017. Das Projekt hatte lt. Antrag ein Gesamtvolumen von ca. 4,1 Mio. EUR, mit ca. 2,1 Mio. EUR auf deutscher und ca. 2 Mio. EUR auf französischer Seite.

### Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Zuwendungsbescheide des Projektträgers Jülich gingen im Juni 2014 bei den Projektpartnern ein. Bereits kurz nach offiziellem Projektbeginn (9. + 10. Juli 2014) fand das Kick-off Meeting aller Partner am CEA in Grenoble statt. In etwa halbjährlichem Abstand fanden Treffen des Gesamtkonsortiums alternierend in Deutschland und in Frankreich und bei wechselnden Gastgebern statt. Diese Treffen wurden durch regelmäßige Telefonkonferenzen und Treffen auf Arbeitsebene innerhalb der Arbeitspakete ergänzt.



**Abb. 1: Struktur des Projekts und Aufteilung in die Arbeitspakete.**

Das Arbeitsprogramm des RECVAL-HPM Projekts (vgl. auch Abb. 1) ist neben der Projektkoordination (Arbeitspaket (AP) 1) in fünf Arbeitsbereiche unterteilt: die Prozesstechnologien in AP2 bis AP5 sowie die Analyse und die Bewertung all dieser Prozesse hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte im AP6.

Im AP2 ging es neben der Ermittlung geeigneter Stoffströme – in welchen Bauteilen und Komponenten sind Nd-Fe-B-Magnete verbaut, in welchen Mengen und in welcher Qualität (z. B. Anteil schwerer Seltener Erden) – um die Evaluierung effizienter und zerstörungsfreier Demontage- bzw. mechanischer Behandlungsschritte. In den darauffolgenden Arbeitspaketen wurden sämtlich mögliche Wiederverwertungsstrategien unter Einsatz diverser technologischer Verfahren angewandt, um das Magnetmaterial bzw. die Seltenen Erden im Stoffkreislauf zu halten: Im AP 3 wurden Möglichkeiten einer direkten Wiederverwendung (Reuse) der Magnete untersucht, eventuell nach vorheriger Umarbeitung und Beschichtung. Arbeitspaket 4 widmete sich der Aufgabe, das zu Pulver prozessierte Altmagnetmaterial direkt wieder zur Herstellung neuer Magnete zu verwenden (werkstoffliches Recycling). Zuletzt gibt es diverse technologische Ver-

fahren um einzelne SE-Elemente oder -Verbindungen aus der Magnetlegierung rückzugewinnen. Diese können dann über etablierte Prozessrouten wieder in den Kreislauf eingespeist werden. Dieser Ansatz wurde im AP5 (rohstoffliches Recycling) verfolgt. Aufgabe des AP6 war die ökonomische und ökologische Bewertung der im Projekt entwickelten Prozesse – also eine Querschnittsaktivität, die sich über AP2 bis AP5 hin erstreckte.

Diese Projektstruktur wurde gewählt, um Arbeitspakete mit ähnlichem Input und Anforderungen zu verknüpfen um einen leichteren Austausch zwischen den bearbeitenden Partnern zu gewährleisten. Darüber hinaus fand Arbeitspaket übergreifend ein reger Austausch der Partner statt.

### **1.3. Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte**

Wie bereits erwähnt und auch in Abb. 1 schematisch dargestellt, war es Ziel des RECVAL-HPM Projekts ganzheitliche Verfahren zu entwickeln mit dem Ziel, das Nd-Fe-B Magnetmaterial bzw. die darin enthaltenen Seltenen Erden in Europas Stoffkreisläufen zu halten. Wissenschaftliche Anknüpfungspunkte für das Forschungsvorhaben waren die fachspezifischen Vorkenntnisse der Verbundpartner. Auch die technische Infrastruktur war bei allen Partnern bereits vor Projektbeginn vorhanden oder bedurfte lediglich prozessbedingter Anpassungen.

### **1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projekts)**

#### **Fraunhofer Projektgruppe IWKS:**

- CR-Recycling: CR-Recycling ist ein Recyclingunternehmen (Schwerpunkt Elektronik-Verwertung) mit Sitz in Oberderdingen (<http://www.cr-recycling.de>). Im Rahmen des AP2.1 wurden dort mehrerer Messkampagnen für Stoffstromanalysen durchgeführt.
- BHS – Sonthofen GmbH: Bei dem Maschinen- und Anlagenbauer für die mechanische Verfahrenstechnik wurden Versuche innerhalb des AP2.1 zur Zerkleinerung von Elektronikschrott/Festplatten mittels eines Prallbrechers durchgeführt (<http://www.bhs-sonthofen.de>).
- TU Darmstadt: An der Technischen Universität Darmstadt, Arbeitsgruppe Funktionale Materialien wurden der Hochdruck-HD-Laborreaktor und die dHDDR-Anlage für die Versuche im AP4.3 genutzt.
- Herrn Dr. Stefan Ratering /Universität Gießen: Beratung und Betreuung der mikrobiologischen Aspekte im AP5.3 (Bioleaching), die durch eine Doktorandin am IWKS erfolgten. Im Rahmen der Arbeiten wurden auch Versuche am Institut für Angewandte Mikrobiologie der Universität Gießen durchgeführt.

#### **BOSCH**

- C-Eco - Circular Economy Solutions GmbH: C-Eco ist ein Dienstleistungsunternehmen mit Schwerpunkt im Bereich der Altteilerückführung und Logistik. Der Markenname „CoremanNet“ des Unternehmens bietet qualifizierte Servicelösungen für den Automotive Aftermarket, u.a. ein dezentrales Logistiknetzwerk mit Sammelstellen zur Altteile-Begutachtung und ein etabliertes Vergütungskonzept. C-Eco unterstützte mit Expertise und Fachwissen bei Themen der Altteilerückführung (Reverse Logistics), Sekundärmärkten und Wiederverwendungsszenarien.

## **II. Eingehende Darstellung des Projekts**

### **2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete beschrieben, wobei der Fokus auf den erarbeiteten Erkenntnissen der Verbundpartner (deutschen Partner) liegt. Die Ergebnisse der Arbeitspakete unter Bearbeitung der französischen Partner werden ebenfalls kurz dargestellt.

#### **2.1.1. AP1: Projektkoordination**

(Bearbeitung Fh IWKS)

Die Fraunhofer Projektgruppe IWKS übernahm die Koordination des Projekts. Zu den Aufgaben zählte die Bereitstellung einer entsprechenden Infrastruktur für die interne und externe Kommunikation, die Organisation der Gesamtprojekttreffen sowie die Bündelung der Ergebnisse für die Statusberichte an den Projektträger. Der Koordinator behielt weiterhin einen Gesamtüberblick über den Stand der Arbeiten innerhalb aller Arbeitspakete und über die Erfüllung der Meilensteine/Deliverables. Weiter übernahm der Koordinator die Vorstellung auf Statuskonferenzen der BMBF-Fördermaßnahme r<sup>4</sup> (Teilnahme als Gastverband).

#### **2.1.2. AP2 Sammlung und Entnahme von Magneten aus Abfallströmen**

##### **2.1.2.1. AP2.1: Stoffstromanalyse**

(Bearbeitung Fh IWKS)

##### Sammlung und Separation von Permanentmagneten aus dem Stoffstrom der Sammelgruppe 3 (bevorzugt Festplatten)

Ziel des Arbeitspakets ist eine Untersuchung zur Rückgewinnung von Permanentmagneten aus Elektroaltgeräten. Neben den bekannten Quellen der Sammelgruppen 1 (Haushaltsgroßgeräte) und 2 (Kühlgeräte und –aggregate), deren Geräte als Ganzes stückweise gesammelt werden stellt die Sammelgruppe 3 (IT-Equipment und Telekommunikation), die als Fraktion in Form von vielschichtigem Elektroschrott vorliegt, eine weitere interessante Quelle für Magnetmaterial dar. Im Rahmen des Arbeitspakets wurde daher zunächst in Kooperation mit einem Recyclingunternehmen von Elektroaltgeräten im Rahmen mehrerer Zerlegungskampagnen der Anteil der einzelnen Gerätetypen aus der Praxis heraus bestimmt. Im zweiten Schritt erfolgt eine gezielte Untersuchung der Demontage von Festplatten, die die sicherste und hinsichtlich der Mengen in der Sammelgruppe 3 potentiell ergiebigste Fraktion darstellen. Darüber hinaus erfolgen Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und zu Möglichkeiten einer Automatisierung durch den Einsatz eines Prallbrechers. Eine übergreifende Betrachtung zum Recyclingpotential von Permanentmagneten aus Elektroaltgeräten schließt das Arbeitspaket ab.

##### Untersuchung der Sammelgruppe 3 hinsichtlich einzelner Gerätetypen

Nach der WEEE-Richtlinie 2012/19/EU (Waste of Electrical and Electronic Equipment) fasst die Sammelgruppe 3 jene Geräte zusammen, die in den Bereichen der Informations- und Kommunikationstechnologie eingesetzt werden. Diese Geräte werden oft auf kommunalen Wertstoffhöfen gesammelt, landen im Restmüll oder werden von Spezialunternehmen gezielt beim Eigner abgeholt (besonders bei gewerblichen Unternehmen). Zur endgültigen Entsorgung landen die Geräte bei von der öffentlichen Hand dafür zertifizierten Recyclingunternehmen, die gemäß den aktuellen Vorschriften die Aufbereitung übernehmen. Bei den Unternehmen kommen die Elektroaltgeräte in unsortierter Form containerweise an. Dabei sind die einzelnen Geräte mehr oder

weniger zerstört, wie Abb. 2 (links) zeigt. Diese Gruppe bildete die Ausgangsfraction für die im Projekt durchgeführten Zerlegungskampagnen. Dabei wurden stets Mengen von rund 3 t zusammengezogen und anschließend manuell sortiert. Für die Analyse wurden die Altgeräte nach Typen in nachfolgende Cluster (siehe Tab. 1) eingeteilt:



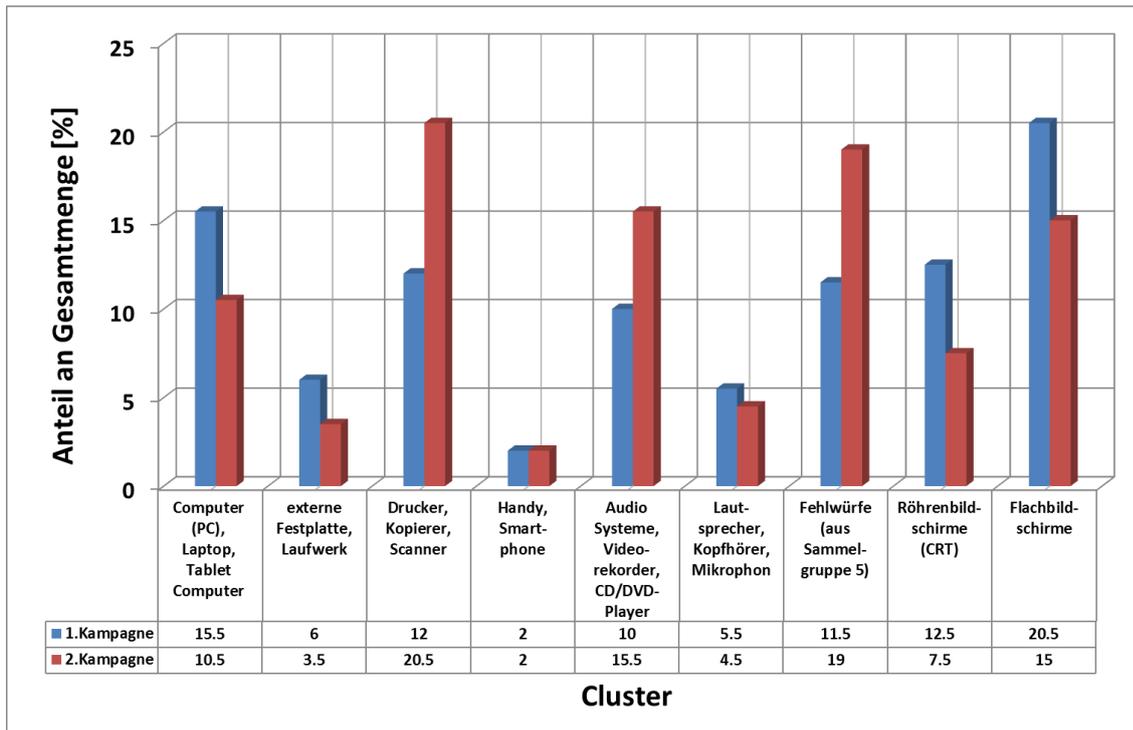
**Abb. 2: Eindrücke der Zerlegungskampagne - unsortierte Geräte der Sammelgruppe 3 (links); sortierte Desktops (Mitte); gesammelte Festplatten (rechts)**

**Tab. 1: Einteilung der Sortierfraktionen (Cluster) nach einzelnen Gerätetypen**

<u>Cluster</u>	<u>Gerätetypen</u>
1	Computer (PC, Desktop); Laptop; Tablet
2	Externe Festplatten (HDD)
3	Drucker, Kopierer, Scanner
4	Mobiltelefone (Handy, Smartphone)
5	Audiosysteme (Radio, etc.); Videorecorder; CD-Player
6	Lautsprecher, Kopfhörer, Mikrophone
7	Fehlwürfe aus anderen Sammelgruppen
8	Röhrenbildschirme (CRT)
9	Flachbildschirme

Abbildung 3 zeigt als Ergebnis des Sortierens die prozentuale Verteilung der einzelnen Gerätetypen der durchgeführten Zerlegungskampagnen. Die prozentuale Verteilung ist dabei in Bezug auf die Anzahl der aus der Ausgangsfraction heraussortierten Geräte dargestellt. Es zeigt sich, dass die Anzahlen der Geräte in den einzelnen Sortierfraktionen sich kampagnenübergreifend voneinander unterscheiden. Auffallend ist auch der große Anteil an Fehlwürfen (Impurities) zwischen 10 % und 17 %. Diese stammen überwiegend aus Verwechslungen zwischen den Sammelgruppen 3 und 5 (Haushaltskleingeräte), wo eine eindeutige Zuordnung der Geräte zur Sammelgruppe nicht immer genau bekannt ist.

Die für die weitere Rückgewinnung von Permanentmagneten interessanten Fraktionen 1 und 2 nehmen zusammen einen Anteil zwischen 13 % und 20 % ein. Hinzu kommen die Fraktionen 4 und 6 als weitere potentielle Quellen für Permanentmagnete. In diesen Fraktionen sind Magnete jedoch lediglich in Mengen von einem Gramm und weniger verbaut, so dass in Verbindung mit den unterschiedlichsten Einbauten und Verbindungstechniken eine gezielte Rückgewinnung aus in diesen Fällen nicht sinnvoll ist. Zudem zeigte die Auswertung, dass besonders im Bereich der Lautsprecher bei vielen Modellen des vergangenen Jahrzehnts Ferrite als Magnete eingesetzt wurden. Aus diesen Gründen stellen die Festplatten aus PCs, Laptops oder externen Großrechnersystemen die sicherste und mengenmäßig ergiebigste Quelle dar.

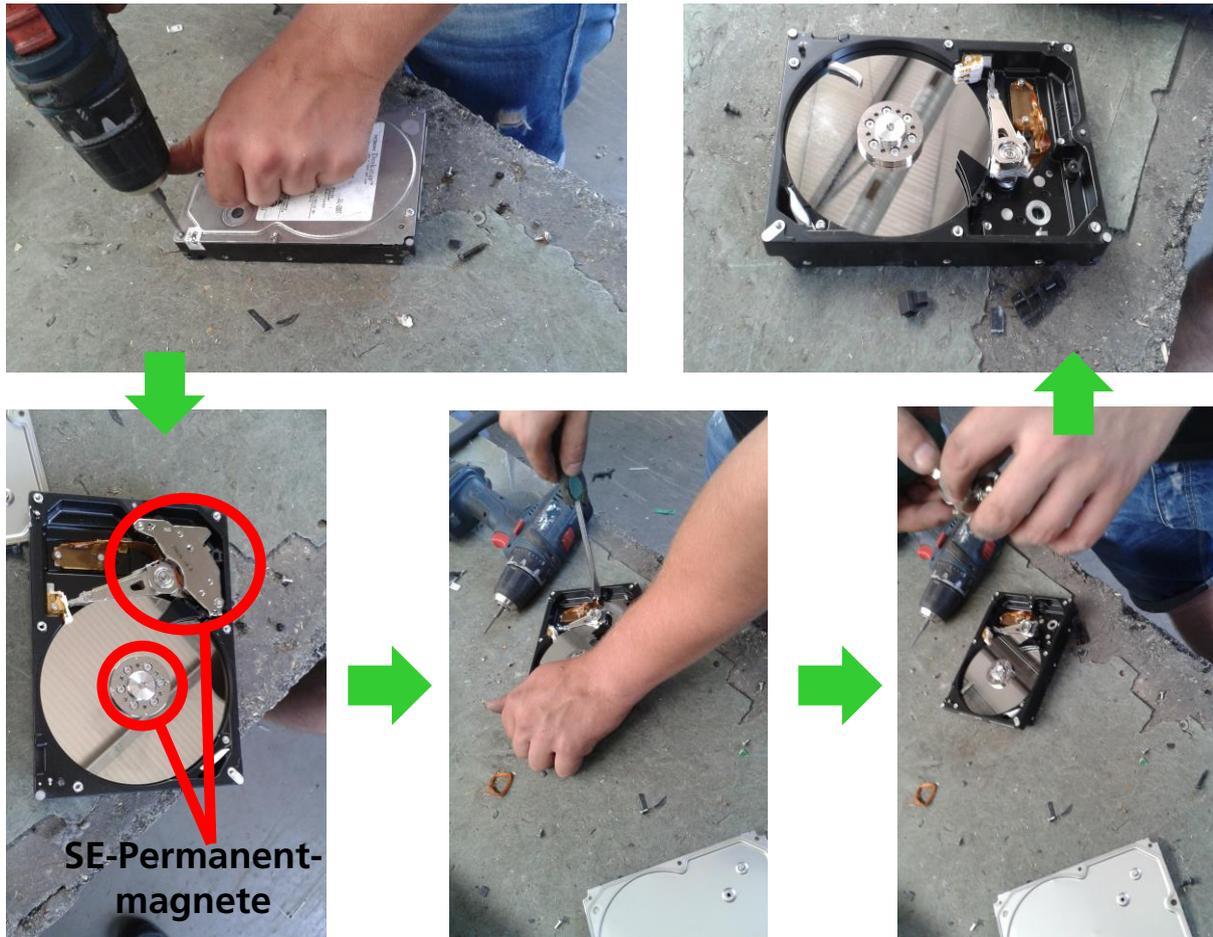


**Abb. 3: Ergebnisse der Zerlegungskampagnen (Sammelgruppe 3) - prozentuale Verteilung einzelner Gerätetypen.**

#### Demontage der den Sortierfraktionen 1 und 2 entnommenen Festplatten

Für eine spätere ökonomische Betrachtung zur Rückgewinnung von Permanentmagneten aus Elektroaltgeräten wurde der Zerlegungsprozess vom Ablauf her genauer untersucht. Dazu wurden die Festplatten manuell unter Einsatz von Werkzeug (Bohrmaschine, Schraubenzieher) demontiert und das Magnetmaterial samt Stahlträger entnommen. Dies geschieht in mehreren Schritten, wie Abb. 4 zu entnehmen ist. Zunächst werden die Verschraubungen an den Ecken der Festplatte gelöst und anschließend der Deckel entfernt. Zum Vorschein kommt zum einen die Datenscheibe, die von einem Spindelmotor angetrieben wird, in dem ein kleiner Ringmagnet verbaut ist. Zum anderen liegt nun der Hauptmagnet samt Stahlträger offen und kann mittels Schraubendreher aus der Verankerung gehoben und entnommen werden. Als Restfraktion verbleibt das Aluminiumgehäuse neben Datenscheibe und weiteren aus Stahl bestehenden Verbindungsstücken. Auf der Rückseite kann zudem durch einfaches Lösen der Verschraubungen die Leiterplatte entnommen werden, die für sich genommen bereits einen Wert darstellt.

Die Zeit für eine händische Zerlegung der Festplatte inklusive der Entnahme der Leiterplatte beträgt pro Gerät zwischen 2 und 2,5 Minuten. Dies ergibt eine Zerlegungsrate von ca. 24-30 Festplatten pro Stunde, sowie 192-240 Festplatten pro Tag, bzw. zwischen 48.000 - 60.000 Stück pro Jahr (bei 250 Arbeitstagen). Das Magnetgewicht in einer Festplatte beträgt im Durchschnitt 14 g, schwankt jedoch nach Hersteller und Herstellungsdaten deutlich.



**Demontagezeit: 2 – 2,5 min**

**Abb. 4: Darstellung der händischen Zerlegung von Festplatten.**

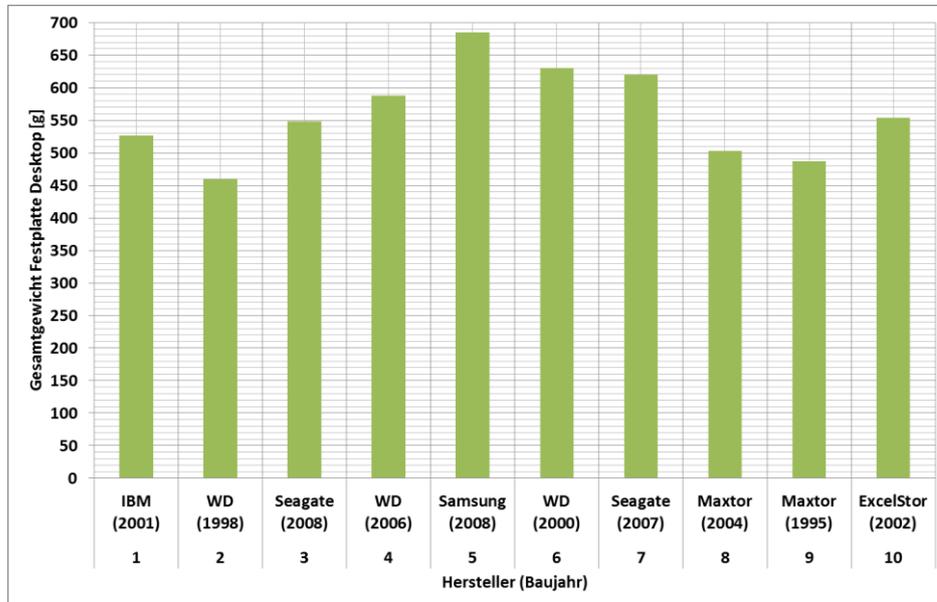
Hinsichtlich seiner elementaren Zusammensetzung enthält der entnommene Magnet ca. 30 Gew.-% Seltene Erden, wobei Neodym teilweise durch Praseodym ersetzt wird, so dass der Neodymgehalt zwischen 25 Gew.-% und 29 Gew.-% variiert (vgl. Tab. 2). Darüber hinaus konnte eine partielle Substitution zwischen Eisen und Kobalt festgestellt werden, die mit dem Absenken des Anteils an Praseodym korreliert. Für ein späteres Recycling und/oder Reuse könnte hier ein Sortierkriterium definiert werden, das unterschiedliche Magnetqualitäten voneinander trennen könnte. Eine Festplatte wiegt je nach Fabrikat im Durchschnitt ca. 500 g, mit Schwankungen um die  $\pm 100$  g.

**Tab. 2: Zusammensetzung der bei der Zerlegung entnommenen Magnete (laut  $\mu$ -Röntgenfluoreszenzanalyse).**

Gew.-%	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 4	Probe 6	Probe 7
AL	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7
Fe	66,2	68,7	65,9	68,4	69,1	66,2	66,1
Co	3,2	0,4	3,2	0,4	0,4	3,2	3,1
Pr	0,08	4,0	0,12	4,3	4,1	0,08	0,09
Nd	29,5	25,8	29,9	25,6	25,3	29,5	29,7
Dy	< 0,1	0,2	< 0,1	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1
$\Sigma$ SE-Elemente	29,6	30,0	30,0	30,1	29,5	29,6	29,8

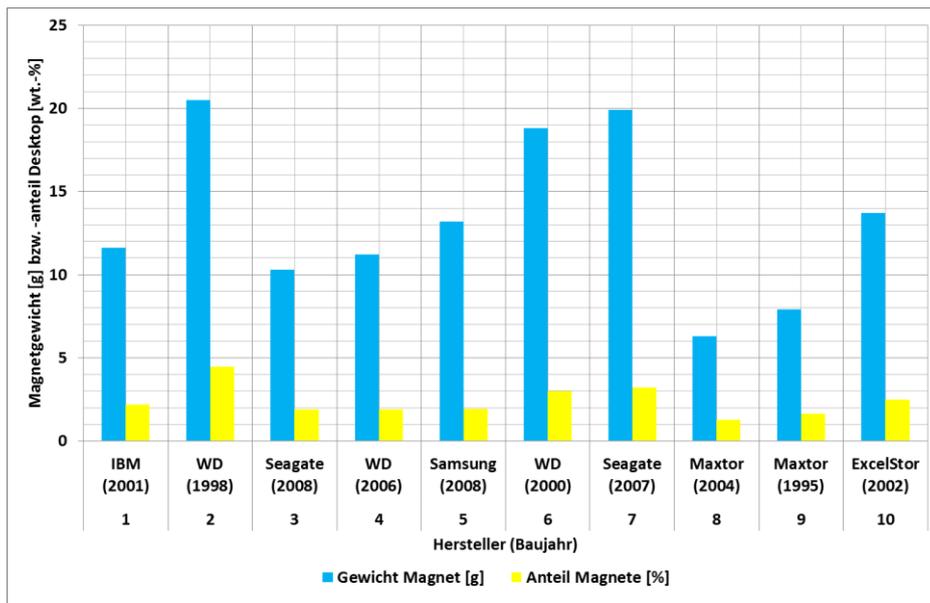
## Bestimmung der Anteile an Permanentmagneten in Festplatten und Laptops

Die Ergebnisse in Abb. 5 zeigen das durchschnittliche Gesamtgewicht der zerlegten Festplatten sortiert nach Hersteller und Baujahr. Es ist zu erkennen, dass die Festplatten ein unterschiedliches Gewicht besitzen. Bei einigen Herstellern konnten jeweils zwei bzw. drei unterschiedliche Bauarten identifiziert werden, bei denen Schwankungen im Gesamtgewicht von bis zu 25 % zu verzeichnen sind.



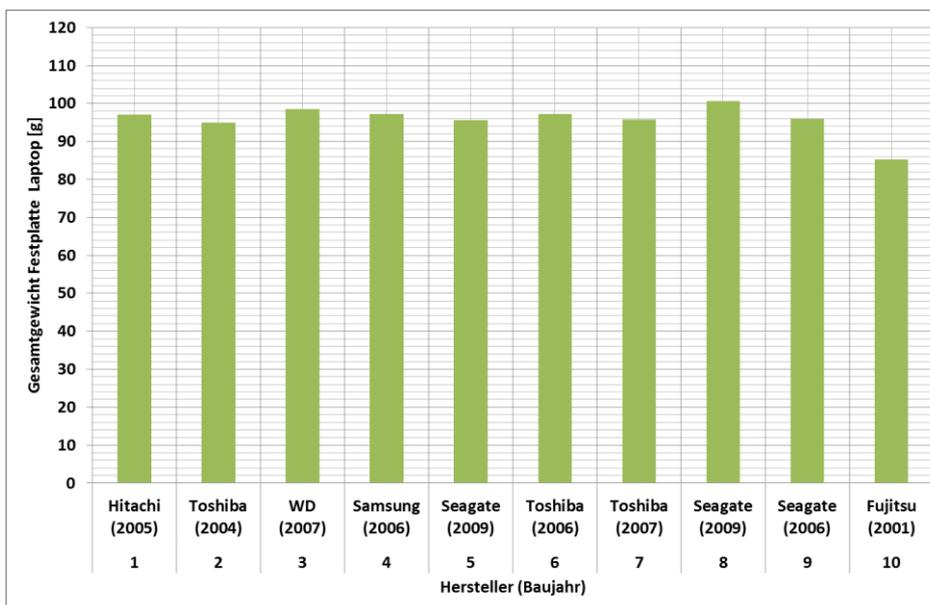
**Abb. 5: Herstellerabhängiges Gesamtgewicht von Festplatten aus Desktop-Computern (PC).**

Bei der Analyse des Gewichts der Permanentmagnete fällt ebenfalls eine signifikante Streuung auf, die sich jedoch nicht aus den Gesamtgewichten der jeweiligen Festplatten ableitet. Aus Abb. 6 ist zu erkennen, dass je nach Hersteller zwischen 10 g und 20 g Magnetmaterial in den Festplatten verbaut ist. Bei den Geräten der Fa. Maxtor liegen die Werte bei 6 g und 8 g je Magnet. In Anbetracht der Tatsache, dass sich eine händische Zerlegung von Festplatten in Europa kostentechnisch gesehen nur bei Mengen von oberhalb 60.000 Stück pro Jahr als wirtschaftlich darstellt, nimmt die Menge der zu entnehmenden Magneten einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses ein. In den bisherigen Kalkulationen wurde mit einem Durchschnittsgewicht an Magneten in einer Festplatte von 14,5 g gerechnet, der aus einer statistischen Zerlegung von 100 Festplatten ohne Ansehen von Marke und Baujahr ermittelt wurde. Die hersteller-abhängige Betrachtung ergibt einen Durchschnittswert von 13,3 g Magnet pro Festplatte, wobei die Festplatten der Fa. Maxtor den Durchschnitt deutlich absenkt. Der bisher angenommene Wert von 14,5 g wird von drei Modellen (WD 1998, WD 2000 und Seagate 2007) überschritten. Dies zeigt, dass eine Sortierung der Festplatten nach Hersteller im Sinne der Wirtschaftlichkeit durchaus sinnvoll sein könnte. Vor allem die Festplatten der Fa. Maxtor mit 6 g bzw. 8 g Magnetmaterial könnten im Vorfeld aussortiert werden. In Anbetracht des Anteils der Festplatten dieses Herstellers an der Gesamtzahl der vorliegenden Geräte wäre dann zu bewerten, wie mit diesem Stoffstrom zu verfahren ist.

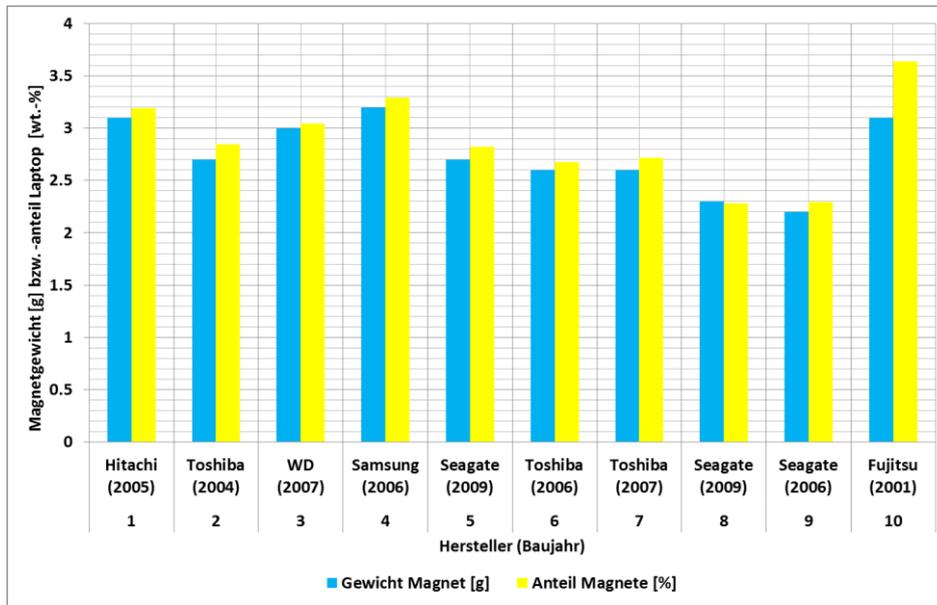


**Abb. 6: Herstellerabhängiges Magnetgewicht bzw. -anteil bei Desktop-Computern.**

Im Gegensatz zu Desktop – Computern fallen die herstellerbedingten Schwankungen der Magnetgewichte bei den Laptops deutlich geringer aus (siehe Abb. 7). Dies mag darin begründet sein, dass aufgrund des geringeren zur Verfügung stehenden Bauraums die Möglichkeiten eines konstruktiven und werkstofflichen Designs eingeschränkt sind. Die Magnetgewichte bewegen sich nach Abb. 8 zwischen 2 g und 3 g und sind damit deutlich geringer als bei Desktop-Computern. Aus den geringen Schwankungen ist abzuleiten, dass eine herstellerbedingte Sortierung im Vorfeld einer Zerlegung nicht notwendig ist.



**Abb. 7: Herstellerabhängiges Gesamtgewicht von Festplatten bei Laptops.**



**Abb. 8: Herstellerabhängiges Magnetgewicht von Festplatten aus Laptops.**

Zusammenfassend ergibt sich, dass in PCs herstellerabhängig Festplatten (3,5 Zoll) mit unterschiedlichem Gesamt- und Magnetgewicht zu finden sind. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit einer Rückgewinnung von Seltenerdmaterial kann es im Vorfeld einer Zerlegung sinnvoll sein Typen von Festplatten mit weniger Magnetmaterial auszusortieren und somit den Stoffstrom zu homogenisieren und hinsichtlich der Wertschöpfung aufzuwerten. In Abhängigkeit der Anzahl der Festplatten mit geringem Anteil an Magneten ist dann festzulegen, ob und wie eine Zerlegung vorzunehmen ist.

Die in Laptops verbauten Festplatten (2,5 Zoll) sind aufgrund des geringen zur Verfügung stehenden Bauraums stark standardisiert, so dass eine herstellereigenspezifische Unterscheidung nicht in Betracht zu ziehen ist. Aufgrund der mit 2 bis 3 g deutlich geringeren Magnetmenge als in PCs ist dieser Stoffstrom jedoch getrennt davon zu betrachten, da sich die Wirtschaftlichkeit unter Umständen anders darstellt.

### Demontageversuche Prallbrecher

Zum automatisierten Aufschluss der Festplatte wurde ein handelsüblicher Prallbrecher der Firma BHS verwendet. Ziel der Versuche war, die Festplatten durch die Prallwirkung im Brecher aufzubrechen und die einzelnen Komponenten wie Leiterplatte und Stahlträger mit darauf fixiertem Magneten freizulegen. Ausgehend von 100 Festplatten wurden die Versuche mit nachfolgenden Einstellungen durchgeführt:

- Geschwindigkeit des Brechers :  $v_1 = 30 \text{ m/s}$  ; Einsatz von 6 Prallaggregaten am Rotor
- Geschwindigkeit des Brechers :  $v_2 = 30 \text{ m/s}$  ; Einsatz von 3 Prallaggregaten am Rotor
- Geschwindigkeit des Brechers :  $v_3 = 15 \text{ m/s}$  ; Einsatz von 3 Prallaggregaten am Rotor

Die Ergebnisse in Abb. 9 und Abb. 10 zeigen, dass durch die Einwirkung der Prallkräfte die Komponenten Leiterplatte, Datenscheibe, Aluminiumgerüst, sowie die Stahlträger für die Magnete freigelegt wurden. Durch die hohe Geschwindigkeit wurden zudem die spröden Anteile (wie z.B. die Leiterplatte) weiter zerkleinert. Zusätzlich ist in Abb. 10 zu erkennen, dass der Magnet nicht vollständig am Stahlträger haften geblieben ist, sondern sich gelöst hat. Das Material ist pulverisiert und findet sich fein verteilt in der zerlegten Mischfraktion wieder. Eine Separation des Pulvers stellt sich aufgrund der im Vergleich zur gesamten Festplatte geringere Mengen als nur sehr schwer realisierbar dar.

Eine Reduzierung der Zahl der Prallaggregate bei gleicher Geschwindigkeit brachte keine signifikante Änderung des Ergebnisses (siehe Abb. 11).

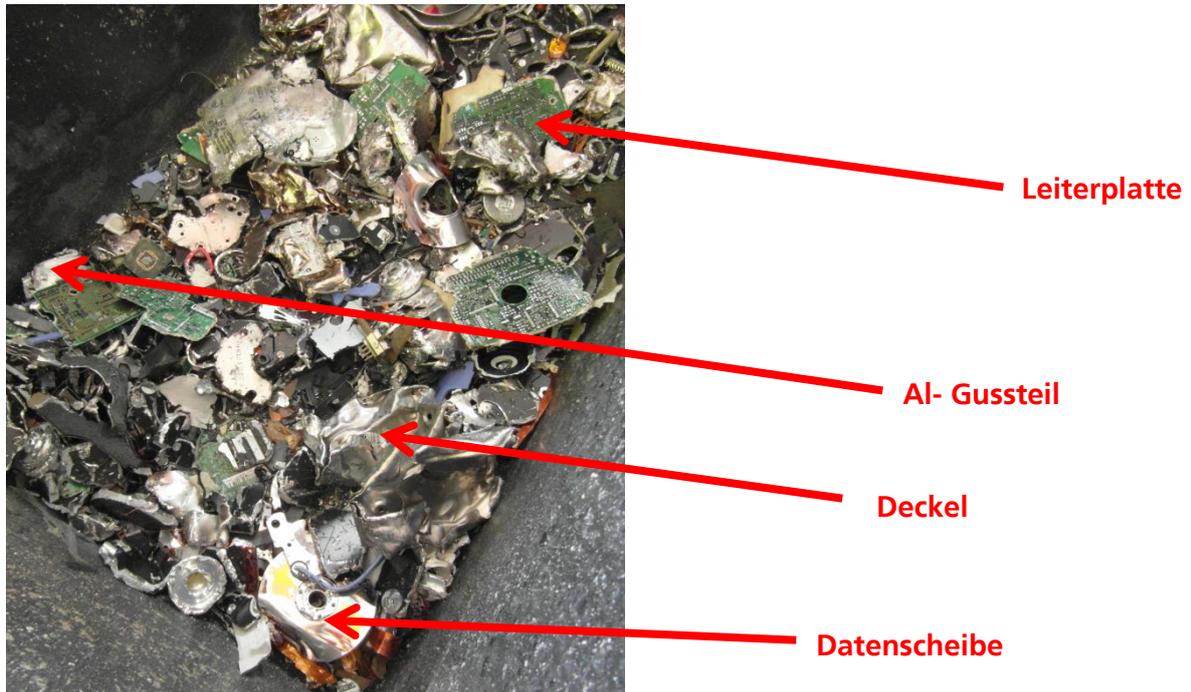


Abb. 9: Ergebnis Demontageversuch ( $v = 30 \text{ m/s}$ ; 6 Prallaggregate am Rotor).

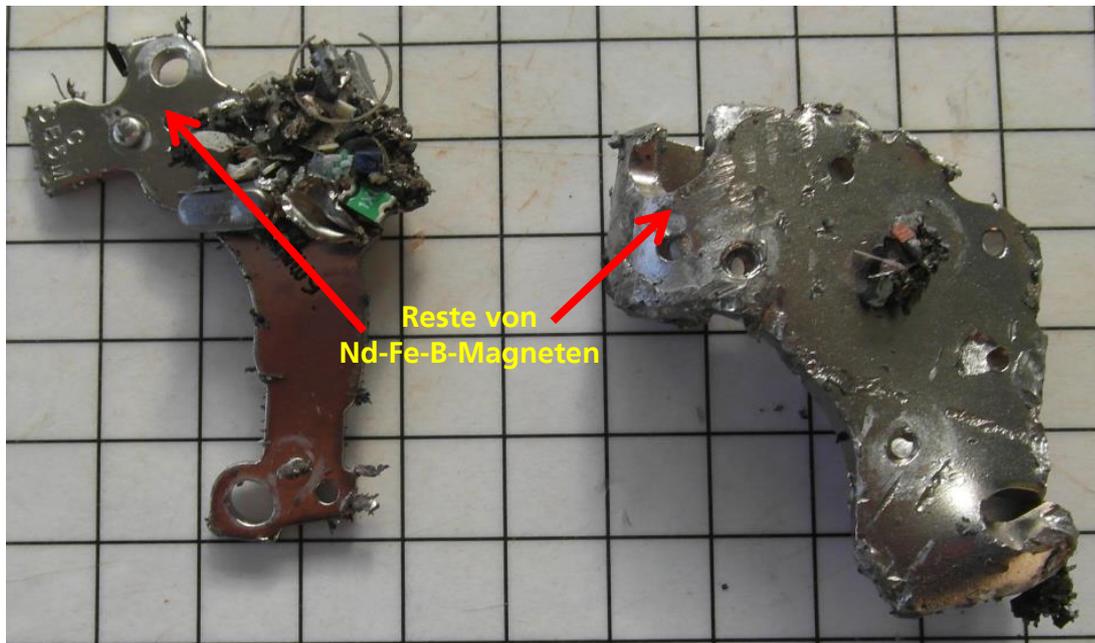


Abb. 10: Im Demontageversuch erzeugte Magnetbruchstücke.

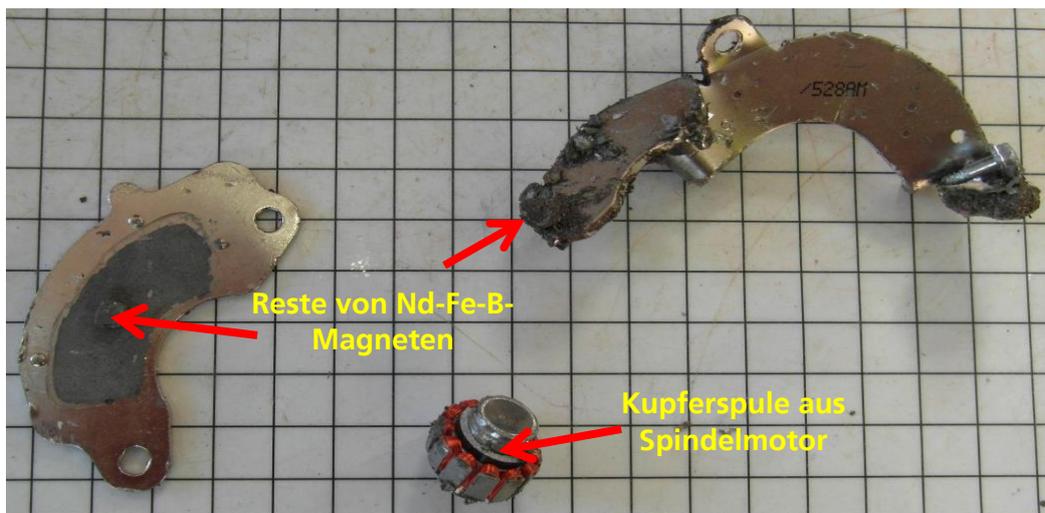


**Stahlträger ohne  
Permanentmagnet**

**Abb. 11: Ergebnis Demontageversuch ( $v = 30 \text{ m/s}$ ; 3 Prallaggregate am Rotor).**

Eine zusätzliche Verringerung der Geschwindigkeit auf das apparative Minimum für Prallbrecher von  $15 \text{ m/s}$  führte zu einer Vergrößerung der ausgebrachten Materialfraktion. Besonders die Leiterplatten konnten fast vollständig entnommen werden, was eine weitere Behandlung hinsichtlich der Rückgewinnung von Wertmetallen erleichtert. Die Magnete hingegen wurden weiterhin beschädigt und konnten sich nicht auf dem Stahlträger halten (siehe Abb. 12). Eine wirtschaftliche Rückgewinnung von Permanentmagneten aus Festplatten unter Einsatz von Prallaggregaten ist somit nicht möglich.

Als Konsequenz ist bei der Suche nach einem automatisierten Verfahren darauf zu achten, dass der Energieeintrag deutlich minimiert wird, um den spröden Nd-Fe-B Magneten möglichst nicht zu schädigen.



**Abb. 12: Im Demontageversuch erzeugte Magnetbruchstücke ( $v=15 \text{ m/s}$ ; 3 Prallaggregate am Rotor).**

## Ökonomische Analyse einer Rückgewinnung von Permanentmagneten aus Festplatten

### Demontagekosten

Für die Demontage von Festplatten fallen für einen Recyclingbetrieb nachfolgende Kosten an:

- Zerlegungskosten (Kosten für Zerlegung, Arbeitskosten)
- Lagerungskosten (Kosten für Lagerung von Festplatten)
- Transportkosten (Kosten für LKW-Transport zur Weitergabe der zerlegten Komponenten)
- Facilitykosten (Kosten für Raum und Infrastruktur)

Zusätzlich fallen Kosten für die Beschaffung von Festplatten an. Derzeit werden diese auf dem freien Markt für 900 € - 1.200 €/t gehandelt (*eigene Recherchen*). Dabei kaufen chinesische Unternehmen in großem Stil Festplatten auf und gewinnen Seltene Erden und weitere kritische Metalle mit Hilfe ihrer im Primärbereich eingesetzten Prozesse zurück. Die im Vergleich zu Europa niedrigeren Lohn- und Energiekosten ermöglichen, diesen Unternehmen deutlich höhere Preise für Altmaterial zu bezahlen. Dadurch entsteht Druck auf den europäischen Markt und die dortige Recyclingwirtschaft. Um das Material als strategischen Rohstoff in Europa halten zu können, sind in Zukunft automatisierte Verfahren zu entwickeln, die ein Magnetrecycling in Europa wirtschaftlich durchführbar machen.

### Erlöspotential

Zum Erlös einer recycelten Festplatte tragen die vier nachfolgend aufgeführten Hauptkomponenten bei:

**Tab. 3: Tabellarische Darstellung des Erlöspotentials einer demontierten Festplatte**

<u>Pos.</u>	<u>Bauteil</u>	<u>Erlöspotential</u>
1	Leiterplatte (Abb. 13, Sektor C)	Die Leiterplatte entspricht einer Platine der Klasse 1 und ist daher aufgrund ihrer Materialzusammensetzung sehr hochwertig. Für eine sortenreine Fraktion werden Preise bis zu 25 €/kg gezahlt [Sept. 2016, persönliche Mitteilung CR-Recycling].
2	Aluminiumgerüst (Abb. 13, Sektor B)	Der Aluminiumschrottpreis beträgt 0,65 €/kg [Okt. 2016, <a href="http://www.schrottpreise.eu">www.schrottpreise.eu</a> ] und ist derzeit nicht sehr hoch. Trotzdem trägt das Aluminium aufgrund seines großen Massenanteils an der gesamten Festplatte zum Erlös bei.
3	Stahlteile (Abb. 13, Sektoren A und E)	Aufgrund der erhöhten Produktionsmengen in Asien ist Stahl derzeit äußerst preiswert [Okt. 2016, <a href="http://www.schrottpreise.eu">www.schrottpreise.eu</a> ]. Dies wirkt sich auch auf den Preis für Stahlschrott aus. Mit 0,10 €/kg trägt dieser kaum zum Gesamterlös für eine recycelte Festplatte aus.
4	Permanentmagnete (Abb. 13, Sektor D)	Der Permanentmagnet trägt vergleichsweise wenig zum Gesamterlös bei. Bei einem Preisniveau von einem angenommenen Niedrigpreis von 3,50 €/kg Altmagnetmaterial beträgt der Anteil der entnommenen Magnete (14 g) am Gesamterlös nur wenige Cent.



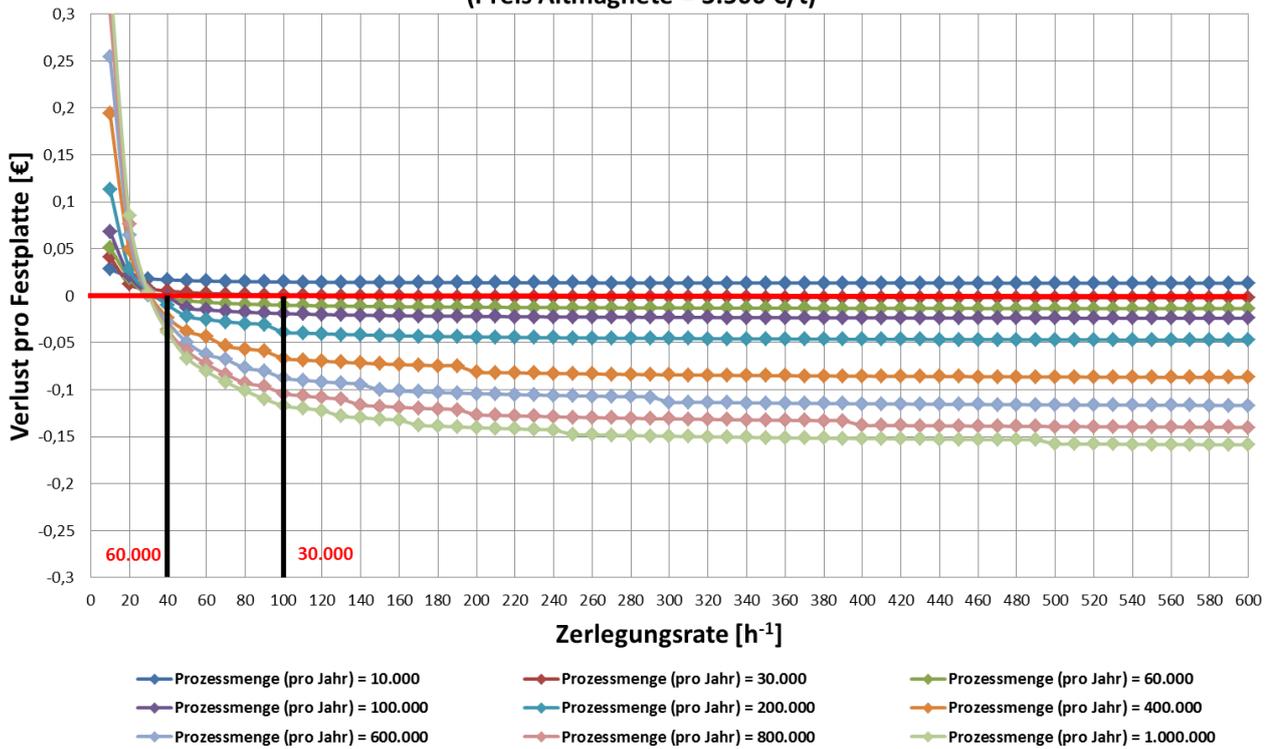
**Abb. 13: Darstellung einer vollzerlegten handelsüblichen Festplatte (A: Deckel aus Stahl; B: Gerüst mit Datenscheibe und Lesekopf; C: Leiterplatte; D: Permanentmagnete; E: Stahlträger mit zugehörigen Schrauben).**

Insgesamt ist für eine Festplatte bei Separation aller genannten Komponenten ein Erlös von rund 1,20 € zu erzielen. Basierend darauf leitet sich eine Kostenrechnung für die Demontage von Festplatten ab. Dazu wurde eine Gewinn- und Verlustrechnung erstellt, die die genannten Demontagekosten gegen den Erlös verrechnet, sowie in Abhängigkeit von der Zerlegungsrate ( $h^{-1}$ ) und der jährlich behandelten Prozessmenge an Festplatten den Gewinn bzw. Verlust pro Festplatte ermittelt.

Abbildung 14 zeigt, dass für eine jährliche Prozessmenge von 60.000 Festplatten eine Zerlegungsrate von 40 Festplatten pro Stunde notwendig ist, kostendeckend zu arbeiten. Da eine Menge von 60.000 Festplatten das absolute Maximum eines Arbeiters bei einer händischen Zerlegung darstellt, ist diese Menge nur unter Einsatz automatisierter Verfahren wirtschaftlich sinnvoll zu realisieren. Bei einer reduzierten Menge von 30.000 Festplatten pro Jahr wäre eine Zerlegungsrate von 100 Platten pro Stunde notwendig, die händisch nur durch den Einsatz mehrerer Personen zu bewerkstelligen ist. Dies würde jedoch den Prozess wieder verteuern, so dass nicht kostendeckend gearbeitet werden könnte.

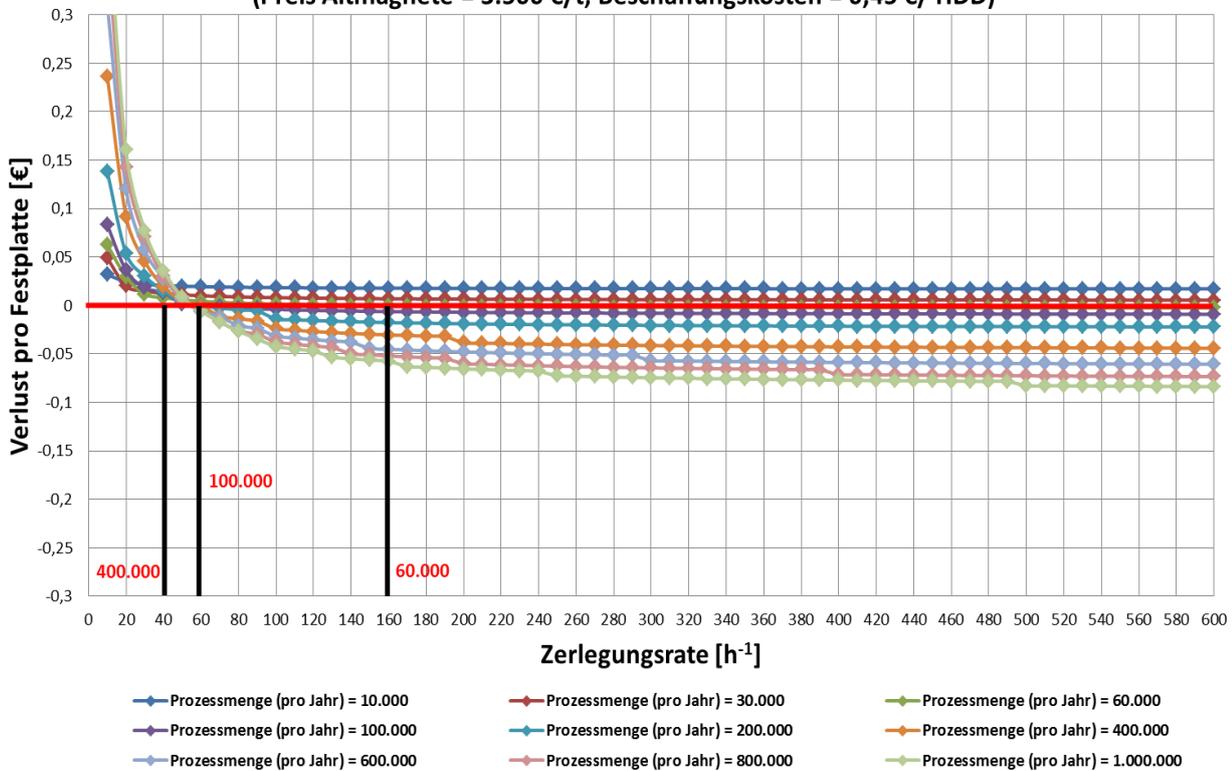
Einen weiteren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nehmen die Beschaffungskosten ein. Bei einem derzeitigen Preisniveau von 0,45 € pro Festplatte (ESG, 2017) sind bei einer Zerlegungsrate von 60 Festplatten pro Stunde 400.000 Festplatten jährlich zu verarbeiten, um kostendeckend zu agieren (siehe Abb. 15). Dazu müssten mehrere Festplatten von verschiedenen Recyclingunternehmen zusammengezogen und automatisiert weiterbehandelt werden. Mit dem Anstieg der Beschaffungskosten auf 0,60 € pro Festplatte steigen auch die Zerlegungsraten, die wirtschaftlich notwendig sind. Nach Abb. 15 sind 200.000 Festplatten pro Jahr bei einer Zerlegungsrate von 100 Festplatten pro Stunde nötig.

**Gewinn-Verlust beim Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von Prozessmenge  
(Preis Altmagnete = 3.500 €/t)**



**Abb. 14:** Ergebnis der Gewinn- und Verlustrechnung für das Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von der behandelten Prozessmenge (Preis für Altmagnete = 3.500 €/t (angenommener Niedrigpreis); keine Beschaffungskosten für die Festplatten).

**Gewinn-Verlust beim Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von Prozessmenge  
(Preis Altmagnete = 3.500 €/t; Beschaffungskosten = 0,45 €/ HDD)**



**Abb. 15:** Ergebnis der Gewinn- und Verlustrechnung für das Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von der behandelten Prozessmenge (Preis für Altmagnete = 3.500 €/t (angenommener Niedrigpreis); Beschaffungskosten = 0,45 € / Festplatte).

Ein wirtschaftlich interessanter Ansatz zur Rückgewinnung des Magnetmaterials aus Festplatten wird von der Universität Birmingham verfolgt. Nach Abtrennen einer Ecke (in unmittelbarer Nähe zum Magnet) und Verbiegen der Festplatte durch mechanischen Druck werden unter Einsatz von Wasserstoff die Magnete pulverisiert. Im Anschluss werden die geschnittenen Festplatten in einer porösen Trommel rotiert und so das Magnetpulver vom verbleibenden Rest getrennt (Walton et al., 2015).

## Bestimmung des Recyclingpotentials von Permanentmagneten aus Elektroaltgeräten

### Recyclingpotential an Permanentmagneten aus Festplatten in Deutschland

Eine Abschätzung des Recyclingpotentials von Permanentmagneten aus Festplatten in Deutschland gestaltet sich wie folgt:

Ein handelsüblicher PC (Desktop) besitzt nach eigener Berechnung ein durchschnittliches Gewicht von 8,5 kg bei einer Lebensdauer von 8 Jahren. Ein Laptop wiegt durchschnittlich 3 kg bei einer Lebensdauer von 5 Jahren.

Zwischen 2006 und 2013 wurden in Deutschland rund 81 Mio. PCs (Desktops) verkauft. Dies entspricht einem Gewicht von 688.500 t (Statista, 2016; eigene Berechnungen). Im gleichen Zeitraum wurde 2.287.051 t an IT-Geräten der Sammelgruppe 3 in Deutschland von Herstellern in Verkehr gebracht (Eurostat, 2016). Die Desktops nehmen dabei einen Anteil von 30% ein. Im Zeitraum zwischen 2009 und 2013 wurden 30,8 Mio. Laptops in Deutschland verkauft (Statista, 2016; eigene Berechnungen). Dies entspricht einer Masse von 92.421 t (Statista, 2016; eigene Berechnungen). Im gleichen Zeitraum wurden 1.246.159 t an IT-Geräten der Sammelgruppe 3 in Deutschland von Herstellern in Verkehr gebracht (Eurostat, 2016). Die Laptops nehmen dabei einen Anteil von 6,9% ein.

Unter der Annahme dass in etwa der gleiche prozentuale Anteil an Desktops bzw. Laptops wieder eingesammelt wird, berechnen sich die Sammelmengen wie folgt:

a) Bestimmung der Mengen an Desktops / Laptops ( bis 2013 ):

- Mengen gesammelte Desktops (2006-2013) =  $1.246.159 \text{ t} * 0,3 = \underline{373.847 \text{ t}}$
- Mengen gesammelte Laptops (2009-2013) =  $871.067 \text{ t} * 0,069 = \underline{60.103 \text{ t}}$

b) Bestimmung der Anteile Neodym in Desktop bzw. Laptop:

- Anteil Neodym an Desktop =  $3,5 \text{ g} / 8.500 \text{ g} = \underline{0,04\% \text{ Neodym im Desktop}}$
- Anteil NdFeB Magnet an Desktop =  $14 \text{ g} / 8.500 \text{ g} = \underline{0,16\% \text{ Magnet im Desktop}}$
- Anteil Neodym in Laptop =  $1 \text{ g} / 3.000 \text{ g} = \underline{0,03\% \text{ Neodym im Laptop}}$
- Anteil NdFeB Magnet an Laptop =  $4 \text{ g} / 3.000 \text{ g} = \underline{0,13\% \text{ Magnet im Laptop}}$

c) Potential Neodym in Festplatten und Laptops :

- Desktops :  $373.847 \text{ t} * 0,0004 (0,04\%) = \underline{149,5 \text{ t Neodym in Desktops;}}$   
= 18,7 t Neodym in Desktops / Jahr
- Laptops :  $60.103 \text{ t} * 0,0003 (0,03\%) = \underline{18,0 \text{ t Neodym in Laptops}}$   
= 3,6 t Neodym in Laptops / Jahr
- Gesamt :  $149,5 \text{ t (Desktop)} + 18,0 \text{ t (Laptop)} = \underline{167,5 \text{ t Neodym in Festplatten}}$   
= 22,3 t Neodym in Festplatten / Jahr

d) Potential NdFeB Magnete in Festplatten :

- Desktops :  $373.847 \text{ t} * 0,0016 (0,16\%) = 598,2 \text{ t Magnete in Desktops}$   
 $= 74,8 \text{ t Magnete in Desktop / Jahr}$
- Laptops :  $60.103 \text{ t} * 0,0013 (0,13\%) = 78,1 \text{ t Magnete in Laptops}$   
 $= 15,7 \text{ t Magnete in Laptop / Jahr}$
- Gesamt :  $598,2 \text{ t (Desktop)} + 78,1 \text{ t (Laptop)} = 676,3 \text{ t Magnete in Festplatten}$   
 $= 90,5 \text{ t Magnete in Festplatten / Jahr}$

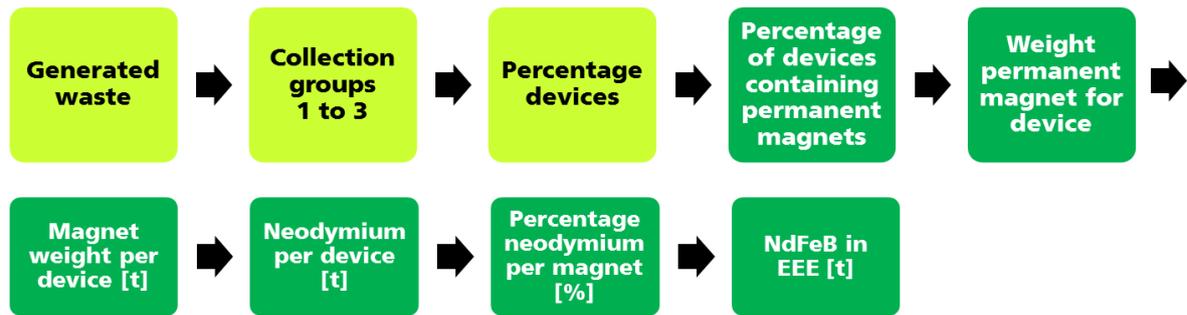
Daraus ergibt sich ein jährliches Recyclingpotential von 22,3 t Neodym in Festplatten pro Jahr. Dies bedeutet darüber hinaus ein Potential von 90,5 t Nd-Fe-B-Magneten in Festplatten pro Jahr, was bei einem angenommenen Niedrigpreisniveau von 3.500 € /t Altmagnet einem Wert von 316.750 € entspricht.

#### Recyclingpotential für Permanentmagneten (NdFeB) in Elektroschrott (Top-down Ansatz)

Im Vergleich zur Bestimmung des Recyclingpotentials von Permanentmagneten auf Basis der experimentell ermittelten Magnetgewichte wird beim „Top-Down“ Ansatz von der Gesamtmenge

an anfallendem Elektronikschrott in Deutschland ausgegangen. Für die Bestimmung der Magnetmengen wurde die einschlägige Datenlage von Europäischer Union (Eurostat, 2016), nationalem Altgeräteverzeichnis, sowie bestehenden Erkenntnissen hinsichtlich der Marktanteile permanenterregter Gerätetypen verwendet. Das Fließbild im oberen Teil von Abb. 16 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise. Ausgehend von der jährlich anfallenden Menge an Elektronikschrott in Deutschland wird die für Permanentmagnete zu betrachtende Menge auf die wesentlichen Sammelgruppen und Gerätetypen eingegrenzt. Mit Hilfe marktüblicher durchschnittlicher Magnetgewichte können die potentiellen Magnetmengen für jeden Gerätetyp bestimmt werden.

Die Ergebnisse sind in Abb. 16 (unten) bis Abb. 18 dargestellt. Demnach stellen sich die WEEE Sammelgruppen 1 bis 3 als ergiebigste Quellen dar. Hinsichtlich der Sammellogistik zeigt sich, dass in den Sammelgruppen 1 und 2 lediglich 25 bis 30% der potentiellen Gerätetypen mit Permanentmagneten bestückt sind. Auf die einzelnen Sammelgruppen bezogen bedeutet dies für die Sammelgruppe 1 13 Gew.-% und die Sammelgruppe 2 27 Gew.-%. Dies bedeutet, dass nicht nur die Geräte separiert werden müssen, sondern auch die entnommenen Magnete einer Schnellanalyse (z.B. Röntgenfluoreszenz) unterzogen werden müssen, um Nd-Fe-B- von ferritischen Magneten zu separieren. Ein anderes Bild ergibt sich für die Sammelgruppe 3. Hier sind die Festplatten aus PCs (Desktop) und Laptops nahezu vollständig mit Permanentmagneten bestückt. Demnach reicht hier eine Separation mit anschließender Aufbereitung der Geräte aus. Mit 30 Gew.-% nehmen die Magnete enthaltenen Gerätetypen etwa ein Drittel der Gesamtmasse der Sammelgruppe 3 ein.



WEE collection group (CG)	Generated WEEE 2013 in Germany	Generated WEEE 2013 in Europe	Thereof magnet containing products (fraction of collection group [mass-%])
1	191.865 t	1.150.127 t	Washing machines (41 % of CG 1) Dryers (12 % of CG 1)
2	82.227 t	492.912 t	Refrigerators (65 % of CG 2) Freezers (20 % of CG 2) Ventilators (4% of CG 2)
3	157.357 t	581.446 t	PCs (24 % of CG 3) Laptops (6% of CG 3)

Abb. 16: Vorgehen zur Bestimmung des Anteils an Magneten in Elektronikschrott (oben); Mengen an gesammelten Elektroaltgeräten in Deutschland und Europa sowie Anteil der Nd-Fe-B-Magneten enthaltenden Geräte (Eurostat, 2016; Habib et al. 2014) (unten).

Products	Thereof permanent magnet containing fraction [mass-%]	In total: permanent magnet containing fraction in CG [mass-%]
Washing machines	25 %	10 %
Dryers	25 %	3 %
Refrigerators	30 %	20 %
Freezers	30 %	6 %
Ventilators	30 %	1 %
PCs	100 %	24 %
Laptops	100 %	6 %

13 % in CG 1  
27 % in CG 2  
30 % in CG 3

Abb. 17: Marktanteile der Nd-Fe-B-Magnete enthaltenden Geräte (Stiftung EAR, 2016).

Products	Average weight/product	Nd content/unit	Nd-Fe-B in EEE device*	
			in Germany	in Europe
Washing machines	72 kg	0.3 kg	282 t	1.693 t
Dryers	43 kg	0.15 kg	69 t	415 t
Refrigerators	54 kg	0.075 kg	77 t	463 t
Freezers	43 kg	0.14 kg	55 t	332 t
Ventilators	25 kg	0.14 kg	2 t	113 t
PCs	9 kg	0.0035 kg	51 t	187 t
Laptops	3 kg	0.00075 kg	8 t	30 t

Abb. 18: Mengen an Nd-Fe-B-Magneten in Deutschland und Europa spezifisch dargestellt für einzelne Gerätetypen (Crock, 2016).

Beim Vergleich der Ergebnisse aus dem experimentellen Ansatz und dem „Top-Down“ Ansatz ist zu erkennen, dass Magnetmengen aus PCs und Laptops nicht weit auseinanderliegen. Während experimentell Jahresmengen von 74,8 t (PCs) und 15,7 t (Laptop) ermittelt wurden, erbrachte der „Top-Down“ Ansatz Mengen von 51 t (PCs) bzw. 8 t (Laptop). Die Unterschiede rühren einerseits daher, dass in der experimentellen Arbeit mit der Sortierung einiger Tonnen nur ein kleiner temporärer und lokaler Ausschnitt des Elektrorecyclings betrachtet wird, der sich nach Jahreszeit oder Änderung des Einzugsgebietes ändern kann. Auf der Seite des „Top-Down“ Ansatzes beruhen die Magnetmengen auf Statistiken öffentlicher Institutionen, die sich wiederum auf die Meldungen der Recyclingunternehmen und Hersteller bzgl. der gesammelten und in Verkehr gebrachten Geräte beziehen.

Zum anderen gründen sich die Marktanteile permanenterregter Geräte auf Erfahrungswerte von Herstellern, die nur für ihre hauseigenen Produkte des jeweiligen Gerätetyps sprechen können. Das darüber hinaus anfallende Produktportfolio wird so nicht vollständig abgedeckt. In Anbetracht dieser auf beiden Seiten liegenden potentiellen Fehlerquellen ist der Unterschied zwischen den beiden Kalkulationsansätzen nicht allzu groß, so dass die Mengen durchaus als repräsentativ anzusehen sind.

### Fazit

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergibt sich, dass rund 70 bis 80 Tonnen Permanentmagneten in Festplatten deutschlandweit verbaut sind. Eine wirtschaftliche Rückgewinnung kann ausschließlich über automatisierte Verfahren erfolgen, da je nach Beschaffungskosten zwischen 60.000 und 100.000 Festplatten pro Jahr in Europa zerlegt werden müssen, um bei einem stabilen Preisniveau kostendeckend arbeiten zu können.

Durch die Wahl zweier Kalkulationsansätze zur Bestimmung der Magnetmengen in Festplatten wurden experimentelle und statistische Einflüsse gleichermaßen berücksichtigt. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse durchaus miteinander vergleichbar sind. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Sammelgruppe 1 und 2 weitere interessante Quellen für Nd-Fe-B-Magnetmaterial darstellen. Für ein großangelegtes deutschlandweites Recycling müssten allerdings die Materialien aller drei Sammelgruppen zusammengefasst werden, um einen signifikanten Beitrag zur Rohstoffsicherheit leisten zu können. Durch die deutlich vergrößerten Mengen auf europäischer Ebene, wäre ein zentrales EU-weites Recycling ebenfalls lohnenswert.

### **2.1.2.2. AP2.2: Demontage**

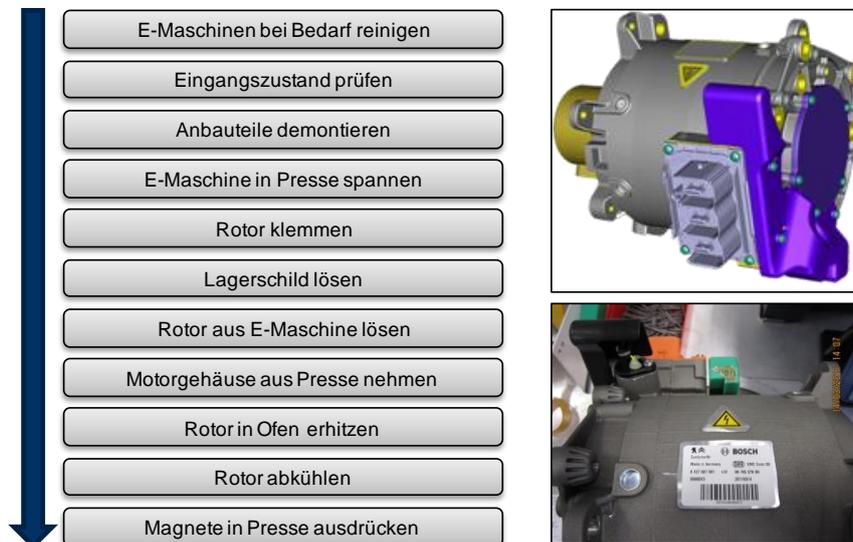
(Bearbeitung BOSCH)

Im Rahmen des AP2 wurde bei Bosch eine Strategie für die Zerlegung bzw. Demontage eines Elektromotors vom Typ SMG180 aufgestellt. Die Wahl eines Traktionsantriebs begründet sich in dem relativ hohen Anteil an enthaltenen SE-Magneten im Vergleich zu kleineren SE-magnethaltigen Elektromotoren, wie beispielsweise in Pumpen oder Rasenmähern. Nachfolgend zu der theoretischen Erarbeitung des Zerlegungsprozesses wird eine reale Zerlegung dieser Maschine im Musterbau durchgeführt. Die Fokussierung auf einen bestimmten Typ von Elektromotor ist notwendig, da für verschiedene Anforderungen eine Vielzahl unterschiedlicher Typen mit unterschiedlichen Spezifikationen verwendet wird und ein einheitlicher, allgemeingültiger Zerlegungsprozess daher nicht definierbar ist.

Aus der Zerlegung des Elektromotors SGM180, sowie einiger weiterer Maschinen, wurden einige Designpunkte hinsichtlich Ihres Einfluss auf eine effektive Wiederverwendung hin bewertet. Weiterhin wurden Kostenschätzungen für die Zerlegung durchgeführt und die hauptsächlichen Einflussfaktoren dargestellt.

## Erarbeitung Prozesskette

In Abb. 19 ist die erarbeitete Prozesskette für die Zerlegung eines Elektromotors vom Typ SMG180 dargestellt.



**Abb. 19: Prozesskette Zerlegung eines Elektromotors vom Typ SMG180.**

Zu Beginn wird die Maschine bei Bedarf von außen gereinigt, lose anhaftender Schmutz entfernt und die Maschine getrocknet. Bei der anschließenden Eingangskontrolle erfolgt über das Scannen des Typenschildes und den Abgleich mit einer Datenbank die Identifikation der E-Maschine. Der Eingang der E-Maschine wird elektronisch dokumentiert und das entsprechende Zerlegungsverfahren aktiviert. Hierbei ist zu erwähnen, dass gewisse E-Maschinendaten bereits in Datenbanken hinterlegt sind, diese jedoch für einen Reuse nicht ausreichend sind. Nötig wären dabei vor allem Informationen zu den Eigenschaften und der Zusammensetzung der eingesetzten Magnete. Im nächsten Schritt werden die Anbauteile der Maschine demontiert und die E-Maschine in eine Pressvorrichtung eingespannt. Nach Entfernen der Lagerschildschrauben kann der Rotor zusammen mit dem Lagerschild aus dem Motorgehäuse ausgepresst werden und aus der Presse entnommen werden. Anschließend werden die Rotoren in einem Ofen auf etwa 400°C für 1 h erhitzt um den Klebstoff zu zerstören, mit dem die Magnete mit dem Rotor verbunden sind. Die Rotoren werden dann zum Abkühlen dem Ofen entnommen. Je nach Beschaffenheit des Rotors fallen die einzelnen Magnete bereits aus den Taschen des Rotors oder können bei Bedarf mit einer Zahnstangenpresse herausgedrückt werden. Im Falle einer verschränkten Anordnung der Magnete auf dem Rotor ist ein zusätzlicher Schritt nötig. Da die einzelnen Lamellenpakete mit den Magneten gegeneinander versetzt sind, müssen diese zuerst von der Welle des Rotors heruntergepresst werden. Die einzelnen Magnete fallen dann entweder von alleine aus den Taschen der Lamellenpakete oder können wiederum bei Bedarf mit einer Zahnstangenpresse herausgedrückt werden.

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Zerlegung stellt vor allem die hohe Abhängigkeit des Zerlegungsprozesses vom Design des jeweiligen E-Maschinentyps eine Herausforderung dar. Für die Zerlegung einer E-Maschine ist zumindest die einfache Demontage des Gehäuses und damit gute Zugänglichkeit zu den Komponenten eine Grundvoraussetzung. Für die weitere Zerlegung mit Maschinen (Pressen etc.) sind für unterschiedliche Motoren- bzw. Komponentendesigns entsprechend jeweils eigene Maschinen- oder Komponentenausführungen (z.B. Pressaufsätze) nötig. Eine vollautomatische Anlage zur Zerlegung rentiert sich nur bei einer hohen Auslastung, d.h. großen Mengen an Rückläufern, welche auf die gleiche oder ähnliche Art zerlegt werden können.

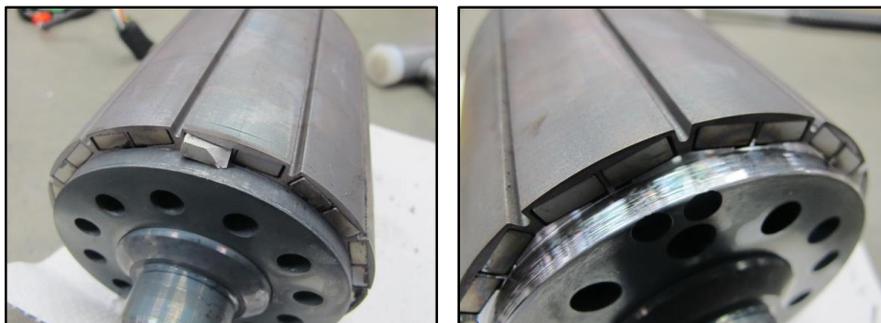
## Zerlegung im Musterbau

Die Zerlegung erfolgte per Hand mit dem Ziel, die Magnete möglichst zerstörungsfrei zu bergen. Die zuvor erarbeitete Zerlegungsstrategie konnte in der Praxis größtenteils umgesetzt werden. Zusätzliche Schritte beschränkten sich meist auf wenige Handgriffe. Das Auspressen des Rotors ist beispielhaft in Abb. 20 dargestellt. Hierbei musste auf Grund der Pressengeometrie der Lager Schild der Maschine vorher abgenommen werden. Dies führte dazu, dass der Rotor beim Auspressen leicht an den Stator anschlug. Es wurden jedoch bis auf kleine Kratzer keine Beschädigungen am Lamellenpaket des Rotors entdeckt, wodurch eine Beschädigung der Magnete ausgeschlossen werden konnte. Bei angepasster Pressengeometrie kann der Rotor mit fixiertem Lager Schild berührungsfrei aus dem Statorgehäuse gezogen werden.

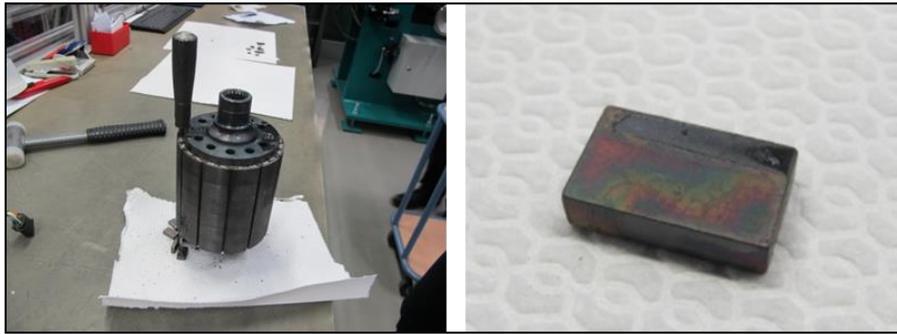


**Abb. 20: Auspressen / Herausziehen des Rotors bei einer SMG180.**

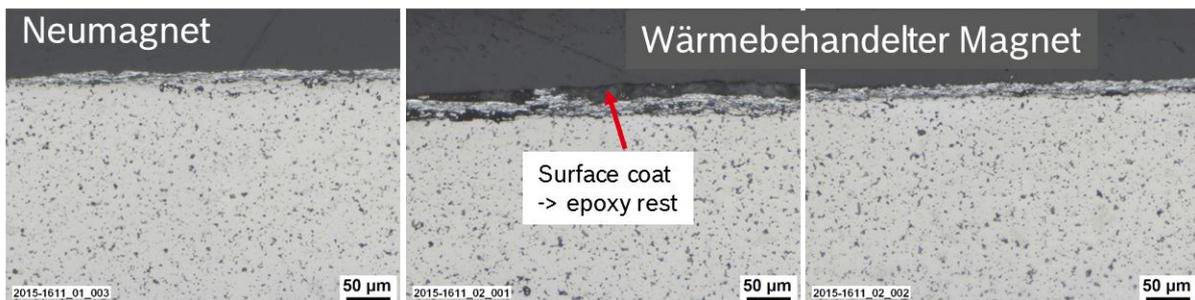
Anschließend wurde der Rotor im Ofen für 4 h bei 400°C an Luft geheizt, wodurch die Magnete entmagnetisiert wurden und sich die Klebeverbindung zersetzt hat. Bei ersten Versuchen die Magnete direkt im Anschluss auszupressen, wurden diese durch die überlappende Wuchtscheibe an den Ecken beschädigt (vgl. Abb. 21). Hier zeigte sich die Notwendigkeit des Abdrehens der Wuchtscheibe, wodurch die Magnete ohne Beschädigung mit einem Stößel leichtgängig aus dem Lamellenpaket gedrückt werden konnten (vgl. Abb. 22). Die in Abb. 23 dargestellten REM-Aufnahmen des Oberflächenbereichs eines aus dem Rotor geborgenen, wärmebehandelten Magneten zeigen im Vergleich zum Neumagneten eine leichte Verfärbung an der Oberfläche und stellenweise Rückstände des Harzes. Eine magnetische Charakterisierung der wärmebehandelten Magnete zeigte, dass alle gemessenen Werte innerhalb der Spezifikation lagen. Somit ist durch den Ofenprozess bis auf geringe Oberflächenverunreinigungen keine Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften zu erwarten. Die Rückstände des Harzes und die stellenweisen Beschädigungen der Korrosionsschutzschicht machen für einen direkten Reuse allerdings ein Abschleifen und Neubeschichten notwendig.



**Abb. 21: Beschädigung der Magnete beim Auspressen aus dem wärmebehandelten Rotor bei überstehender Wuchtscheibe (links). Abgedrehte Wuchtscheibe zum schadfreien Bergen der Magnete (rechts).**

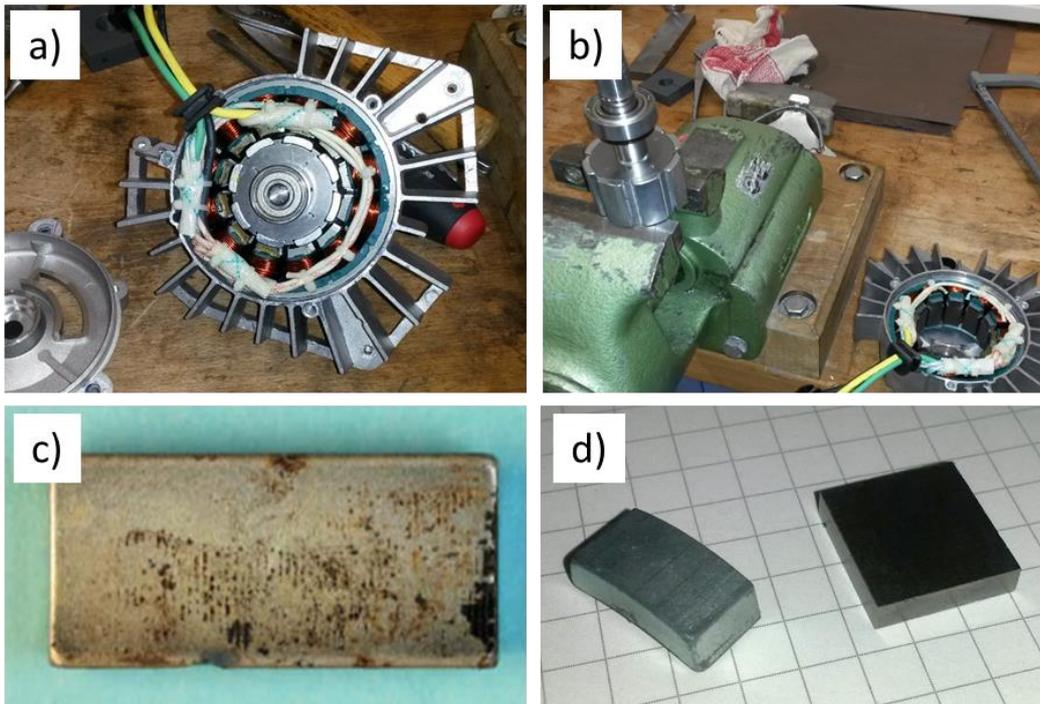


**Abb. 22: Ausstoßen der Magnete aus dem wärmebehandelten Rotor (links) und geborgener Magnet (rechts).**



**Abb. 23: REM-Aufnahmen des Oberflächenbereichs eines Neumagneten (links) und eines aus dem Rotor geborgenen, wärmebehandelten (400 °C, 4 h) Magneten (rechts).**

Neben den im Fokus der Untersuchung stehenden Traktionsantrieben (z.B. SMG180) wurden weiterhin Altmagnete eines Rasenmähermotors (Rotak) untersucht. Die Neumagnete wurden aus Ersatzmotoren, die Altmagnete aus gebrauchten Motoren des Service-Centers ausgebaut und anschließend thermisch entmagnetisiert (vgl. Abb. 24 a-c). Anschließend wurden die Brotlaibmagnete auf eine Quaderform heruntergeschliffen und im Permagraph magnetisch vermessen (vgl. Abb. 24 d). In Tab. 4 sind die magnetischen Eigenschaften von neuen und alten bzw. gebrauchten Nd-Fe-B-Magneten eines Rasenmähermotors (Rotak) vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Abweichung zwischen den magnetischen Eigenschaften der Alt- und Neumagnete und alle Werte liegen innerhalb der Produktspezifikation.



**Abb. 24:** Zerlegung Rasenmähermotor Rotak (a), Trennen des Rotors vom Stator (b), geborgener (c) und zur magnetischen Vermessung mechanisch bearbeiteter Magnet (d).

**Tab. 4:** Vergleich der magnetischen Eigenschaften von Neu- und Altmagneten eines Rotak-Motors

Produkt	Probenzustand	$H_{c,B}$ [kA/m]	$B_r$ [T]	$(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
Rotak	Neumagnet	920	1,21	280
	Altmagnet 1	921	1,20	278
	Altmagnet 2	929	1,21	283

Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Magnete über ihre Lebensdauer hinweg keine signifikante Abnahme der magnetischen Eigenschaften erfahren und eine Wiederverwendung aus technischer Sicht möglich ist. Durch eventuell nötige Nachbearbeitungsprozesse auf Grund von Oberflächenbeschädigungen und Harzrückständen nach dem Ofenprozess können allerdings weitere kostenbehaftete Prozessschritte hinzukommen, die die Gesamtkostenbilanz eines direkten Reuse oder auch Recyclings negativ beeinflussen.

#### Bewertung Designrichtlinien:

Aus der zuvor dargestellten Zerlegung eines SMG180 Elektromotors, sowie einiger weiterer Traktionsantriebe, wurden einige Designrichtlinien hinsichtlich ihrer Bedeutung für eine Wiederverwendung der Maschine abgeleitet. Tabelle 5 zeigt eine Auswahl einiger Designelemente und deren Bewertung im Falle eines Recycling, Reuse oder Remanufacturing. Einige allgemeine Designempfehlungen für die Wiederverwendung von E-Maschinen sind im Folgenden formuliert:

Allgemeine Vorschläge für recyclinggerechtes Design:

- Gleichteile / Baukasten → gleiche / ähnliche Zerlegung → Automatisierung & mehr Wiederverwendungsmöglichkeiten
- einfacher Zugang zu jeweiligen Komponenten (Magnete, Rotor/Stator, etc.)

Speziell Remanufacturing:

- größere Bauteile austauschbar (z.B. Kombination einzelner „geretteter“ Komponenten zu Neuem)
- Funktionsprüfung von Komponenten ermöglichen → Schnittstellen müssen vorhanden und zugänglich sein
- Fehleridentifikation möglichst sensitiv
- einfacher Austausch kleiner Teile (z.B. Temperatursensor)

Speziell Reuse / Recycling:

- möglichst wenig Nachbearbeitungsprozesse (z.B. kein Kleben von Magneten, da Ofen- und Schleifprozess zur Aufbereitung nötig)

**Tab. 5: Bewertung einzelner Designelemente anhand der Zerlegung SMG180 („k.E.“ = kein Einfluss; „-“ = negativ; „+“ = positiv).**

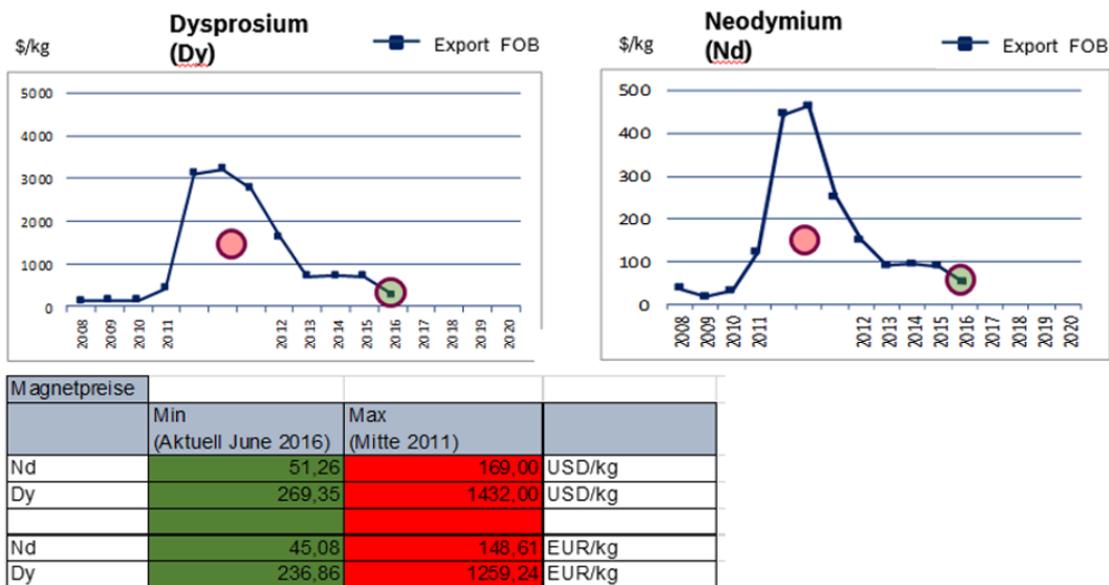
Design	Beschreibung	Bewertung			Grund Vorteil/Nachteil
		Recycling	Reuse	Reman	
Rotorverschränkung	Lamellenpakete versetzt	-	-	k.E.	Auspressen Welle nötig, um an einzelne Lamellenpakete zu gelangen
Statorschrägung	Wicklung geschrägt	+	+	k.E.	wenn Stator geschrägt oft keine Schränkung Rotor notwendig
fest verklebte Magnete	Magnete mit Epoxyd eingeklebt	-	-	k.E.	Ofenprozess + Reinigung der Magnete nötig für Reuse / Recycling
überstehende Wuchtscheibe	Wuchtscheibe überlappt mit Magnettasche	-	-	k.E.	Wuchtscheibe muss abgedreht werden um an Magnete zu gelangen
Gehäusetrennstellen untrennbar verschlossen	Gehäusedeckel verschweißt etc.	-	-	-	erschwerter Zugang zu Komponenten
Temperatursensor verklebt / imprägniert	Temperatursensor nicht montiert sondern verklebt	-	-	-	Ist ein Stator elektrisch in Ordnung und nur der Temperatursensor defekt, kann der Stator nicht instand gesetzt werden.

Kostenschätzungen Zerlegung:

Für die Zerlegung der E-Maschine SMG180 wurden mit internen Kostenberechnungen für verschiedene Szenarien Kostenbilanzen aufgestellt, d.h. es wurde versucht den Kostenaufwand für ein bestimmtes Wiederverwendungsszenario unter bestimmten Ausgangsbedingungen dem potentiell möglichen Erlös oder dem Neupreis gegenüberzustellen. Dabei wurde vor allem der Einfluss folgender Faktoren untersucht:

- SE-Preis (vgl. Abb. 25): Niedrigpreisszenario (2016) und Hochpreisszenario (gemittelter Wert während der Krise in 2011/12)
- Dy-Gehalt der Magnete: 12 Gew.-% Dy / 21 Gew.-% Nd und 0 Gew.-% Dy / 33 Gew.-% Nd
- Standort: Hochlohnkostenstandort und Niedriglohnkostenstandort
- Altteilkosten: stark abhängig von Logistik und Geschäftsmodell

Da die Rechnungen auf Kostenmodellen und sensiblen Fertigungsdaten basieren, werden die Kosten in einem relativen Vergleich dargestellt.

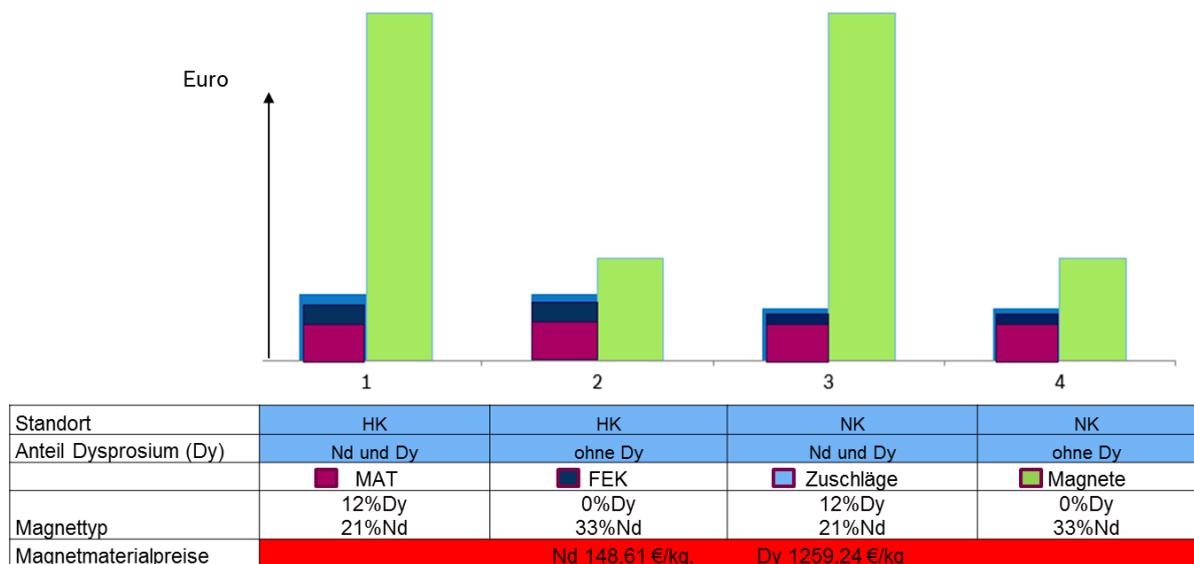
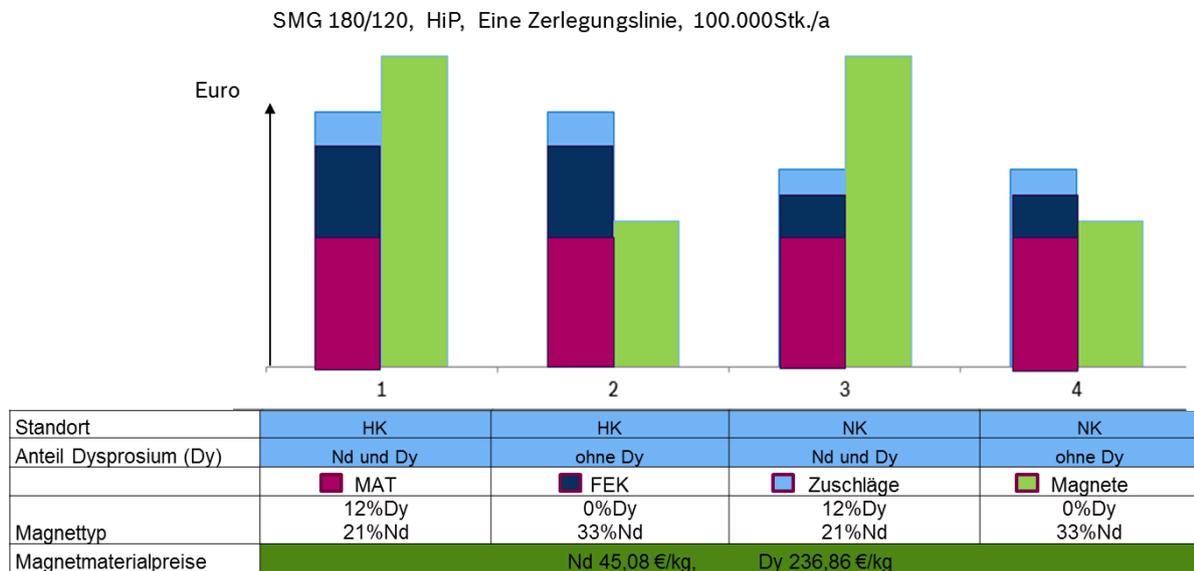


**Abb. 25: Verwendete SE-Preis-Szenarien für die Kostenabschätzungen.  
Grün: Niedrigpreisszenario. Rot: Hochpreisszenario**

In Abb. 26 ist eine qualitative Kostenbilanz für das Niedrigpreis- (oben) und das Hochpreisszenario (unten) im Falle des direkten Reuse von Magneten dargestellt. Dabei setzten sich die Kosten des Invests (linker Balken) im Falle des Reuse aus den Fertigungskosten (Personal, Anlagen, etc.) zur Zerlegung und Wiederaufbereitung, sowie den Altteilbeschaffungskosten (inkl. Logistik) zusammen. Diese werden mit dem geschätzten Neupreis des Magneten verglichen, um eine wirtschaftliche Bewertung des Szenarios zu ermöglichen.

Es ist zu erkennen, dass die SE-Preise und der Dy-Gehalt des Magneten den größten Einfluss auf die Kostenbilanz haben. Dabei ist hervorzuheben, dass sich alle Szenarien im Hochpreisszenario wirtschaftlich lohnen würden, v.a. wenn der Magnet signifikante Mengen Dy enthält. Im Falle der (aktuell) niedrigen SE-Preise rechnen sich nur Szenarien mit einem signifikanten Anteil an Dy im Material. Das zukünftige Ziel der Magnetentwicklung und Motorenauslegung, Dy-freie Magnete zu verwenden, würde bei niedrigbleibenden SE-Preisen den direkten Reuse aus wirtschaftlicher Sicht unrentabel machen.

Der Unterschied des Fertigungsstandorts hat einen deutlich geringeren Einfluss im Vergleich zum Dy-Gehalt oder dem SE-Preis, kann allerdings im Niedrigpreisszenario zu einem signifikanten Kostenvorteil beitragen.

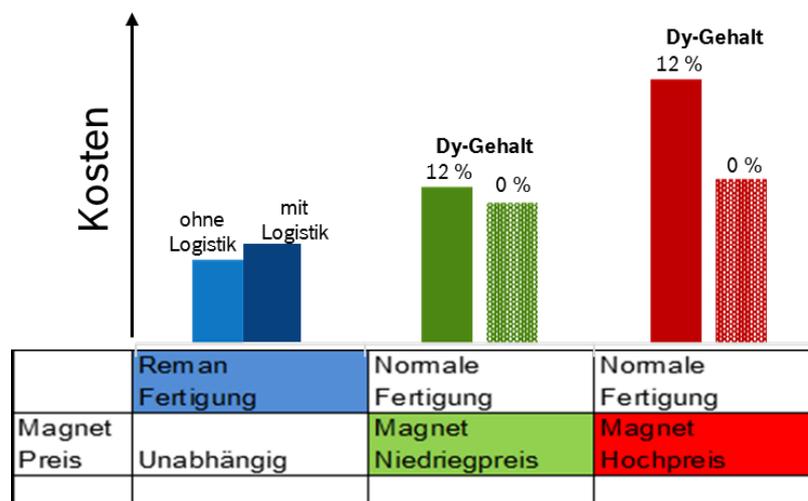


**Abb. 26: Qualitative Kostenbilanz für das Niedrigpreis- (oben) und das Hochpreisszenario (unten) im Falle des direkten Reuse von Magneten. Der linke Balken stellt jeweils den zu erbringenden Invest dar, der rechte Balken (hellgrün) zeigt einen Vergleich mit dem abgeschätzten Neupreis des Magneten.**

Darüberhinaus wurde neben dem direkten Reuse der Magnete noch das Szenario des Remanufacturing der gesamten E-Maschine betrachtet. Dabei wird die E-Maschine mit den zuvor beschriebenen Erfahrungen über die nötigen Schritte der Zerlegung bis auf den Rotor und Stator zerlegt. Weiterhin wird angenommen, dass eine der beiden Komponenten defekt ist und durch ein verfügbares Ersatzteil ausgetauscht wird. Die Komponenten werden analog zur Primärfertigung dann wieder zu einer kompletten E-Maschine verbaut mit den nötigen Qualitätsprüfungsschritten.

Die in Abb. 27 dargestellte Kostenschätzung zeigt, dass sich sowohl im Hochpreis- als auch im Niedrigpreisszenario das Remanufacturing sowohl bei einem Dy-Gehalt von 12 Gew.-%, als auch bei einem Dy-Gehalt von 0 Gew.-% aus finanzieller Sicht lohnt. Dies gilt auch unter Annahme von Logistikkosten (Altteilpreis + Rückführung). Wie zu erwarten, wirkt sich ein Dy-Gehalt von 0 Gew.-% in den Magneten im Hochkostenszenario deutlich stärker auf die Kostenbilanz aus als im Niedrigpreisszenario. Das Remanufacturing ist unabhängig vom Dy-Gehalt und vom SE-Preisszenario. Diese Unabhängigkeit kann bei einem planbaren Rückfluss an E-Maschinen eine erhöhte Versorgungssicherheit und eine erhöhte Unabhängigkeit von SE-Preisschwankungen ermöglichen.

Insgesamt ist das Remanufacturing (oder auch Reparatur) einer SE-Magnet-haltigen E-Maschine der erstrebenswerteste Wiederverwendungsweg. Zum einen, da aus ökologischer Sicht am wenigsten Wertschöpfung wieder vernichtet wird und somit im Sinne der Nachhaltigkeit effizient Ressourcen geschont werden können. Zum anderen auch aus ökonomischer Sicht, da am wenigsten kostenintensive Schritte zum Bergen und Aufbereiten der Magnete unternommen werden müssen.



**Abb. 27: Kostenbilanz im Falle des Remanufacturing einer kompletten E-Maschine (SMG180). Magnete enthalten 12 Gew.-% Dy / 21 Gew.-% Nd bzw. 0 Gew.-% Dy / 33 Gew.-% Nd.**

### 2.1.2.3. AP2.3: Mechanische Behandlung

(Bearbeitung Veolia - Triade )

Dieses Arbeitspaket wurde von Veolia – Triade bearbeitet.



## 2.1.3. AP3: Wiederverwendung von rückgeführten Magneten

### 2.1.3.1. AP3.1: Direkte Wiederverwendung gebrauchter Magnete

(Bearbeitung BOSCH)

Für die abschließende Bewertung des direkten Reuse von Magneten aus E-Motoren werden die Erkenntnisse aus dem Verbundvorhaben MORE (BMBF FKZ: 03X4622; (Bast, et al., 2014)) mit einbezogen. Diese sind stichpunktartig im Folgenden zusammengefasst:

- Wiederverwendung von Magneten ist grundsätzlich technisch möglich, d.h. keine Beeinträchtigung der Magneteigenschaften während des Betriebs. Voraussetzung ist eine Reinigung der Magnete von Klebstoffresten.
- Eine direkte Wiederverwendung für alle möglichen Applikationen setzt eine gewisse Standardisierung voraus. Zu große Variantenvielfalt kann zu einer zu geringen Anzahl an Altmagneten eines Typs führen. Hürden für eine Standardisierung waren/sind:
  - o Spezifische Kundenanfragen, evtl. hochintegriert und an weitere Komponenten des Herstellers perfekt angepasst
  - o Dynamisches Umfeld bei der Motorenentwicklung, technologischer Fortschritt. Längerfristige Standardisierung schwer möglich ohne Entwicklungspotential zu behindern
- Gefahr von Verwechslung beim Sammeln von Altmagneten
- Downcycling von Magneten bedingt Vermessen und Abschleifen auf kleinere Geometrie und wird als nicht wirtschaftlich gesehen
- Vielfalt an Spezifikationen, was Geometrie und Leistungsprofil der Magnete in Zweitmärkten betrifft führt zu hohem Aufwand in Lagerhaltung und Logistik

Zusammenfassend wird die direkte Wiederverwendung gebrauchter Magnete im Verbundvorhaben MORE als nicht sinnvoll bewertet.

Die im vorangehenden Abschnitt gezeigten experimentellen Ergebnisse an Altmagneten zeigen die technische Möglichkeit eines Reuse von gebrauchten Magneten und bestätigen die Ergebnisse des MORE-Projektes. Weiterhin werden die aufgeführten Erkenntnisse des MORE-Projektes bei der Bewertung des Reuse von Altmagneten unterstützt und bestätigt.

Problematisch bei der direkten Wiederverwendung von Magneten ist vornehmlich die große Vielzahl an unterschiedlichen Spezifikationen hinsichtlich Geometrie, physikalischer Eigenschaften, chemischer Zusammensetzung und Oberflächenbeschichtung. Voraussetzung für eine erfolgreiche Wiederverwendung ist eine Standardisierung sowohl von Geometrie als auch von der chemischen Zusammensetzung der Magnete, wovon besonders Letzteres als eher unwahrscheinlich zu bewerten ist. Die aktuelle Elektromotorenauslegung ist stark durch Streben nach höchster Effizienz und Kosten getrieben, wodurch Maschinen für jede Anwendung optimal ausgelegt werden. Dies bedingt oftmals auch die Verwendung von auf die Anwendung zugeschnittenen Magnetwerkstoffen. Um die Magnete effektiv und risikofrei wiederzuverwenden, müsste einerseits ein geeignetes System zur Speicherung von Informationen auf den Magneten (oder im System) etabliert werden und andererseits die Bereitschaft der Magnethersteller vorhanden sein, die genaue chemische Zusammensetzung ihres Werkstoffs darin preiszugeben.

Ein weiterer Punkt ist die lange Lebensdauer einiger E-Motoren (z.B. Traktionsantriebe) von mehr als 10 Jahren. In dieser Zeit wird die Entwicklung und Fertigung stark vorangeschritten sein und das dem zurückkommenden Altmagneten zugehörige Produkt wird mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr gefertigt (Produktion eingestellt, neue Serie mit anderem Design). Weiterhin müssen die Kosten einer Zerlegung der E-Maschine bis zu den Magneten inklusive Entmagnetisierung, deren Reinigung, mechanischer Bearbeitung und ggf. Neubeschichtung gegen den Neupreis des Magneten abgewogen werden.

Zusammenfassend ist der direkte Reuse (direkte Wiederverwendung, auch Downcycling) von Magneten im Rahmen der Deliverable D3.5 als nicht sinnvoll zu bewerten und wurde daher im Projekt nicht weiter aktiv verfolgt.

### 2.1.3.2. AP3.2: Aufarbeitung gebrauchter Magnete

(Bearbeitung Fh IPA)

Es ist davon auszugehen, dass beim Wiederaufarbeiten gebrauchter Magnete sowohl metallische, durch Galvanisieren aufgetragene Schutzschichten entfernt werden müssen, als auch bei Bedarf nach eventueller mechanischer Umarbeitung verschiedene Bearbeitungsrückstände zu entfernen sind. Zur Bestimmung möglicher Entmetallisierungs- bzw. Waschlösungen sind sowohl Detailinformationen über die realen Aufbauten an metallischen Schutzschichten als auch weitergehende Kenntnisse über das chemische bzw. elektrochemische Verhalten der Magnetmaterialien selbst notwendig. Im AP 3.2 hat sich nun herausgestellt, dass diese Informationen nicht in erforderlichem Maße vorliegen bzw. zunächst erarbeitet werden mussten. Diese Details liegen beispielsweise nicht vor, weil Magnete fertig eingekauft werden, z. B. mit der Oberflächenspezifikation vernickelt. Diese Angabe ist nun aus werkstofftechnisch- bzw. oberflächentechnischer Sicht unbrauchbar, da es zahllose Modifikationen bzw. Varianten an vernickelten Oberflächen gibt, die sich sowohl im Schichtaufbau als auch der Schichtdicke drastisch unterscheiden können.

Beim Projektpartner Arelec werden die Anforderungen an die Beschichtung dabei im Wesentlichen durch die Korrosionsbeständigkeit im neutralen Salzsprühtest definiert.

Dabei gibt es drei Schichtsysteme, die jeweils für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden:

1. Zinkphosphat: 24 h
2. NiCuNi: 72 h
3. Parylene (Polymerbeschichtung) 200 h

Für den Einsatz vor allem für Windkraftanlagen wird ein weiteres System mit der höchsten Korrosionsbeständigkeit eingesetzt:

4. NiCuNiCu + Epoxy: 300 h

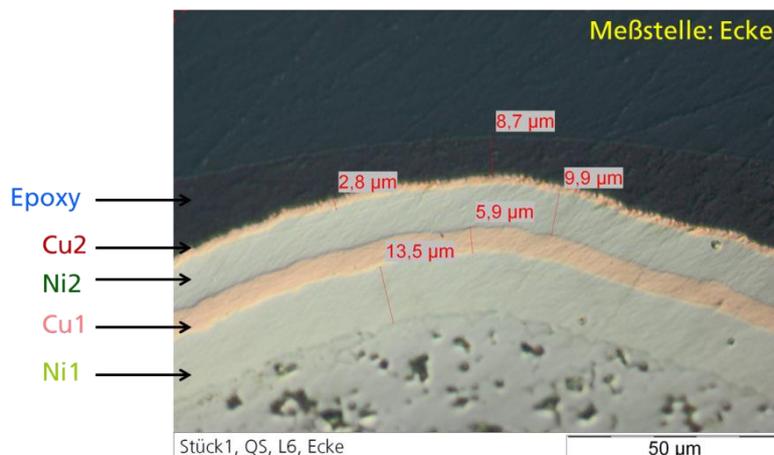
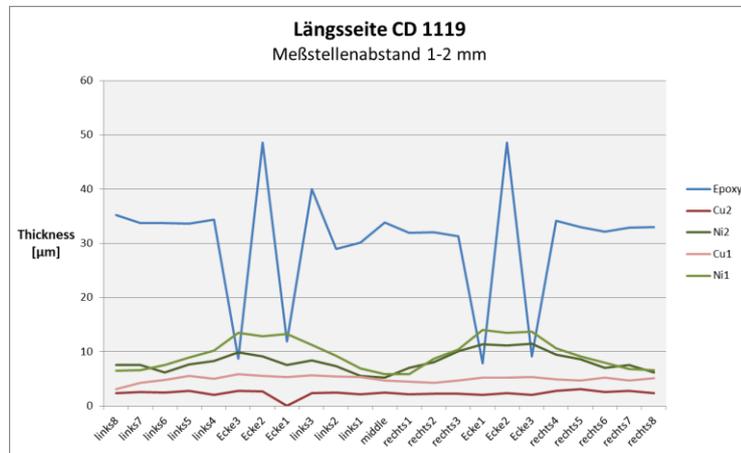


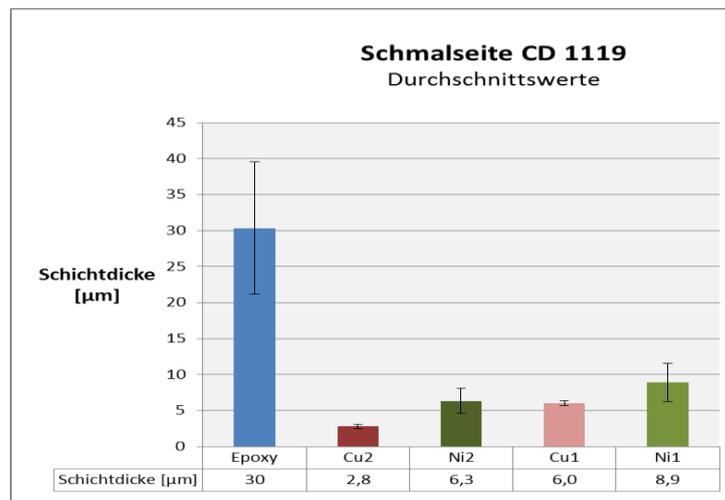
Abb. 29: Querschliff durch das Schichtsystem Nr. 4.

Der typische Schichtaufbau dieses Systems ist in Abb. 29 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Dicken der einzelnen Lagen. Da Schichtdicken normalerweise auch über Bauteile betrachtet variieren, vor allen auch im Vergleich Kante zu Fläche, wurden hierzu Auswer-

tungen erstellt. Zum einen wurde dabei der jeweilige Schichtdickenverlauf analysiert, wie in Abb. 30 ersichtlich. Hier zeigen sich deutlich die Varianzen in der applizierten Schichtdicke. Die jeweilige quantitative Ausprägung der Schichtdickenvarianz ist dabei prozessspezifisch unterschiedlich. Zum anderen wurden die durchschnittlichen Werte ermittelt, um die Soll-Werte der einzelnen Lagen zu bestimmen, siehe hierzu Abb. 31. Die ermittelten Werte dürften repräsentativ für das Gesamtschichtsystem sein.



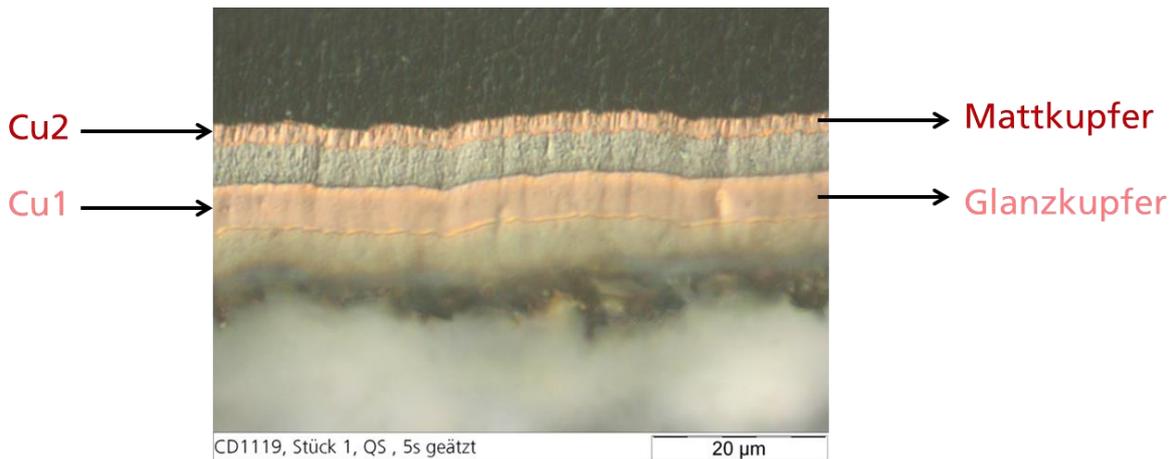
**Abb. 30: Schichtdickenverlauf über Kanten.**



**Abb. 31: Durchschnittliche Schichtdicken.**

Die einzelnen Schichtlagen unterscheiden sich nicht nur in der Dicke sondern auch im Gefüge, was darauf hinweist, dass hier unterschiedliche Prozesse eingesetzt werden. Um dies näher zu untersuchen, wurden Gefügeätzungen vorgenommen und eine Gefügeanalyse erstellt.

Beispielhaft ist hier in Abb. 32 die Analyse der Kupferschichten dargestellt, es handelt sich definitiv um zwei verschiedene Prozesse.



**Abb. 32: Gefügeanalyse der Kupferschichten.**

Die Ergebnisse der Arbeiten sind in Abb. 33 zusammengefasst. Das System konnte weitgehend bestimmt werden, einzig die Frage, ob ein zusätzliches Ni-Strike zur Haftvermittlung eingesetzt wird, konnte noch nicht zweifelsfrei bestimmt werden.

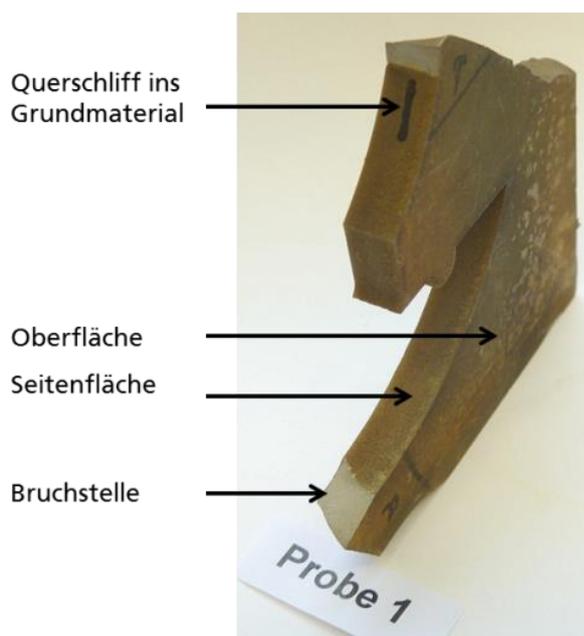
Schichtsystem CD 1119		
■ Grundsicht(en)	> ?	eventuell Ni-Strike
	> ~ 9 µm	Halbglanznickel
■ Zwischenschichten	> ~ 5-6 µm	Glanzkupfer
	> ~ 7 µm	Halbglanznickel
	> ~ 2-3 mm	Matt-Kupfer
■ Deckschicht	> ~ 30 µm	Epoxy

**Abb. 33: Ergebnisse Schichtsystemanalyse.**

Die Fragestellungen zur mechanischen Umarbeitung von größeren Magneten (z. B. aus Windkraftanlagen) in Magnete kleinerer Abmessungen wurden von Arelec im französischen Teil des Projektes bearbeitet. In diesem Zusammenhang wurde der Frage nachgegangen, ob das Zuschneiden der Magnete deren Oberflächeneigenschaften beeinflusst, speziell in Bezug auf eine eventuell notwendige Wiederbeschichtung.

Hierzu wurden Proben aus Schnittversuchen von Arelec untersucht. Hier war besonders auffällig, dass die bearbeiteten Flächen drastisch korrosionsanfälliger waren als es z. B. bei Bruchkanten der Fall war. Dabei handelte es sich im speziellen Fall um Schnittversuche mit Drahtrodieren, siehe hierzu Abb. 34 mit einer Beispielprobe.

Um die Ursache für das unterschiedliche Verhalten zu ermitteln, wurde die einzelnen Oberflächen mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht, siehe hierzu Abb. 35.



**Abb. 34: Probe aus Schnittversuchen.**

EDX-Analysen [w%]									
Element	Flächen ohne Korrosion				Flächen mit Korrosion				Kommentar
	Grundmaterial		Bruchstelle		Seitenfläche		Oberfläche		
Fe	70	8,4	59	55	15	12	27	23	Elemente wie erwartet
Nd	19	50	24	23	3,1	2,5	5,6	3,6	
Pr	6,0	24	8,3	7,8			1,9	1,0	
Gd	0,49		0,65	1,0					
B			7,5	7,1			3,6	6,8	
C	0,7	1,5	1,0	2,3	2,4	2,4	4,3	2,7	
O	2,1	13		3,4	<b>23</b>	<b>20</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	Höhere Anteile durch Korrosionsprodukte
Cu					<b>31</b>	<b>36</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>Hauptunterschied zwischen korrodiert - unkorrodiert!</b>
Zn					<b>25</b>	<b>27</b>	<b>11</b>	<b>17</b>	
Si							<b>0,30</b>	<b>0,42</b>	Unterschiedliche Werte für die beiden bearbeiteten Seiten
P			0,11		0,08		0,27	0,16	
Cl							<b>0,20</b>	<b>0,24</b>	
La							<b>0,69</b>	<b>0,42</b>	
K							<b>0,10</b>		
S							<b>0,18</b>		
Mg			0,55						
As	1,3	2,5							
Al		0,88							
Co		0,43							

**Abb. 35: EDX-Ergebnisse**

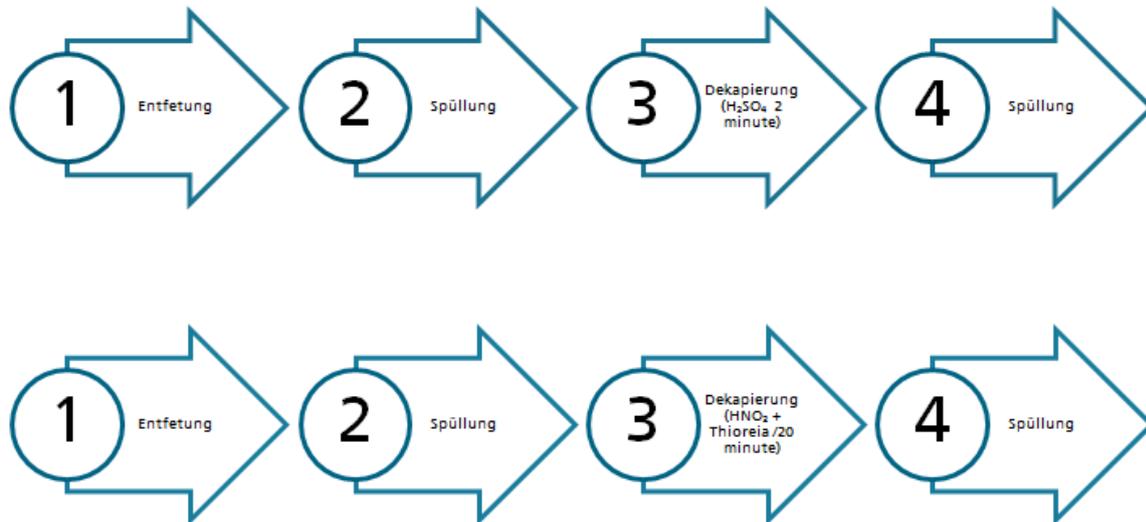
Die Ergebnisse zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Kupfer und Zink, die sich nur auf den korrodierenden Flächen finden. Ihren Ursprung haben diese Kontaminationen sicher in Reaktionsprodukten des beim Drahterodieren üblicherweise eingesetzten Messingdrahts. Dabei ist Kupfer das kritische Element, Kupferkontaminationen führen zur Ausbildung von Lokalelementen und damit zur Korrosion des hauptsächlich aus Eisen bestehenden Magnetwerkstoffes. Auf den mit „Oberfläche“ gekennzeichneten Bereichen findet sich deutlich weniger Kupfer, die hier zusätzlich auftretenden Elemente dürften vom Schleifprozess stammen (SiC-Körner). Leider war es mit Schleifen nicht möglich, das problematische Kupfer zu entfernen.

Folgende Ansätze zur Lösung des Problems sind denkbar:

- Verwendung von anderem Draht
- Trocknen unmittelbar nach dem Bearbeiten
- Verwendung von Korrosionsschutzmittel sofort nach der Bearbeitung
- chemisches Auflösen von Kupfer

Es wurde deshalb weiter untersucht, wie sich diese Rückstände entfernen lassen, um anschließend ein haftfeste erste galvanische Schicht abscheiden zu können.

Hierbei wurden zwei saure Elektrolyte nach folgendem Prozessschema benutzt (siehe Abb. 36):



**Abb. 36: Prozessabläufe zur Entfernung von störenden Rückständen.**

Um die Effektivität der Rückstandsentsorgung zu prüfen, wurde die Oberfläche mittels Raster-elektronenmikroskopie untersucht. Der Elektrolyt auf Basis Schwefelsäure hat die Nd-Fe-B-Legierung sehr stark angegriffen. Das Material zeigte eine selektive Auflösung von Phasen mit höherem Anteil in Nd und B (Abb. 37). Die verbliebene Phase zeigte keine mechanische Stabilität mehr, was für die weiter Bearbeitung von Oberfläche (Nickelbeschichtung) ungeeignet ist. Ein zweiter Elektrolyt auf Salpetersäure-Basis wurde getestet. Mit Hilfe von Korrosionsinhibitoren wurde hierbei die Oberfläche der Nd-Fe-B-Legierung in einen kontrollierten Prozess aufgelöst und die Rückstände entfernt (s. Abb. 38). Diese Variante ist für die Vorbehandlung besser geeignet, weil die Oberfläche mechanisch stabil bleibt und somit die erforderliche Haftgrundlage für die Nickelschicht darstellt. Es ist dabei anzumerken, dass die Korrosionsschutzwirkung von Beschichtungssystemen sehr stark von der Grenzfläche zwischen Schicht und Substrate abhängig sein kann.

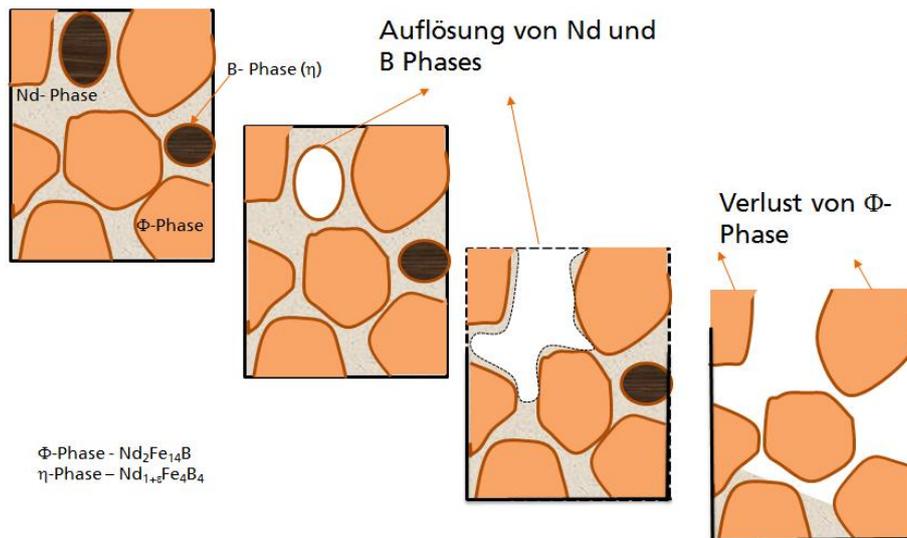


Abb. 37: Selektive Phasenauflösung.

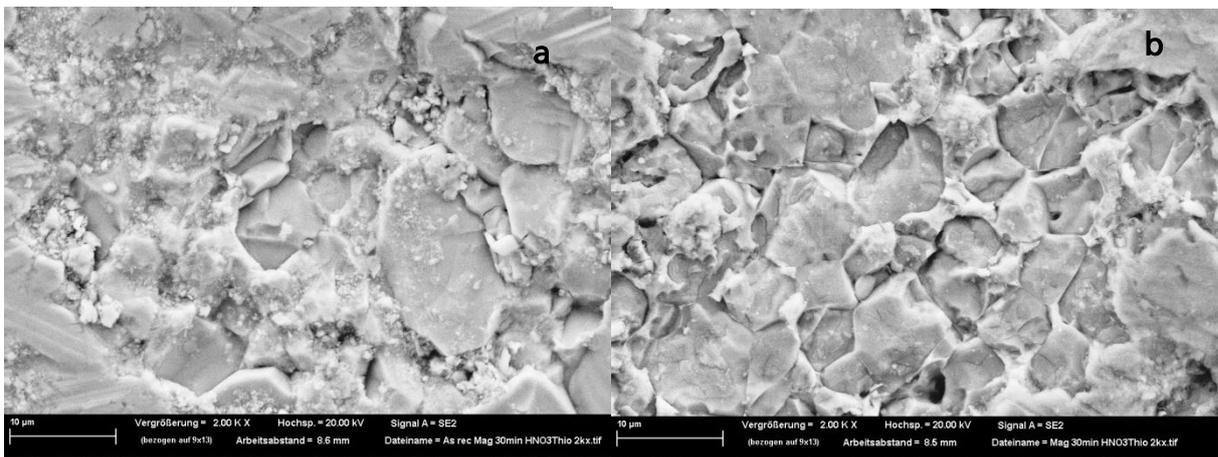


Abb. 38: Nd-Fe-B-Oberfläche vor (a) und nach (b) der Vorbehandlung mit Salpetersäure + Korrosionsinhibitor

Für die weitere Korrosionsschutzbeschichtung der Oberfläche wurde eine einfache Nickelschicht ausgewählt, abgeschieden aus einem Basiselektrolyten (Watt's-Typ). Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt: Die Oberflächen von drahterodierten Magneten lassen sich so vorbehandeln, dass eine haftfeste Vernicklung erreicht werden kann (siehe Abb. 39). Die erforderliche Vorbehandlung muss allerdings verhältnismäßig aggressiv, sprich abtragend, arbeiten, um die Oberflächenstörungen wie getrennt zu entfernen.

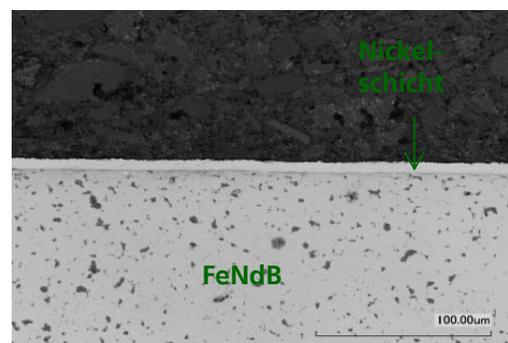
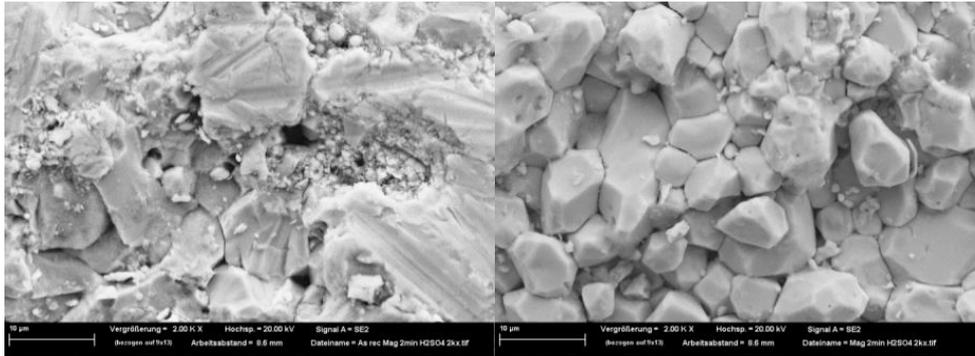


Abb. 39: Querschliff durch eine vernickelte Probe.

Eine galvanotechnisch übliche Beize ist dabei als zu aggressiv einzuschätzen, hierbei werden zwar die Oberflächen blank, aber gleichzeitig erfolgt ein erkennbarer Angriff speziell auf die Korngrenzen der gesinterten Metalle (siehe Abb. 40 rechts).



**Abb. 40: links: Magneto­berfläche wie getrennt, starke Oberflächen-Kontaminationen. rechts: Magneto­berfläche ge­beizt, Kontaminationen entfernt, aber Angriff auf die Korngrenzen.**

Als Konsequenz ergibt sich, dass entweder eine spezielle, z. B. durch einen Beizinhibitor angepasste Beize, ein mechanischer Abtrag z. B. durch angepasstes Geleitschleifen oder eine abgestimmte Kombination aus beiden erforderlich sind. Die Schicht in Abb. 39 wurde z. B. auf einer manuell geschliffenen Probe abgeschieden.

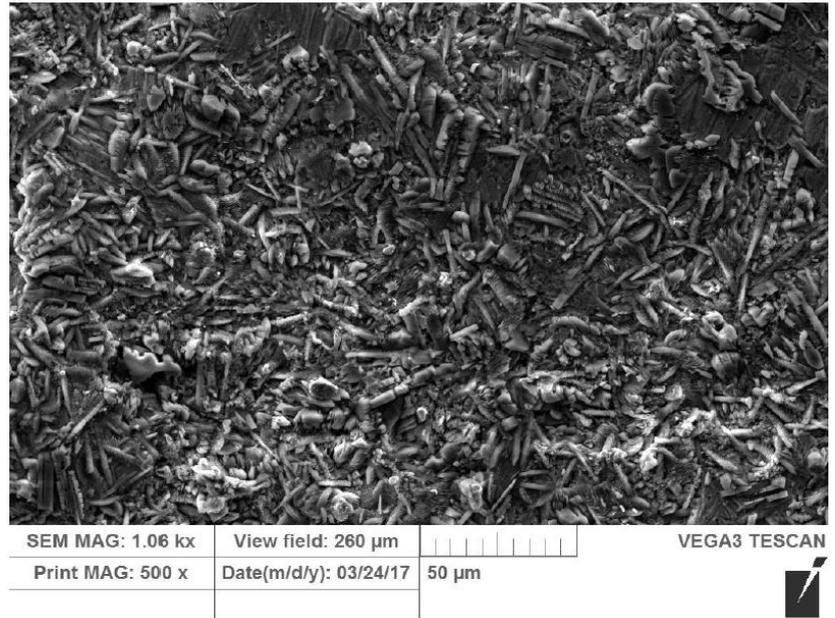
Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die haftfeste Beschichtung bearbeiteter Magneten möglich ist. Es ist allerdings davon auszugehen, dass hierfür eine spezielle Auswahl an galvanischen Prozessen und / oder eine spezielle Kombination mit einem vorgelagerten Geleitschleifen notwendig ist. Dies ist als nicht branchenüblich einzuschätzen, eine einfache Vergabe von Lohnaufträgen zur Beschichtung zugeschnittener Magnete ist somit kritisch zu sehen. Die Einrichtung einer Anlage auf eine spezifische Aufgabenstellung hin ist zwar durchaus üblich, setzt allerdings größere Auftragsmengen und einen entsprechenden Invest voraus. Eine, wie von Seiten Arelec bevorzugte einfache Tauchbehandlung ist hierbei nicht möglich, sofern man Wert auf die maximale Korrosionsschutzwirkung legt.

Eine andere, grundsätzlich einfachere Möglichkeit, die Oberfläche der Nd-Fe-B-Legierungen gegen korrosiven Angriff zu schützen, ist die Phosphatierung. Eine Phosphatierung ist eine sogenannte Konversionsschicht, die relativ effektiv und einfach herzustellen ist. Damit können nur eingeschränkte Korrosionsschutzwirkungen erreicht werden, die nach Aussage von Arelec aber durchaus interessant für das gedachte Einsatzgebiet sein können.

Speziell das Zink-Phosphatieren ist eine rein chemische Behandlung. Im Gegensatz zur elektrolytischen Behandlung wird das Werkstück ohne die Notwendigkeit einer elektrischen Kontaktierung in eine wässrige Zink-Phosphatlösung getaucht. Durch verschiedene chemisch-/ elektrochemische Reaktionen bildet sich eine dünne Konversionsschicht. Diese erzeugte Oberflächenschicht besteht aus fest anhaftenden Zink-Phosphaten, die durch ihre poröse Struktur ein sehr gutes Saugvermögen aufweisen und somit den idealen Untergrund für eine weitere Behandlung mit Ölen und Lacken oder weitere Beschichtungsprozesse bildet. Durch das nachträgliche Einölen erhält eine Zink-Phosphatierung darüber hinaus sehr gute, temporäre Korrosionsschutzeigenschaften. Wie alle Phosphatierungen verbessert auch die Behandlung mit Zink-Phosphat die Gleiteigenschaften einer Oberfläche. Dies wirkt sich leicht reib- und verschleißmindernd bei nachfolgenden Umformprozessen aus.

Zur Phosphatierung der Nd-Fe-B Magneten wurden kommerzielle Bäder der Fa. Chemmetall eingesetzt (Gardolene V6522, Gardobond Z3300 und Gardobond H7133). Die Prozessparameter waren für das Magnetmaterial nicht gegeben. Durch Versuchsbeschichtungen mit Parametervariationen wurde getestet eine geeignete oberflächliche Beschichtung zu erreichen. Dabei wurden die Konzentration der Elektrolyte, die Temperatur und die Prozesszeit variiert.

Abbildung 41 zeigt ein Beispiel einer guten Oberflächenbelegung. Die Zn-Phosphatkristalle bilden ein gut verteiltes Netz an der Oberfläche der Magneten. Für sehr kurze Prozesszeiten bleibt ein Teil der Magnetoberfläche unbeschichtet, was die Effektivität des Korrosionsschutzes stark reduziert bzw. die Korrosionsgeschwindigkeit sogar erhöhen kann. Ein anderer positiver Aspekt dieses Prozesses ist das Ausbleiben von speziellen sauren Vorbehandlungsschritten, weil die Phosphatierung ein Auflösungseffekt auf der Oberfläche hat. Dies gestaltet den Prozess insgesamt recht einfach.



**Abb. 41: Zinkphosphatierte Magnetoberfläche.**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zinkphosphatierung eine ernstzunehmende Variante des Oberflächenschutzes beim Wiederaufarbeiten von gebrauchten Magneten ist. Sicherlich können hier lange nicht die Schutzwirkungen wie mit anderen Systemen erreicht werden, die Applikation als einfaches Tauchverfahren ist demgegenüber verhältnismäßig mit wenig Aufwand verbunden.

#### **2.1.4. AP4: Werkstoffliches Recycling zur Rückgewinnung der Magnetlegierung**

##### **2.1.4.1. AP4.1: Aufarbeitung von Altmagneten in geeignete Ausgangsmaterialien** (Bearbeitung CEA)

In diesem AP wurde die Rückgewinnung von Magnetmaterial durch das Einschmelzen von Altmagneten in einer Bandgießanlage (Strip-Caster, Chargengröße 25 kg) untersucht. Die Herstellung der Legierung und die Weiterverarbeitung zu Magneten erfolgten beim französischen Projektpartner CEA.

Nachdem sich die Installation und Inbetriebnahme des Strip-Casters etwas verzögerte, wurden im Projektzeitraum zunächst Versuche mit Primärmaterial (als Referenz) und Versuche mit gemischten Einsatzmaterialien (70 Gew.-% Primär- und 30 Gew.-% Altmagnet-Material) gefahren. Bei letzterem Versuch wurden zusätzlich 0,5 Gew.-% Seltene Erden beigefügt um Verluste während des Strip Castings und des Mahlens zu kompensieren. Die erhaltenen Flakes wurden anschließend mittels Wasserstoffversprödung und Mahlen in einer Gegenstrahlmühle zu Pulver weiterverarbeitet. Dieses wurde letztlich durch Ausrichten, Pressen, Sintern und Glühen zu anisotropen Sintermagneten weiterverarbeitet.

Die erhobenen Daten wurden dem AP 6 zur Weiterverarbeitung (LCA) zur Verfügung gestellt und beim französischen Partner CEA bearbeitet.

### 2.1.4.2. AP4.2: Einsatz von Wasserstoff zur Herstellung von Sintermagneten mit rezykliertem Anteil (Bearbeitung CEA)

In diesem AP wurden Altmagnete mittels Wasserstoffversprödung in Magnetpulver umgewandelt (s. Abb. 42). Dieses wurde in einer Gegenstrahlmühle zu feinerem Pulver gemahlen und im Anschluss zu unterschiedlichen Anteilen mit Sinterpulver aus Primärmaterial gemischt. Die Mischpulver wurden durch Ausrichten, Pressen, Sintern und Glühen zu anisotropen Sintermagneten weiterverarbeitet.

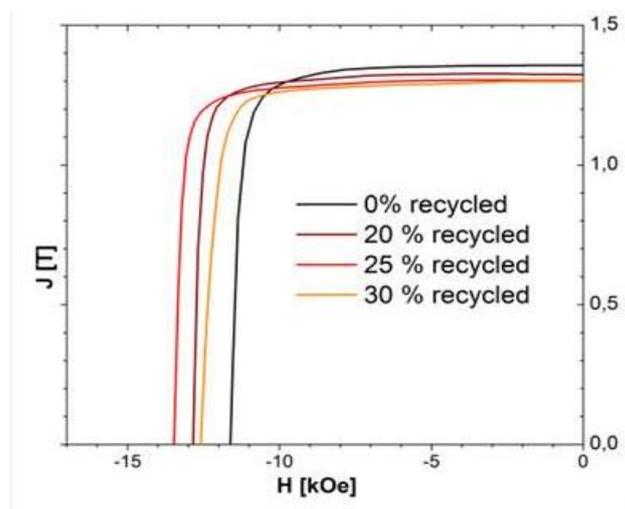


**Abb. 42: Magnetpulver aus Altmagneten (nach Wasserstoffversprödung, Aufnahme von CEA zur Verfügung gestellt).**

Abbildung 43 zeigt die gemessenen Entmagnetisierungskurven der Sintermagnete mit variiertem Rezyklat-Anteil (0 % - reines Primärmaterial, Referenz).

Aufgrund des höheren Dy-Gehalts des Altmagnetpulvers ist bis zu einer Beimischung von 25 Gew.-% ein Anstieg in der Koerzitivfeldstärke zu beobachten, während die Remanenz mit höherem Rezyklatanteil stetig abnimmt.

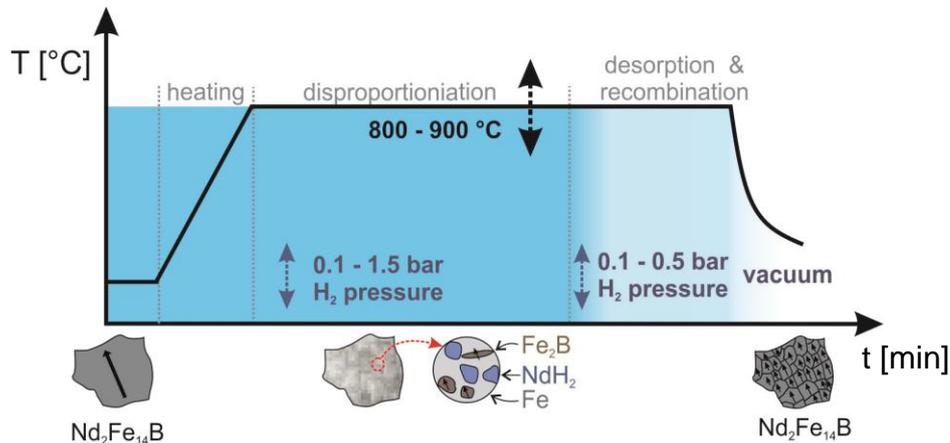
Die erhobenen Daten wurden dem AP 6 zur Weiterverarbeitung (LCA) zur Verfügung gestellt und beim französischen Partner CEA bearbeitet.



**Abb. 43: Entmagnetisierungskurven der Sintermagnete mit variiertem Rezyklatanteil (Daten von CEA zur Verfügung gestellt).**

### 2.1.4.3. AP4.3: dHDDR Prozessierung von Altmagneten zur Herstellung anisotroper kunststoffgebundener Magnete (Bearbeitung Fh IWKS)

In diesem Arbeitspaket wurden ausgediente Sintermagnete durch einen HD-Prozess zunächst zu Magnetpulver verarbeitet. Eine Aufwertung des Magnetpulvers wurde mittels des anschließenden dHDDR-Prozess (*dynamic hydrogenation, disproportionation, desorption, and recombination*) erreicht, durch den die einkristallinen  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Pulverpartikel des HD-Pulvers in feinstkörnige polykristalline, anisotrope Pulverpartikel umgewandelt werden. Abbildung 44 stellt schematisch den Ablauf des dHDDR-Prozesses dar.

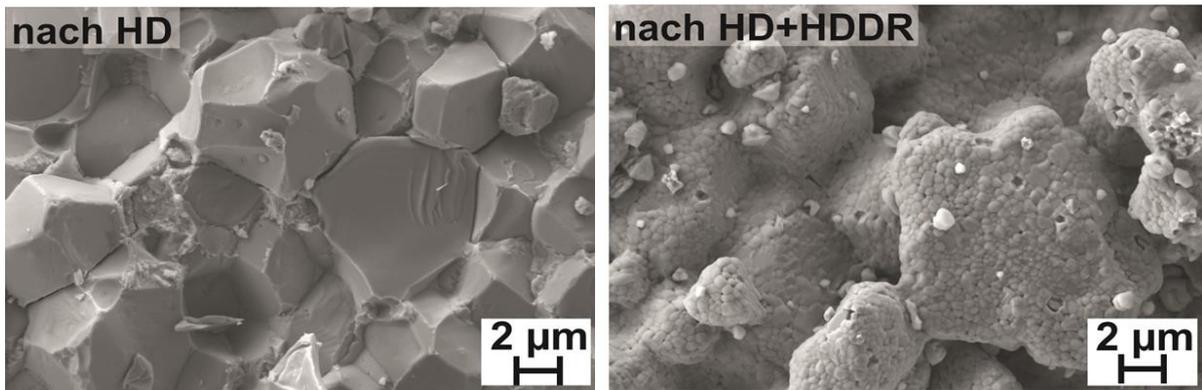


**Abb. 44: Schematischer Ablauf des dHDDR-Prozesses.**

Das Prinzip des dHDDR-Prozesses stützt sich auf eine reversible wasserstoffinduzierte Phasenumwandlung. Durch Erhitzen des Magnetpulvers unter Wasserstoff auf Temperaturen  $> 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  findet ein vollständiger Zerfall des Gefüges (disproportionation) statt, das unter Vakuum (desorption) wieder zur 2-14-1-Phase rekombiniert (recombination). Durch Wahl geeigneter Prozessparameter wie Druck und Temperatur, kann dabei die Kristallorientierung des ursprünglichen Kornes auf die neuen, feineren Kristallite übertragen werden. Das resultierende Pulver ist hoch anisotrop und eignet sich daher hervorragend zur Herstellung anisotroper kunststoffgebundener Magneten mit hoher Energiedichte.

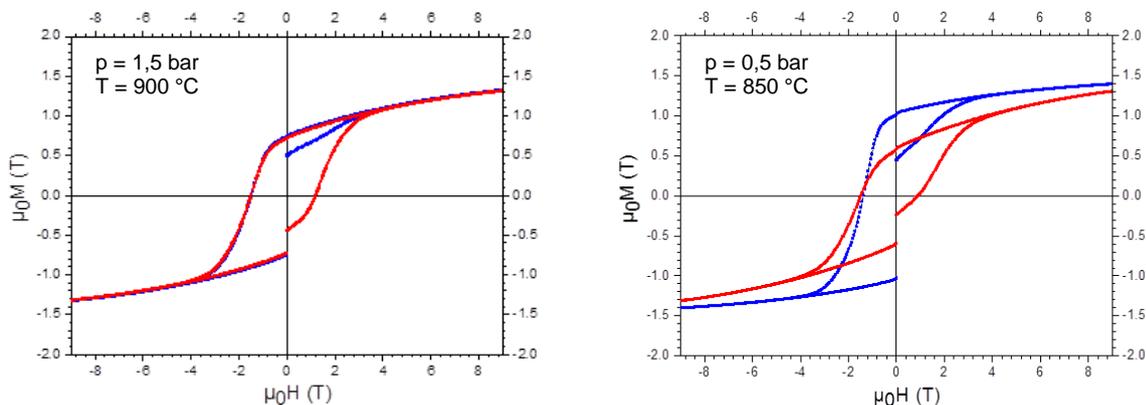
Als Ausgangsmaterial in diesem Arbeitspaket dienten Magnete aus einer Windkraftanlage (ca. 3 Gew.-% Dy), die vom Projektpartner Arelec zur Verfügung gestellt wurden. Nach manueller Zerkleinerung und dem Abtrag der Beschichtung sowie korrodierter Stellen durch Sandstrahlen wurden diese zunächst in einem HD-Prozess bei 50 bar  $\text{H}_2$ -Druck versprödet. Um die legierungsspezifisch optimalen dHDDR-Prozessbedingungen zu bestimmen, wurde eine Druck-Temperatur-Serie durchgeführt. Dabei wurde der Druck in 5 Stufen zwischen 0,1 bar und 1,5 bar und die Temperatur in 3 Stufen zwischen  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  für jeden eingestellten Druckwert variiert.

Abbildung 45 zeigt eine Rasterelektronen-Mikroskop (REM) Aufnahme des Pulvers nach dem HD- (linkes Bild) und nach dem anschließenden dHDDR-Prozess. Die durch das dHDDR-Verfahren hervorgerufene polykristalline Struktur der Pulverpartikel ist deutlich erkennbar (rechtes Bild).

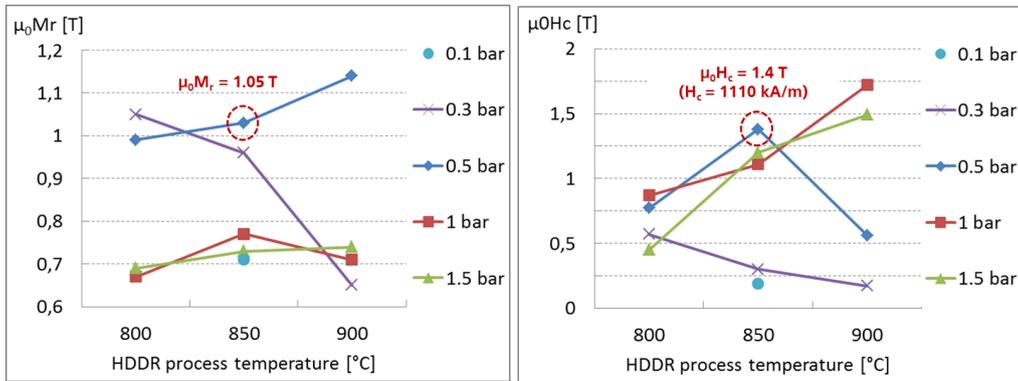


**Abb. 45: REM Aufnahmen des Pulvers nach HD- (linkes Bild) und nach zusätzlicher dHDDR-Prozessierung (rechtes Bild).**

Zur magnetischen Charakterisierung wurden die Pulver in Wachs eingebettet, im Magnetfeld ausgerichtet und die Hysteresen sowohl der magnetisch leichten als auch der magnetisch schweren Achse an einem physikalischen Objektmesssystem (Physical Properties Measurement System - PPMS) gemessen. Für Prozessdrücke größer 1 bar zeigten die resultierenden Proben ein rein isotropes Verhalten (vgl. Abb. 46 linker Graph; blau: magnetisch leichte Achse; rot: magnetisch schwere Achse), während die Pulver bei 0,5 bar für alle Temperaturen ein anisotropes Verhalten aufweisen (Abb. 46 rechter Graph). Mit einer Koerzitivfeldstärke von  $\mu_0 H_c = 1,4 \text{ T}$  (1110 kA/m) und einer Remanenz von  $\mu_0 M_r = 1.05 \text{ T}$  zeigte dabei das Pulver, das bei 0,5 bar und 850°C prozessiert wurde die besten magnetischen Eigenschaften. Eine Übersicht der magnetischen Eigenschaften aller hergestellten Pulver fasst Abb. 47 zusammen.



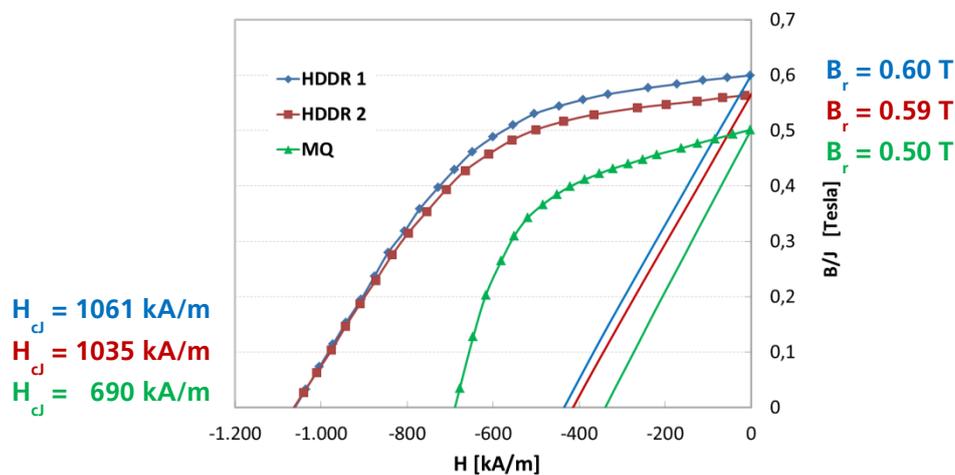
**Abb. 46: Entmagnetisierungskurven (leichte und schwere Achse) von isotropem (li. Graph) und anisotropem (re. Graph) dHDDR-Pulver. Anmerkung: Die magnetischen Eigenschaften wurden direkt auf die eingewogene Masse an Magnetmaterial bezogen (angenommene Dichte 100 %), um Verzerrungen bedingt durch die Einbettung in Wachs zu vermeiden.**



**Abb. 47: Remanenz  $\mu_0 M_r$  (links) und Koerzitivfeldstärke  $\mu_0 H_c$  (rechts) der in Wachs eingebetteten dHDDR prozessierten Pulver in Abhängigkeit von Prozessdruck und – Temperatur.**

Begleitend wurde nach jedem Prozessschritt der Sauerstoff-Gehalt der Pulver überprüft (detaillierten Ergebnisse werden an dieser Stelle nicht gezeigt). Die Sauerstoffwerte liegen nach allen Prozessschritten in einem guten Bereich ( $< 0,2$  Gew.-%). Auch eine kurzzeitige Lagerung des Pulvers an Luft ist hinsichtlich einer Aufnahme von Sauerstoff nicht problematisch.

Nach Bestimmung der optimalen Parameter wurden mehrere dHDDR-Prozesse gefahren, um dem französischen Projektpartner Arelec ausreichend Material zur Herstellung kunststoffgebundener anisotroper Magnete zur Verfügung stellen zu können. Bei Arelec wurde das Magnetpulver mit einem bei Raumtemperatur aushärtenden Epoxidharz vermischt und in einem Magnetfeld in eine zylindrische Form gepresst. Als Vergleichsproben wurden auch Magnete aus kommerziellem Magnetpulver (MQP-B<sup>+</sup>, isotrop) der Firma Magnequench (MQ) hergestellt und analysiert. Abbildung 48 zeigt die Entmagnetisierungskurven der bei Arelec hergestellten und vermessenen Magnete.



**Abb. 48: Entmagnetisierungskurven kunststoffgebundener Magnete bestehend aus Epoxidharz und kommerziellem MQ-Magnetpulver (grüne Kurve) bzw. HDDR prozessiertem Altmagnetmaterial (blaue, rote Kurve) - alle Messungen durchgeführt bei Arelec.**

Es zeigte sich, dass die dHDDR-Proben im Vergleich zum MQ-Magneten sowohl eine höhere Remanenz  $B_r$  ( $+ \sim 0,1$  T) als auch eine deutlich höhere Koerzitivfeldstärke  $H_c$  (Zunahme  $> 350$  kA/m) aufweisen. Letzterer Anstieg resultiert dabei nicht nur aus der feineren Korngröße des dHDDR-Pulvers, sondern ist auch auf den erhöhten Dy-Gehalt (ca. 3 Gew.-% im Vergleich zum kommerziellen Magnetpulver, das frei von schweren Seltenen Erden ist) zurückzuführen.

Ein höherer Dy-Gehalt hat normalerweise eine Abnahme in der Remanenz zur Folge, der hier beobachtete Anstieg in  $B_r$  erklärt sich durch die Anisotropie des  $d$ HDDR-Pulvers.

In der Laboranlage von Arelec stellte es sich als schwierig heraus, Proben mit exakt identischer Beladung und Geometrie herzustellen. Zudem sollte erwähnt werden, dass die Beladung mit Magnetpulver zwecks einer besseren Verarbeitbarkeit mit 50 – 55 Vol.-% Magnetanteil sehr gering gehalten wurde (typische Beladungsraten liegen bei ca. 60 Vol.-% bei spritzgegossenen und > 70 Vol.-% bei gepressten kunststoffgebundenen Magneten (Ma et al.,2002)). Jedoch konnte sowohl eine Steigerung in  $B_r$  als auch in  $H_c$  durch den Einsatz von  $d$ HDDR prozessiertem Altmagnetmaterial im Vergleich zum in der Industrie vornehmlich eingesetzten MQ-Pulver klar erreicht werden.

Das Feld zum Ausrichten der Magnetpartikel bei der Herstellung der Magnete betrug lediglich 0.6 T. Nichtsdestotrotz wiesen die HDDR Proben bei der späteren magnetischen Charakterisierung (Messung in axialer als auch in diametraler Richtung) eine Anisotropie von ca. 35 % auf, während für die MQ-Proben keine Vorzugsrichtung erkennbar war.

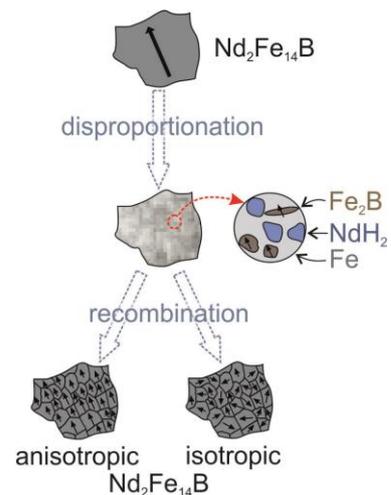
In einem zweiten Durchlauf wurde auch isotropes  $d$ HDDR-Pulver prozessiert und Arelec zur Weiterverarbeitung zu kunststoffgebundenen Magneten zur Verfügung gestellt (s. auch Abb. 49). In diesem Fall lagen die erhaltenen Werte ebenfalls über denen, die mit gleicher Herstellungsprozedur und dem Einsatz kommerziell erhältlichem MQ-Magnetpulvers (rascherstarrt) erzielt wurde.

Zu Charakterisierungszwecken wurden die Magnetpulver zu kunststoffgebundenen Magneten an der Projektgruppe IWKS weiterverarbeitet. Dabei wurden zunächst Versuche mit kommerziell erhältlichem Magnetpulver (MQP-B<sup>+</sup>) durchgeführt, das auch bei der industriellen Herstellung solcher Magnete verwendet wird. Hierbei handelt es sich um isotropes Pulver, das mittels Rascherstarrung (Melt-Spinning) und anschließendem Mahlen der Flakes hergestellt wird.

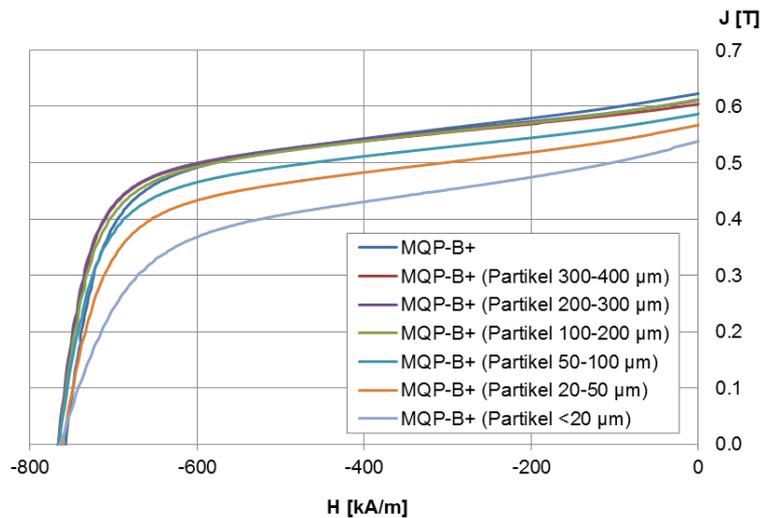
In einer Versuchsreihe wurde das MQP-B<sup>+</sup> Magnetpulver mit PTFE-Pulver (Polytetrafluorethylen) im Verhältnis 80:20 Gew.-% gemischt (~ 54 Vol.-% Magnetpulver) und bei verschiedenen Pressdrücken verdichtet. Anschließend wurden die Proben bei 360 °C gesintert und nach einem langsamen Abkühlschritt magnetisch charakterisiert. Es kristallisierte sich heraus, dass sich eine höhere Verdichtung des Pulvergemischs positiv auf die remanente Polarisation auswirkt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde das Massen-Mischungsverhältnis Magnet-/PTFE-Pulver zwischen 100:0 (reines MQP-B<sup>+</sup> Pulver) und 70:30 (70 Gew.-% MQP-B<sup>+</sup>:30 Gew.-% PTFE) variiert. Dabei zeigte sich, dass eine Beimischung von ≤ 5 Gew.-% PTFE Pulver nicht ausreichend ist, um dem Magnet die nötige Stabilität zu verleihen. Bei einer Zugabe von ≥ 30 Gew.-% PTFE-Pulver blieben die Grünlinge während des Sinterns nicht mehr formstabil. Das optimale Magnetpulver:PTFE-Mischungsverhältnis wurde zu 90:10 Gew.-% bestimmt, was umgerechnet einem Volumenanteil an Magnetpulver von 73 Vol.-% entspricht.

Wie bereits erwähnt, wird üblicherweise rascherstarrtes Material für die Herstellung kunststoffgebundener Magnete verwendet. Das durch den HDDR-Prozess aus gesinterten Altmagneten gewonnene Rezyklat wird sich in der Größenverteilung und Form der Magnetpartikel deutlich vom kommerziellen Produkt unterscheiden. Um eine Abschätzung zu haben, welche Partikelgröße vorteilhaft sein könnte, wurde das MQP-B<sup>+</sup> Pulver durch Sieben in Partikelgrößenfraktionen unterteilt und diese zu PTFE-gebundenen Magneten verarbeitet.



**Abb. 49: Schematische Darstellung der magnetischen Ausrichtung eines anisotropen/isotropen Magnetpartikels.**



**Abb. 50: Versuchsreihe zum Einfluss der Partikelgröße auf die magnetischen Eigenschaften der Magnete (Magnetpulver-Anteil 90 Gew.-%, Presskraft 1,5 t für alle Proben).**

Wie die Entmagnetisierungskurven in Abb. 50 zeigen, nimmt die Remanenz ab einer Partikelgröße kleiner 100 µm ab, eine zu geringe Partikelgröße ist - zumindest für das melt-spun Pulver - daher nicht vorteilhaft.

Weiter wurden gemischte Altmagnetlegierungen prozessiert um den Einfluss von Legierungsabweichungen zu untersuchen. Als Ausgangsmaterial dienen die vom Projektpartner Arelec zur Verfügung gestellten Magnete (im Folgenden als Magnet A bezeichnet) und ein zweites Magnetmaterial (Magnet B). Von diesem wurde als Vorarbeit ebenfalls eine dHDDR-Temperatur-Druckserie durchgeführt, um die optimalen Parameter für die Herstellung anisotropen Pulvers aus dieser Altmagnetlegierung zu evaluieren (→ 840 °C bei 900 mbar H<sub>2</sub>-Druck). Die chemische Zusammensetzung der beiden verwendeten Legierungen gemäß optischer Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES) zeigt Tab. 6. Für den dHDDR- Prozess beeinflussen vor allem der Dy-, Co- und Ga-Gehalt Einfluss auf die optimal zu wählenden Parameter.

**Tab. 6 Chemische Zusammensetzung der für die Mischreihe verwendeten Altmagnete gemäß ICP-Analyse**

	Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co	Cu	Ga	Ti	Al	Gd	Ho	Nb
Magn A	21.0	5.3	2.99	68.2	0.92	1.01	0.19	0.17	0.12	0.11	-	-	-
Magn B	17.5	5.06	5.71	65.9	0.96	2.04	0.31	0.25	-	0.79	0.56	0.64	0.28

Nach der Wasserstoffversprödung wurden die beiden Legierungen zu gleichen Teilen gemischt und bei drei dHDDR-Druck-/Temperaturkombinationen prozessiert:

- 850 °C, 500 mbar ("beste" Parameter für anisotropes dHDDR-Pulver der Magnetlegierung A)
- 845 °C, 700 mbar
- 840 °C, 900 mbar ("beste" Parameter für anisotropes dHDDR-Pulver der Magnetlegierung B)

Abbildung 51 zeigt die gemessenen Entmagnetisierungskurven (PPMS-Messungen) von anisotropen dHDDR-Pulvern prozessiert bei 500 mbar und 850 °C. Die schwarzen Kurven gehören dabei zu der reinen Magnetlegierung A, die roten zu der Mischlegierung aus A+B (Mischungsverhältnis 1:1), jeweils gemessen in Richtung der magnetisch leichten (durchgezogene Linien) sowie der magnetisch harten (gestrichelte Linien) Achse. Eine deutliche Abnahme sowohl in Remanenz (von 1,03 T auf 0,7 T) als auch in Koerzitivfeldstärke  $\mu_0H_c$  (von 1.4 T auf 0.37 T) ist durch die Beimischung der Legierung B zu erkennen.

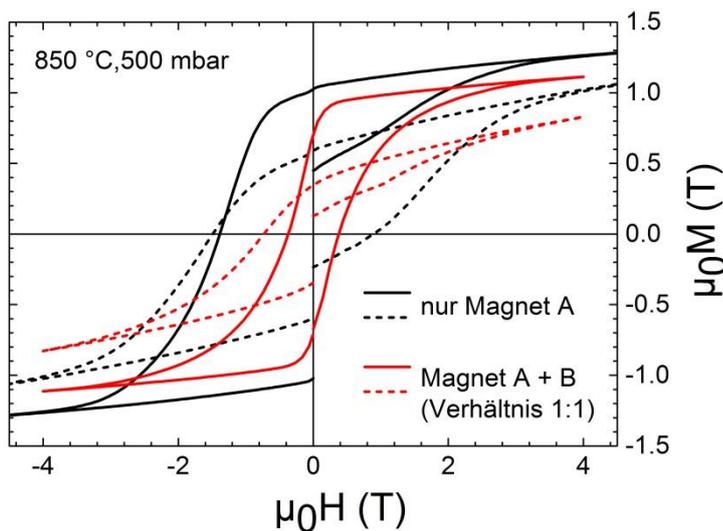


Abb. 51: Entmagnetisierungskurven der reinen Magnetlegierung A (schwarze Graphen) und der Mischlegierung (rote Graphen, Magnet A+B). Die durchgezogenen Linien entsprechen der Messung in Richtung der magnetisch leichten, die gestrichelten in Richtung der magnetisch schweren Achse.

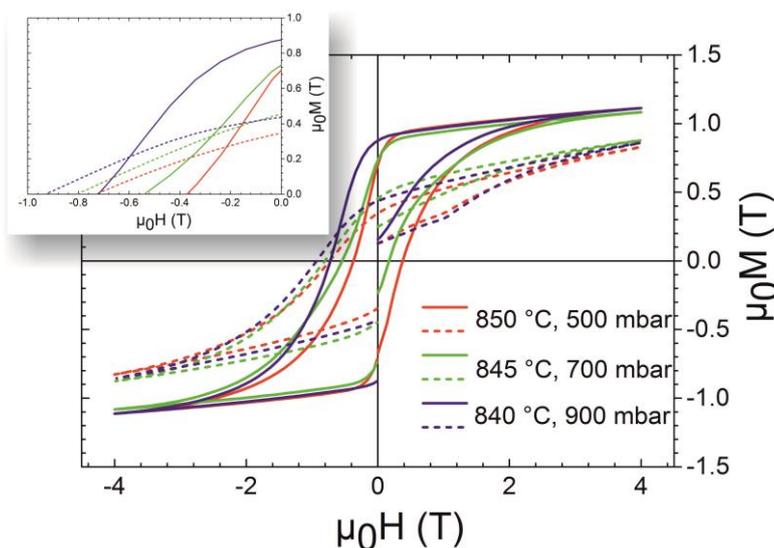
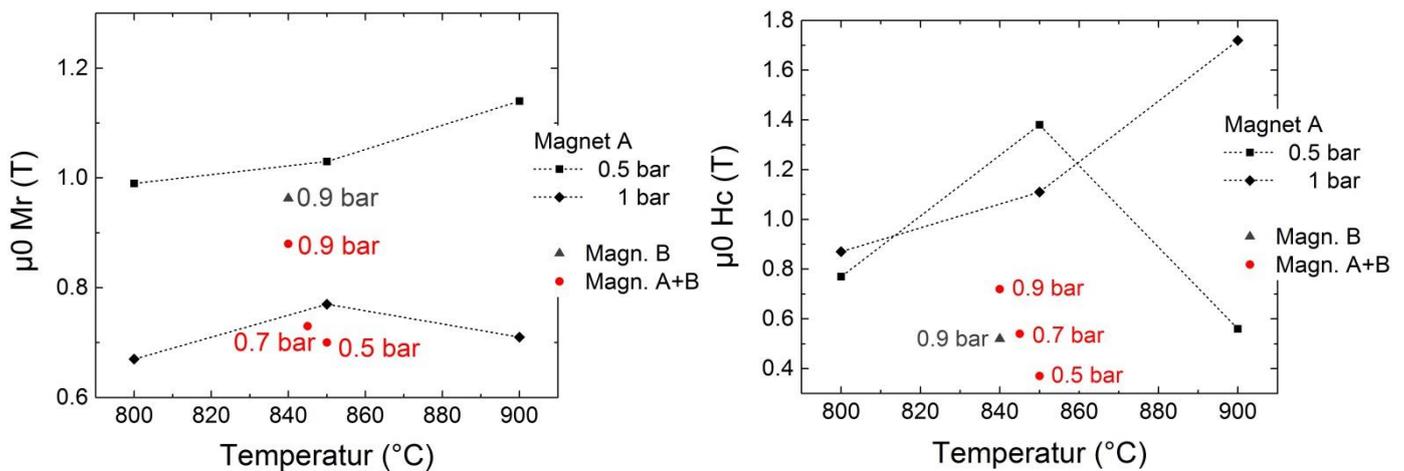


Abb. 52: Entmagnetisierungskurven der Mischlegierung (Magnetmaterial A+B) prozessiert bei unterschiedlichen Parametern. Die durchgezogenen Linien entsprechen der Messung in Richtung der magnetisch leichten, die gestrichelten in Richtung der magnetisch schweren Achse.

Wie in Abb. 52 zu sehen, nimmt für die Mischlegierung sowohl die Remanenz  $\mu_0M_r$  als auch die Koerzitivfeldstärke  $\mu_0H_c$  mit steigendem Druck zu. Da sowohl Co als auch Dy die  $Nd_2Fe_{14}B$ -Phase stabilisieren, ist ein höherer Druck für die Disproportionierung des Materials erforderlich. Die erzielten Werte für  $\mu_0M_r$  und  $\mu_0H_c$  sind nochmals in Abb. 53 zusammengestellt und in Relation zu den Werten der reinen Magnetlegierungen A (schwarz) und B (grau) gesetzt, wobei die Mischlegierung (rote Punkte) deutlich niedrigere Werte als die der reinen Legierung A bzw. vergleichbare Werte der Legierung B erreicht.



**Abb. 53: Zusammenstellung der Remanenzen  $\mu_0 M_r$  (Abbildung links) und Koerzitivfeldstärken  $\mu_0 H_c$  (Abbildung rechts) für die reine Magnetlegierung A, Legierung B sowie für die Mischlegierung A+B in Abhängigkeit von Prozessdruck- und Temperatur.**

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den dHDDR-Prozess eine deutliche Aufwertung des Magnetmaterials für den Einsatz in anisotropen kunststoffgebundenen Magneten erzielt werden kann. Jedoch beeinflusst die chemische Zusammensetzung des Altmagnetmaterials stark die zu wählenden Parameter um letztlich anisotropes Magnetpulver zu erhalten. Bei ausreichend großen Mengen sortenreinen Magnetmaterials ist es sinnvoll dieses durch geeignete Wahl der Prozessparameter in anisotropes HDDR-Material zu überführen. Für gemischte Legierungen hingegen scheint es zweckmäßiger, dieses unter viel Druck und Temperatur in isotropes HDDR-Pulver zu überführen. Eine Patentanmeldung zu diesem Thema ist seitens der Fraunhofer Projektgruppe IWKS im Jahr 2017 erfolgt.

## 2.1.5. AP5: Rohstoffliches Recycling zur Rückgewinnung der SE-Metall oder SE-Verbindungen

### 2.1.5.1. AP5.1: Schmelzflusselektrolyse

(Bearbeitung Fh IPA)

Bei der Aufbereitung von Nd-Fe-B-Magneten mittels hydrometallurgischer oder pyrometallurgischer Verfahren fallen Neodym und andere Seltene Erden als Oxid- oder Chloridsalz an. Dies gilt insbesondere für die Arbeitspakete 5.3 mit verschiedenen Fällungsreaktionen und Bioleaching (SE-Oxid) und 5.4 mit der Carbochlorierung (SE-Chlorid) im Projekt. Die Reduktion dieser Salze zum Metall als Abschluss des Recyclingprozesses wurde in bisherigen Veröffentlichungen und Forschungsprojekten kaum behandelt ((Bast et al., 2014; Binnemans et al., 2013)). Zur Wiederverwendung der Seltenen Erden für Magnete und anderer Anwendungen ist jedoch die Produktion von Metall erforderlich.

In der Primärproduktion der Seltenen Erden, die vorrangig in China betrieben wird (Charalampides et al., 2015), wird Neodym größtenteils mittels Schmelzflusselektrolyse von Neodymoxid ( $Nd_2O_3$ ) in geschmolzenem Neodymfluorid-Lithiumfluorid ( $NdF_3$ -LiF) durchgeführt. Dieses Verfahren wurde in den 1980er Jahren vom Hall-Héroult-Prozess aus der Aluminiumherstellung adaptiert. Nach Vogel und Friedrich arbeiten die industriellen Zellen normalerweise bei 3 kA und einer Stromausbeute von etwa 70 %. Die Zelle misst ca. 40 cm im Durchmesser und 35 cm in der Höhe und kann ca. 2 t Neodym pro Monat bei einer Ausbeute von 95 % produzieren. Die

Zellspannung beträgt 9 bis 11 V, der Energieverbrauch beträgt ca. 13 kWh pro kg produziertem Neodyms. Durch die hohe Temperatur (1150 °C) wird das Neodym-Metall flüssig am Boden der Zelle aufgefangen (Vogel und Friedrich, 2015).

Das im Arbeitspaket 5.4 entstehende Neodymchlorid kann mit diesem Verfahren nicht elektrolysiert werden. Es ist deshalb sinnvoll, einen chloridbasierten Elektrolyten zu verwenden. Die industrielle Elektrolyse von Neodymchlorid war bis ca. 1980 die wichtigste Quelle für Neodym-Metall. Als Elektrolyt wird normalerweise eine Kaliumchlorid-Schmelze bei 1100 °C verwendet, aber auch andere Chloride der Alkali- und Erdalkalimetalle sind möglich (Zhu, 2013). Dieses Verfahren hat jedoch eine sehr schlechte Stromausbeute von ca. 50 % aufgrund der Nebenreaktionen des entstehenden Zwischenprodukts  $\text{Nd}^{2+}$  und wurde inzwischen vollständig von der Elektrolyse in Fluorid-Oxid-Schmelzen abgelöst. Außerdem ist der Energieverbrauch zum Erreichen der hohen Prozesstemperatur enorm. Vorteile der Chloride für den Elektrolyten sind die gute Verfügbarkeit und niedrigen Preise der Alkalichloride.

Zur Verbesserung der Energieeffizienz kann die Elektrolyse dank der niedrigen Schmelztemperaturen der Chloridsalze auch bei deutlich niedrigeren Temperaturen durchgeführt werden. Dieses Verfahren wurde bisher jedoch nur im Labormaßstab mit extrem geringer Menge an Neodym-Produkt (wenige mg) erfolgreich getestet (Tang und Pesic, 2015). Dazu wurde das Eutektikum aus KCl und LiCl (45:55 Gew.-%) mit einem Schmelzpunkt von 352 °C verwendet (Plambeck, 1976). Bei niedrigen Temperaturen (450-600 °C) kann festes Neodym-Metall auf einer inerten Elektrode abgeschieden werden (Tang und Pesic, 2015; Yan et al., 2013). Durch Anpassung der elektrochemischen Parameter soll im Rahmen des Projekts eine Abscheidung größerer Mengen erreicht werden. Damit wird die energieeffiziente Produktion von Neodym aus  $\text{NdCl}_3$  für den Recyclingprozess ermöglicht.

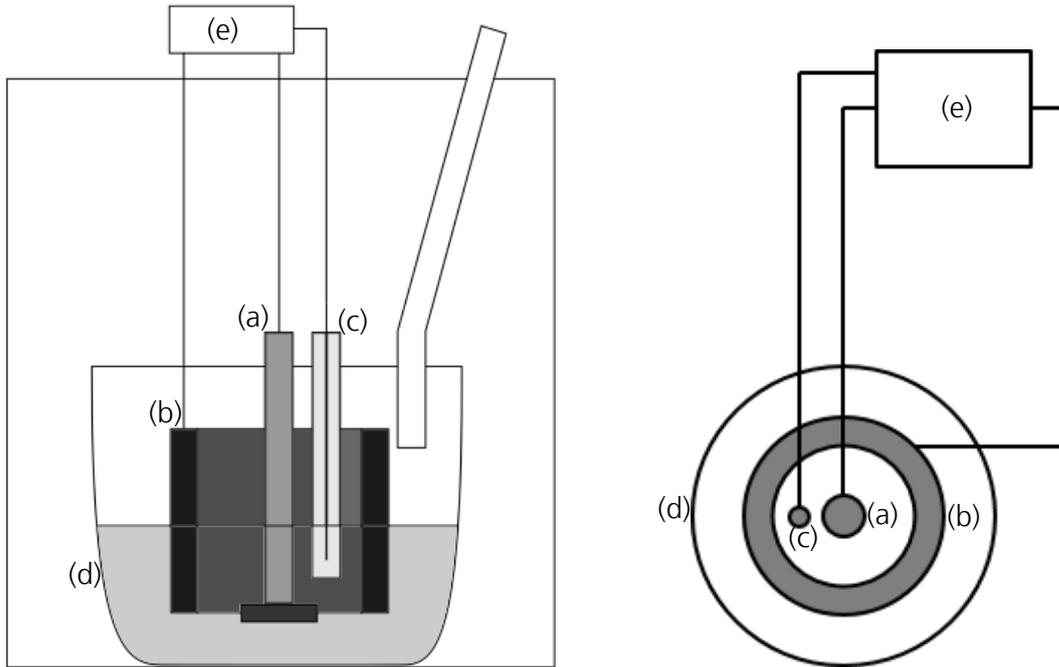
#### Aufbau Elektrolyseanlage

Zur Durchführung der Hochtemperaturelektrolyse von SE-Metallen in Salzschnmelzen wurde ein Spezialofen der Firma Nabertherm installiert. Der Ofenraum kann bei Temperaturen bis 1100 °C unter Inertgas (Stickstoff) bzw. im Vakuum betrieben werden. Eine spezielle Elektrodendurchführung ermöglicht das Bewegen der Elektroden in und aus der Schmelze bei laufendem Betrieb.

Die Stromversorgung für die Elektrolyse erfolgte mittels eines Gleichrichters mit Spannungen bis 70 V und Strömen bis 24 A. Für genauere elektrochemische Messungen wurde ein Potentiostat der Firma Biologic verwendet, der Spannungen zwischen -3 V und 14 V bei einem Strom bis 4 A liefern kann.

Als Zelle wurde ein offener Tiegel aus Aluminiumoxidkeramik verwendet, der gegen die Salzschnmelze inert ist. Ein geschlossener Tiegel zum Ausschließen von Verunreinigungen war aufgrund des beweglichen Elektrodenaufbaus nicht möglich. Zunächst dienten Molybdänbleche als Kathode und ein Graphitstab als Anode. Um einen homogeneren Stromfluss zu erzielen, wurde auf einen Rundaufbau umgestellt, bei dem ein Rundstab aus Eisen oder Wolfram zentral in einem Graphit-Ring verwendet wurde (siehe Abb. 54). Die Kontaktierung der Elektroden erfolgte jeweils über einen Titanstab.

Zur genauen Betrachtung einer einzelnen Elektrode, in diesem Fall der Kathode mit der Neodym-Reduktion, ist eine Referenzelektrode notwendig. In der Literatur wird häufig ein Silberdraht in einer Lösung von Silberchlorid im Elektrolyten genutzt. Aufgrund des komplexen Aufbaus wurde dies verworfen und stattdessen eine sogenannte Pseudo-Referenzelektrode verwendet, bei der ein Platindraht in die Schmelze taucht.

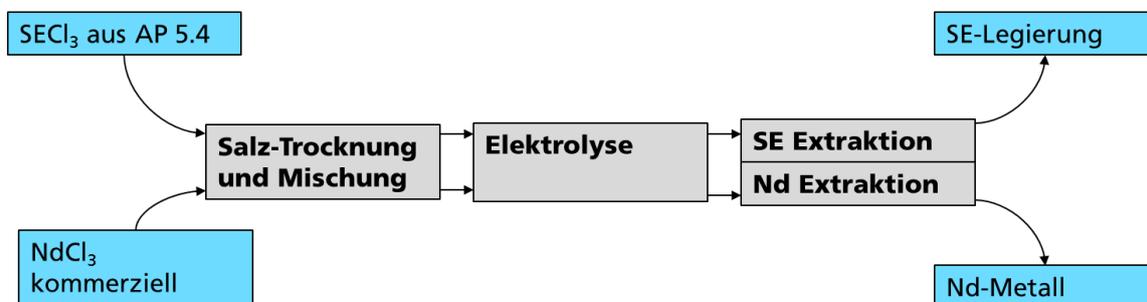


**Abb. 54: Zellaufbau und Elektrodenanordnung: (a) Wolfram-Kathode, (b) Graphit-Anode, (c) Platindraht Pseudo-Referenzelektrode, (d) Aluminiumoxid-Tiegel, (e) Potentiostat zur Stromversorgung.**

### Versuchsdurchführung

Ursprünglich sollte für die Elektrolyse das Gemisch aus Seltenerdchloriden ( $\text{SECl}_3$ ) aus dem Carbochlorierungsprozess der BASF in der Elektrolyse eingesetzt werden. Dieses enthält neben Neodym auch Praseodym und Dysprosium, soweit dies in den Magneten eingesetzt wurde. Aufgrund der Probleme mit dem Prozessdesign, die weiter unten genauer beschrieben werden, wurde daher für fast alle Experimente kommerzielles Neodymchlorid als Ausgangsstoff eingesetzt, um mögliche Probleme mit dem  $\text{SECl}_3$  ausschließen zu können.

Der erste Schritt in den Elektrolyseexperimenten war die Vorbereitung der Elektrolytsalze. Alle verwendeten Chloride ( $\text{KCl}$ ,  $\text{LiCl}$  und  $\text{NdCl}_3$ ) sind stark hygroskopisch und müssen vor Verwendung getrocknet werden. Für  $\text{KCl}$  und  $\text{LiCl}$  wurden die Salze dazu mindestens 12 Stunden in einem Trockenschrank bei mindestens  $150\text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet. Das  $\text{NdCl}_3$  wurde bevorzugt direkt aus der Originalverpackung entnommen, da dieses so die größte Reinheit zeigte.  $\text{NdCl}_3$ , das bereits Kristallwasser enthält, kann zu Neodymoxychlorid reagieren, das für die Elektrolyse unbrauchbar ist. Eine Trocknung wurde deshalb nur unter Vakuum oder Schutzgas ( $\text{N}_2$ ) durchgeführt.



**Abb. 55: Flussschema des Elektrolyseprozesses.**

KCl und LiCl wurden anschließend abgewogen und in den Tiegel gefüllt. Der Elektrolyt bestand aus 90 g KCl und 110 g LiCl, um das eutektische Gemisch zu erhalten (45:55 Gew.-%). 4 g  $\text{NdCl}_3$  wurde erst kurz vor der Schließung des Ofens zugegeben, um eine Verunreinigung mit Wasser zu vermeiden. Im Anschluss wurde das Gemisch nochmals für mindestens 12 h bei 200 °C unter Vakuum oder Stickstoff getrocknet.

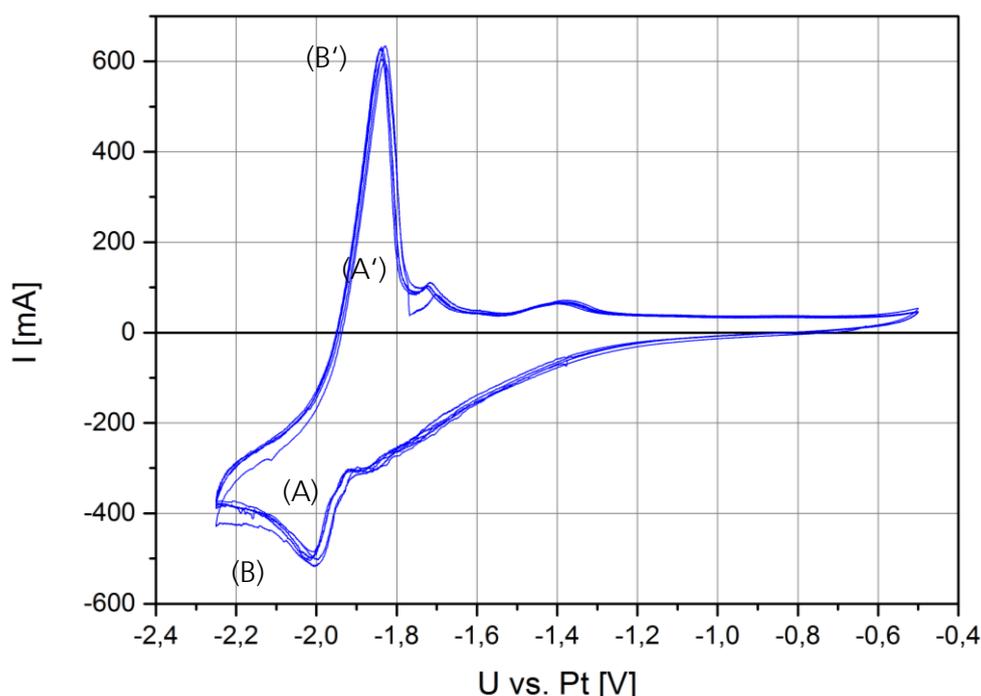
Zum Schmelzen des Elektrolyten wurde der Ofen auf 500 °C geheizt und dort mindestens 30 min belassen, um eine homogene Schmelze zu erhalten. Allerdings konnte häufig ein aufschwimmender Feststoff beobachtet werden, dessen Zusammensetzung nicht geklärt werden konnte. Die Elektroden wurden in die Schmelze abgesenkt, sodass sie ca. 1 cm eintauchten.

Die Durchführung der elektrochemischen Experimente wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Grundsätzlich wurde zunächst mittels zyklischer Voltammetrie das tatsächliche Reduktionspotential des Neodyms bestimmt und anschließend eine Elektrolyse unter konstanter Spannung oder konstantem Strom durchgeführt. Mit dem Ende der Elektrolyse wurden die Elektroden aus der Schmelze entfernt, um eine Reaktion des abgeschiedenen Neodym-Metalls mit dem Elektrolyten zu verhindern.

Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wurde der Ofen geöffnet, ein Kontakt der Reagenzien mit Luft konnte dabei nicht verhindert werden. Kathode und Elektrolyt wurden entfernt und unter Stickstoff zur Analyse aufbewahrt. Die zur Verfügung stehenden Analysemethoden waren Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (RFA), Röntgendiffraktometrie (XRD) und Rasterelektronenmikroskop (REM) mit Energiedispersiver Röntgenanalyse (REM-EDX).

## Ergebnisse

Die wichtigste elektrochemische Analysemethode ist die Zyklovoltammetrie. Dabei wird die Spannung ab einem Startpunkt zwischen zwei Endpunkten zyklisch verändert und der fließende Strom aufgezeichnet. Der Strom zeigt dabei elektrochemische Reaktionen auf der beobachteten Arbeitselektrode an (s. Abb. 56).



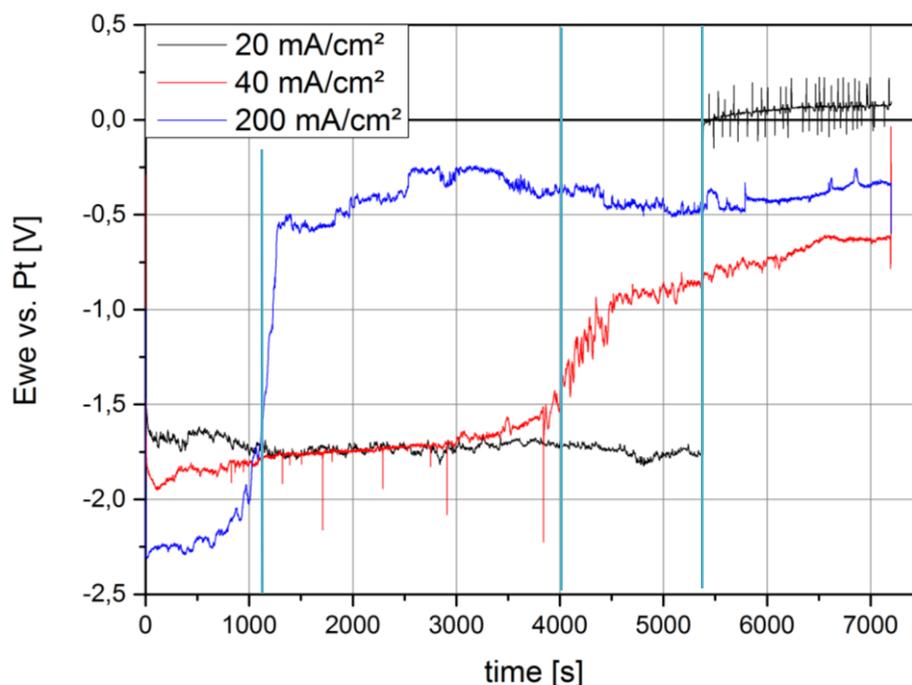
**Abb. 56:** Zyklovoltamogramm eines KCl-LiCl-NdCl<sub>3</sub>-Elektrolyten auf einer Wolfram-Elektrode bei 500 °C.

Die zyklische Voltammetrie zeigt zwei Peaks für die Reduktion des Neodyms, entsprechend den beiden Reaktionen:



Dieses Bild wird von der existierenden Literatur bestätigt, das Auftreten der Zwischenstufe  $\text{Nd}^{2+}$  ist wurde bereits beschrieben (Tang und Pesic 2015; Diaz et al. 2017; Zhu 2013). Interessant ist das Potential der Bildung von Neodym-Metall (-2,0 V) für die tatsächliche Elektrolyse, da dabei das Potential zwischen dem Neodym-Peak und der Reduktion Lithium eingestellt werden muss. Außerdem ist zu sehen, dass die Reaktion quasireversibel verläuft, da es deutliche Peaks für die Rückreaktion gibt.

Elektrolyseversuche wurden entweder bei konstantem Strom oder konstanter Spannung durchgeführt. Konstanter Strom sorgt für eine konstante Zahl übertragener Elektronen, wodurch theoretisch und bei ausreichender Menge an  $\text{Nd}^{3+}$  auch der Umsatz des Neodyms konstant ist. Die notwendige Spannung wird vom Potentiostaten automatisch angepasst. Wird die Spannung konstant gehalten, ist die Triebkraft der Reaktion konstant. Die Reaktionsrate kann sich jedoch verändern, zum Beispiel durch Verringerung des verfügbaren  $\text{Nd}^{3+}$  im Laufe der Elektrolyse (Diffusionskontrolle). Dies ist sichtbar im resultierenden Strom.



**Abb. 57: Elektrolyse bei konstantem Strom führt zu einem Kurzschluss (türkise Linie) zwischen Kathode und Referenzelektrode nach konstanter abgeschiedener Menge an Neodym.**

Die wichtigsten Beobachtungen bei der Elektrolyse sind der sehr unstete Verlauf und das Auftreten eines Kurzschlusses. Die Schwankungen von bis zu 100 mA lassen sich durch die Konkurrenz der beiden möglichen Reaktionen der Zwischenstufe  $\text{Nd}^{2+}$  erklären. Neben der Elektroreduktion auf der Kathode ist auch eine Disproportionierung möglich:



Bei vorwiegender Elektroreduktion wird immer ein Stromfluss beobachtet, da die erforderlichen Elektronen über die Kathode fließen. Da die Disproportionierung keinerlei externe Elektronen benötigt kann diese auch stattfinden, wenn kein Stromfluss in der Zelle herrscht. Allerdings muss dazu  $\text{Nd}^{2+}$  zur Verfügung gestellt werden, sodass auch die Disproportionierung nicht gänzlich stromunabhängig ist.

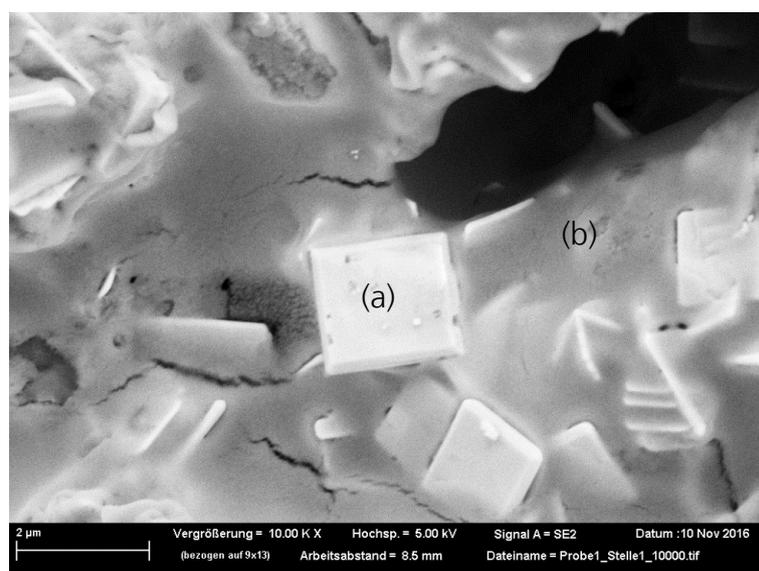
Der Kurzschluss bei der Elektrolyse tritt bei allen betrachteten Stromstärken auf, jedoch nach unterschiedlicher Elektrolysedauer. Die übertragene Ladung und damit die Menge an Neodym hingegen war in allen Experimenten in etwa konstant und entspricht einer theoretischen Ausbeute von ca.  $70 \text{ mg/cm}^2$ . Die Erklärung ist die Veränderung der Abscheidung von der Elektroreduktion zur Disproportionierung nach den oben genannten Gleichungen. Die Disproportionierung bildet das Neodym nicht als Schicht auf der Elektrode, sondern im Elektrolyten, was eine leitende Verbindung zwischen Kathode und Referenz und damit einen Kurzschluss hervorruft.

Auf der Kathode wurden nach Abschluss des Elektrolyseexperiments unterschiedliche Mengen an grau- bis anthrazitfarbenem Belag gefunden. Ein ähnliches Produkt befand sich auch im Elektrolyten am Tiegelboden unterhalb der Kathode. Die RFA-Analyse zeigte ca. 20 Gew.-% Neodym in diesem Produkt, der Rest waren Elemente der Elektrolytbestandteile K und Cl (Li ist nicht messbar). Dies ist eine eindeutige Anreicherung von Neodym gegenüber der ursprünglichen Elektrolytzusammensetzung (2 Gew.-% Nd).

Die Analyse des grauen Rückstands mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigt feine Neodym-Kristalle (ca.  $1 \mu\text{m}$ , Abb. 58 (a)), die in einer amorphen Matrix aus erstarrtem KCl-LiCl-Elektrolyt eingeschlossen sind (Abb. 58 (b)). Die ausbleibende Aufladung der Kristalle bestätigt den metallischen Charakter. Die Analyse mit REM-EDX zeigt für die Kristalle knapp 50 % Neodym mit Verunreinigungen, die Matrix hat einen deutlich geringeren Anteil an Neodym und höheren Anteil an K und Cl. Außerdem enthält das Produkt Verunreinigungen von Sauerstoff (aus der Luft), Kohlenstoff (Anodenmaterial) und Aluminium (Tiegelmaterial), siehe dazu auch Tab. 7.

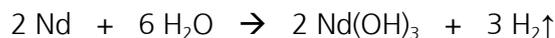
**Tab. 7: Ergebnisse der REM-EDX Analyse: Neodymkristall (a) und Matrix (b) aus Abb. 57.**

Gew.-%	Nd	K	Cl	O	C	Al
Nd-Kristall	48,1	2,0	24,2	11,5	4,4	1,6
KCl-LiCl-Matrix	8,4	4,4	35,2	18,1	8,1	8,7



**Abb. 58: REM-Bild des Elektrolyseprodukts zeigt metallische Neodym-Kristalle (a) in einer Matrix aus KCl-LiCl-Elektrolyt (b).**

In den ersten Versuchen wurde dieses Produkt mit Wasser von Elektrolytrückständen gereinigt. Bei Kontakt mit Wasser zeigte sich eine Gasbildung, die typisch ist für die Reaktion eines extrem unedlen Metalls wie Neodym mit Wasser zum Hydroxid unter Wasserstoffentwicklung:



Dadurch wurde graues Pulver erhalten, das ca. 80 % Neodym und geringe Mengen Chlor enthielt.

Weitere Reinigungsmittel wurden getestet, um das KCl und LiCl zu entfernen, ohne eine Reaktion des Neodyms zu verursachen. Dazu muss das Lösungsmittel einerseits polar sein, darf jedoch keine reaktiven Protonen enthalten, wie es bei verschiedenen organischen Lösungsmitteln der Fall ist. Bis auf Ethylenglykol konnte keines der organischen Lösungsmittel das LCl und LiCl effektiv lösen (siehe Tab. 8). Allerdings ist kein Lösungsmittel geeignet, um vollständig reines Neodym zu extrahieren. XRD-Analysen des Endprodukts zeigen, dass nach der Reinigung in allem Experimenten Neodymoxychlorid statt metallischem Neodym als Hauptprodukt vorliegt.

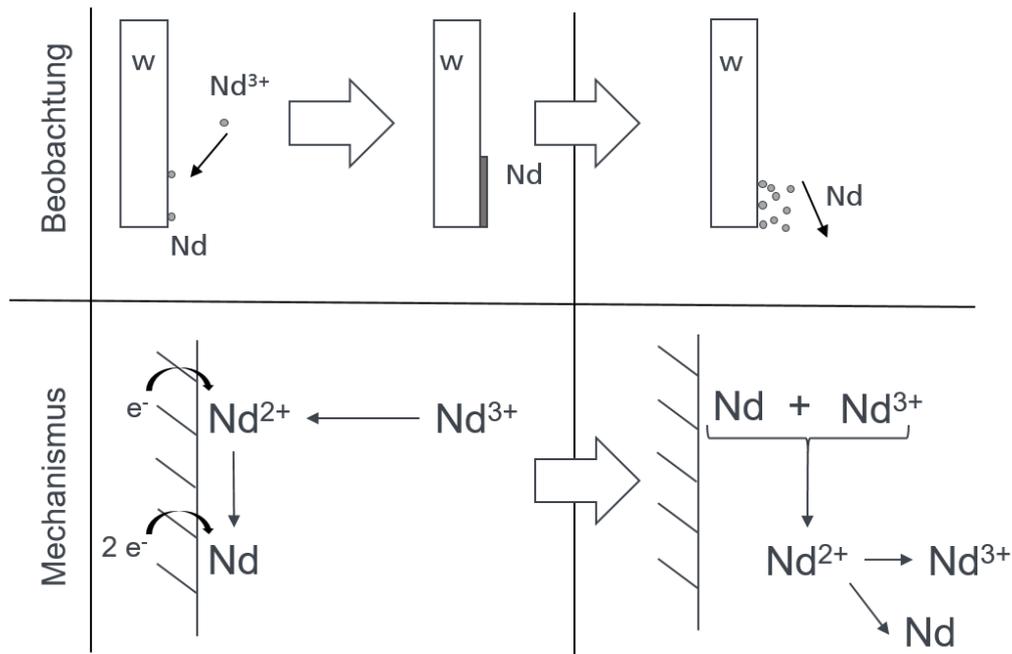
**Tab. 8: Zusammensetzung des Produkts direkt aus der Elektrolyse und nach verschiedenen Reinigungsverfahren, gemessen mit Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie, die letzte Spalte zeigt den Gewichtsverlust der Probe durch die Reinigung.**

Lösungsmittel	Nd (Gew.-%)	K (Gew.-%)	Cl (Gew.-%)	Gewichtsverlust
Ohne	47	19	34	0 %
Wasser	89	0,8	10	57 %
Ethanol	70	12	19	32 %
Ethylenglykol	85	3,3	11	66 %
Tetrahydrofuran	58	15	27	18 %
Dimethylformamid	57	18	25	33 %
Propylcarbonat	59	19	23	5 %

Die Erklärung der gezeigten Ergebnisse erfolgt mit dem Abscheidungsmechanismus. Zu Beginn der Elektrolyse erfolgt die Abscheidung in zwei Stufen wie in den Reaktionsgleichungen (A) und (B) gezeigt, es scheidet sich festes Neodym-Metall auf der Kathode ab. Durch das verfügbare Neodym-Metall wird wiederum  $\text{Nd}^{2+}$  stabilisiert, da sich das Gleichgewicht in der Reaktionsgleichung



auf die Seite des  $\text{Nd}^{2+}$  verschiebt. Im Anschluss dominiert die Disproportionierung von  $\text{Nd}^{2+}$  bei der Herstellung von Neodym, das dadurch jedoch nicht auf der Elektrode, sondern im Innern des Elektrolyten entsteht. Dies führt zu den beobachteten feinen Neodymkristallen. Diese sind jedoch sehr stark mit Elektrolytsalz verunreinigt und können nicht problemlos zu reinem Neodym extrahiert werden. Der Umgang mit dem Produkt wird weiterhin durch die hohe Reaktivität von Neodym erschwert, das sehr schnell zu Neodymoxychlorid und anderen Verbindungen oxidiert.



**Abb. 59: Abscheidungsmechanismus und dessen Veränderung im Verlauf der Elektrolyse. Zu Beginn entsteht Neodym-Metall auf der Kathode mittels Elektroreduktion, später dominiert die Disproportionierung von  $\text{Nd}^{2+}$**

#### Fazit

Meilenstein 5.1 konnte im Projekt erfüllt werden, da die Elektrolyse des Neodyms und einer  $\text{SECl}_3$ -Mischung aus Magnetmaterial erfolgreich durchgeführt wurde. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Extraktion und der damit misslungenen Herstellung von nutzbarem Seltenerdmetall wurde Deliverable 5.1.1 nicht erfolgreich abgeschlossen. Aus selbigem Grund kann auch keine Bewertung von Effizienz und Selektivität des Prozesses durchgeführt werden, wodurch Deliverable 5.1.2 entfiel.

Die Extraktion von nutzbarem, reinem Neodym-Metall aus der Elektrolyse von Neodymchlorid in  $\text{KCl-LiCl}$ -Schmelze bei  $500\text{ °C}$  war im Rahmen des Projekts leider nicht erfolgreich. Derzeit müsste das in Arbeitspaket 5.4 hergestellte  $\text{SECl}_3$  in Oxid umgewandelt werden, um dies dann nach dem Stand der Technik in China zu Metall umzuwandeln. Die Beeinflussung des Abscheidungsmechanismus durch entstehendes  $\text{Nd}^{2+}$  und die hohe Reaktivität von Neodym-Metall verhindern die effektive Nutzbarkeit des Verfahrens. Mögliche Ansätze, um das getestete Verfahren doch noch anzuwenden, sind die Destabilisierung von  $\text{Nd}^{2+}$  durch Zusätze wie Fluorid oder Oxid in der Schmelze oder eine Extraktion des entstehenden Neodyms mittels Umschmelzen. Die Arbeiten dazu konnten im Projektzeitraum jedoch nicht abgeschlossen werden.

### 2.1.5.2. AP5.2: Chemische Behandlung mit flüssigem Mg

(Bearbeitung CEA)

Alle Arbeiten wurden am Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) durchgeführt. Ziel war es, mittels geschmolzenen Magnesiums Seltene Erden wie Neodym aus den Magneten selektiv zu extrahieren. Eisen, welches der Hauptbestandteil der Magnete darstellt, besitzt nur eine geringe chemische Affinität zu Mg und wird deshalb nicht herausgelöst.

Die Versuche wurden in mit keramischem Kleber versiegelten Aluminiumoxid-Schmelztiegel durchgeführt. Mit Hilfe des flüssigen Magnesiums konnte Neodym selektiv aus Magneten herausgelöst werden. Dabei zeigte sich, dass sich die Herauslösung direkt proportional zu der angelegten Temperatur verhielt. Bei einer Behandlung eines Magneten mit 680 °C für 2 h wurden nur geringe Teile der Magneten mit Mg benetzt und dadurch nur oberflächliche Reaktionen beobachtet. Mit zunehmender Temperatur und Haltezeit wurde die Benetzung intensiviert und auch Reaktionen in tieferen Regionen verzeichnet. Bei einer Temperatur von 850 °C konnte durch geringkonzentrierte Mg-Schlacke (12 at.%) Nd aus Tiefen von 2-3 mm abgetragen werden. Dies konnte ebenfalls für pulverförmige und leicht oxidierte Magnetmaterialien beobachtet werden. Größere Oxidschichten auf den magnetischen Materialien führten zu einer geringeren Benetzung mit Mg und dementsprechend geringeren Reaktionstiefen.

### 2.1.5.3. AP5.3: Hydrometallurgische Behandlung

(Bearbeitung Fh IWKS, CEA)

In diesem Arbeitspaket wurde die rohstoffliche Rückgewinnung der Seltenen Erden mittels nass-chemischer und biologischer Methoden untersucht. Dabei dienten überwiegend Magnetpulver als Ausgangsmaterial, welche mittels eines HD-Prozesses hergestellt wurden. Im ersten Teilaufgabengebiet wurde die chemische Auflösung durch konventionelle Säuren und anschließender Abtrennung der Zielmetalle mittels Fällungsreaktionen untersucht. Im zweiten Aufgabengebiet wurde die Auflösung des Magnetpulvers unter Einsatz verschiedener Mikroorganismen analysiert. Auch hier wurde eine nachfolgende Elementseparation mittels chemischer Methoden wie Fällung und Extraktion untersucht.

#### Chemische Behandlung

(Bearbeitung CEA)

Diese Arbeiten wurden von den französischen Partnern am CEA durchgeführt. Zunächst wurde die Entfernung der Beschichtung mittels eines HD-Prozesses untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine Ni/Cu-Beschichtung effizient mittels dieser Methode vom Magneten getrennt werden konnte (Abb. 60), allerdings wurden auch signifikante Verluste des Magnetmaterials festgestellt. Bei einer Al-Beschichtung konnte nach dem HD-Prozess keine Separation der Beschichtung vom Nd-Fe-B-Material verzeichnet werden.



**Abb. 60: Magnete mit einer Ni/Cu-Beschichtung vor (links) und nach dem HD-Prozess (rechts), Bild CEA.**

Die Auflösungsversuche wurden in Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) und Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) durchgeführt. Bereits bei den ersten Versuchen zeigte sich, dass ein Oxidationsmittel (Wasserstoffperoxid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) notwendig ist, um den Auflösungsprozess einzuleiten. Allgemein wurde festgestellt, dass bei gleichbleibender Temperatur (Raumtemperatur) und Zeit (14 h) mit zunehmender Säurekonzentration eine Steigerung der Auflöseffizienz auftritt. Ein niedriger pH-Wert wirkte sich demnach als effizienzsteigernd aus. Eine Selektivität wurde jedoch nur bei HNO<sub>3</sub> und HCl+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> beobachtet. Bei der Behandlung mittels HNO<sub>3</sub> wurde im Verhältnis mehr Eisen aufgelöst als Neodym, bei der Behandlung mit HCl und H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konnte das entgegengesetzte Verhalten beobachtet werden. Allerdings verhielt sich diese Selektivität nicht stöchiometrisch.

Die Abtrennung der Seltenen Erden konnte mittels verschiedener Fällungstechniken erzielt werden. Mit Hilfe der Natriumhydroxid (NaOH)-Fällung konnte eine selektive Fällung der SE-Elemente ab einem pH-Wert von ca. 10 mit einer Reinheit von ca. 97 % erzielt werden. Dabei wurden ein geringer Verlust von nur 0,4 % Gew.-Nd verzeichnet. Bei niedrigeren pH-Werten wurde Fe selektiv ausgefällt, allerdings wurde hier ein Verlust von 13 % Gew.-Nd ermittelt.

Bei der Fällung mittels Sulfat aus einer salpetersäurehaltigen Lösung wurde eine selektive Ausfällung von Nd beobachtet. Dabei bildete sich ein Komplex NaNd(SO<sub>4</sub>)\*H<sub>2</sub>O, der sich durch Zugabe von Basen wieder in ein Hydroxid umwandelt. Bei dieser Methode wurden jedoch hohe Kontaminationen durch das zugegebene Natrium festgestellt.

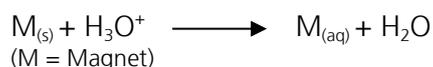
Die Fällung mittels Oxalsäure resultierte in eine hohe Rückgewinnungsrate der Seltenen Erden, allerdings wurden signifikante Eisenkontaminationen beobachtet, die vermutlich aufgrund des weniger löslichen Eisen(II) zustande kamen. Aufgrund der Informationen von etablierten Recyclingfirmen stellen Eisen und Natriumkontaminationen jedoch kein Problem für die weitere Verarbeitbarkeit des Produkts dar. Eine Aufskalierung des entwickelten Prozesses konnte ohne Effizienzverlust in einem 5 l Reaktor durchgeführt werden.

### Biologische Behandlung

(Bearbeitung Fh IWKS )

In diesem Arbeitspaket wurde das Recycling von Magneten mittels einer schonenden Auflösung durch Bioleaching und anschließender Elementseparation durch diverse biologische und chemische Extraktionstechniken untersucht. Beim Bioleaching zerstören die eingesetzten Mikroorganismen die Magnetmatrix und die darin enthaltenen Seltenen Erden werden in wasserlösliche Verbindungen überführt. Dies wird je nach eingesetztem Organismus durch unterschiedliche Stoffwechselwege realisiert. Bei der direkten Methode werden die Zielelemente durch Reaktion mit Stoffwechselprodukten (z.B. Säureproduktion) und/oder Intermediaten aus der Matrix herausgelöst. Bei der indirekten Methode wird die Matrix zusätzlich über einen chemischen Redoxprozess mit Fe<sup>3+</sup> zerstört, wobei die Mikroorganismen für die Oxidation von Fe<sup>2+</sup> zu Fe<sup>3+</sup> verantwortlich sind und es dadurch zu einer Kreislaufreaktion kommt. Es wurden verschiedene Bakterien und Pilze, deren Metabolismus sowohl auf der direkten als auch auf der indirekten Methode beruht, ausgewählt und getestet.

Durch Zugabe des Magnetmaterials wurde aufgrund von Reaktionen des Probenmaterials mit dem Säurebestandteil im Medium (pH-Wert ca. 2,0) bereits innerhalb der ersten Stunden ein drastischer Anstieg des pH-Wertes gemäß folgender Reaktionsgleichung verzeichnet:



Aufgrund der geringen pH-Toleranz einiger acidophiler Mikroorganismen war es für die Bioleachingversuche notwendig ein Medium mit einer hohen Pufferkapazität zu finden, um ein Wachstum der Kultur zu gewährleisten.

Die Vorversuche wurden in Batch-Ansätzen durchgeführt. Nach Detektion des ersten Wachstums im Flüssigmedium wurden 10 g/l Magnetpulver je Ansatz eingesetzt und der Bioleachingverlauf über mindestens vierzehn Tage beobachtet. Der Verlauf wurde makroskopisch, mikroskopisch und mittels Bestimmung des pH-Wertes verfolgt. Bei der makroskopischen Betrachtung wurde oftmals eine Verfärbung des Mediums zu orange-braun (Eisenoxidpräzipitation) festgestellt, wobei die Ansätze mit den Mikroorganismen meist dunkler gefärbt waren als die abiotischen Kontrollen (gleiches Medium, gleiche Zusätze, keine Mikroorganismen).

Der pH-Wert ist ein weiteres wichtiges Indiz für das Wachstum der Mikroorganismenpopulation. Durch das Wachstum der Mikroorganismen kommt es zu einer Bildung von Protonen (Metabolismus), wodurch der durch die Magnetpartikel verursachte Anstieg des pH-Wertes kompensiert werden konnte. Der pH-Wert der abiotischen Kontrolle stieg jedoch an und musste nach jeder Probenahme dem pH-Wert der Bioleaching-Ansätze mittels äquivalent zugesetzter Säure angeglichen werden, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Der Auflösungserfolg wurde quantitativ mittels Messung der Metallionenkonzentration durch ICP-OES Analyse des Überstandes verfolgt. Dazu wurden in regelmäßigen Abständen Proben entnommen und bis zur Analyse eingefroren.

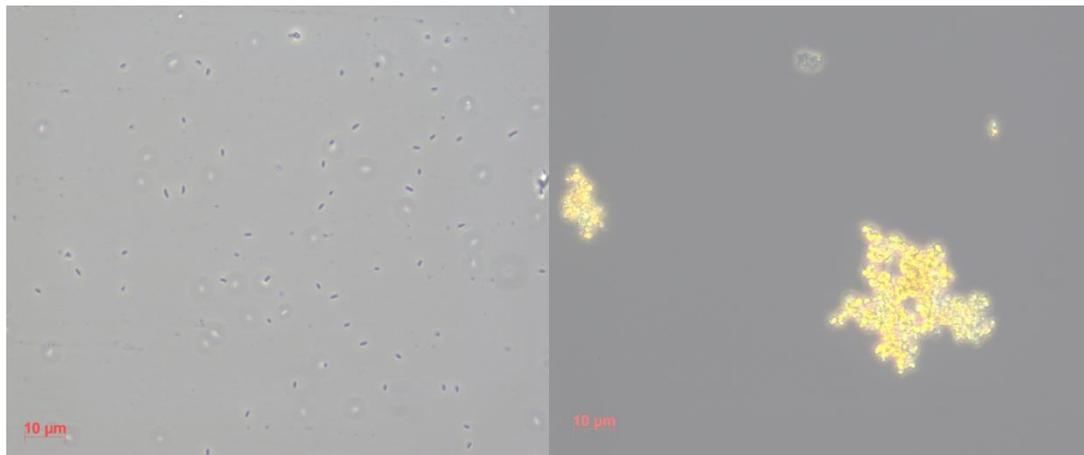
**Tab. 9: Leachingeffizienzen eines Bioleaching-Prozesses von Magnetpulver mit einer Auswahl verschiedener Reinkulturen und abiotischen Kontrolle.**

Leachingeffizienz in %	Al	B	Dy	Nd	Pr
Bakterium A	32	95	57	62	71
Bakterium B	63	74	84	78	95
Bakterium C	68	98	94	88	90
abiotische Kontrolle	28	59	62	64	76

Die ermittelten Elementkonzentrationen der Überstände wurden mit den Konzentrationen der eingesetzten Originalprobe verglichen und die Leachingeffizienz (%) berechnet. Tabelle 9 zeigt die quantitativ ermittelten Leachingeffizienzen einiger Bakterien. Höchste Effizienzen wurden dabei mit Bakterien B und C ermittelt, welche einen indirekten Mechanismus als Grundlage hatten. Hier konnten hohe Recyclingraten für die Seltenen Erden von bis zu 88 % für Nd und 95 % für Pr und Dy erzielt werden. Da andere Matrixelemente ebenfalls in einem hohen Maß wiedergefunden wurden, konnte in diesem Fall jedoch keine Selektivität bezüglich der Extraktion von SE-Elemente beobachtet werden.

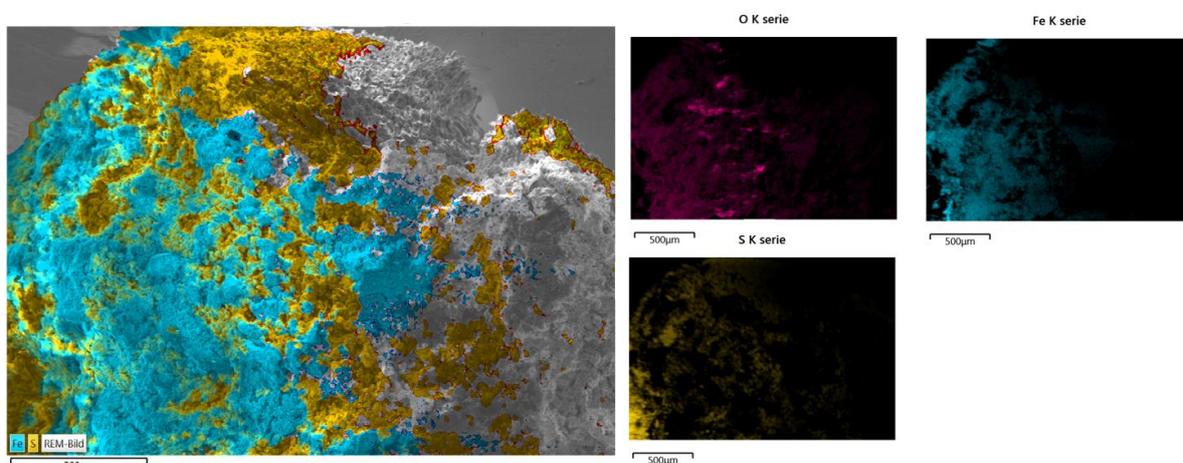
Die Konzentration an Eisen konnte nicht bestimmt werden, da es während des Versuches zu einer Eisenpräzipitation kam. Eine nachgeschaltete Elementseparation war damit notwendig. Bakterium A weist einen direkten Mechanismus auf und zeigte geringe Auflösungsraten. Hierbei wurden nur 57 % Dy, 62 % Nd und 71 % Pr der Originalprobe durch die Bakterien in Lösung gebracht. Ein Grund für die deutlichen Unterschiede könnte in den unterschiedlichen pH-Wert-Toleranzbereichen der Kulturen liegen. Bakterium A reagierte sehr empfindlich auf eine Erhöhung des pH-Wertes. Dies konnte auch durch das Fehlen von Bakterien im mikroskopischen Bild beobachtet werden (vgl. gut wachsendes Bakterium B (links) und Bakterium A (rechts) in Abb. 61). Ein weiterer möglicher Grund könnte die Passivierung des zugesetzten, für den Metabolismus notwendigen Schwefel oder des Probenmaterials sein.

Das Bioleaching war mit diesen Bakterien in den meisten Fällen effizienter als eine rein chemische Umsetzung des Probenmaterials mittels des Mediums allein (Tab. 9). Die chemischen Leachingeffizienzen, die durch CEA ermittelt wurden, liegen im selben Größenordnungsbereich wie das Bioleaching. Da das Bioleaching ohne den Verbrauch von starken Säuren auskommt und dabei auch keine hoch belasteten Abwässer entstehen, stellt sich dieses vorteilhaft gegenüber der rein chemischen Umsetzung dar.



**Abb. 61: Mikroskopische Aufnahme (100-fach im Phasenkontrast) der Batch-Ansätze mit Magnetpulver mit Bakterium B (links) und Bakterium A (rechts) nach 14 Tagen.**

Aus der Literatur ist bekannt, dass ein Gemisch aus bioleachingfähigen Bakterien oftmals eine Steigerung der Leachingeffizienz gegenüber Reinkulturen bewirkt (z.B. (Kaksonen, 2011), (Lewis, 2011), (Lee, 2012)). Aus diesem Grund wurde ein Gemisch aus Bakterium A und B sowie A, B und C hinsichtlich ihrer Leachingeffizienz mit Einsatz von Magnetpulver untersucht. Dabei kam es durch das eingesetzte Magnetpulver zu keinerlei Beeinträchtigung des Wachstumes und auch kein Konkurrenzeffekt der einzelnen Bakterienpopulationen untereinander war ersichtlich. Der pH-Wert (nicht abgebildet) war nahezu konstant niedrig. Allerdings wurde in den meisten Fällen eine Verschlechterung der Leachingeffizienz beobachtet (Daten nicht abgebildet). Nur das Element Cu zeigte ein erhöhtes Leaching gegenüber den Reinkulturen. Gründe für den verzeichneten Rückgang der Effizienz könnten in der Zusammensetzung des Probenmaterials zu finden sein. Einige Bakterien benötigen für ihr Wachstum Sulfide oder Schwefelverbindungen, die allerdings nicht im Probenmaterial enthalten waren. Dadurch könnte die Unterstützung des Bioleaching gehemmt werden, da die freie Oberfläche des Probenmaterials durch Sulfid-Bakterien besetzt werden könnte und somit weniger Bakterien der anderen Gattungen das Material bearbeiten konnten. Zudem könnte sich die Passivierung des eingesetzten Feststoffes, der für das Wachstum einiger Bakterien notwendig war, negativ auf das Leachingverhalten auswirken. In einigen Fällen konnte die Passivierung durch einen Überzug einer Oxidkruste aus Eisenhydroxid (Braunfärbung) direkt makroskopisch und mikroskopisch (REM) beobachtet werden. Abbildung 62 verdeutlicht diese Annahme.



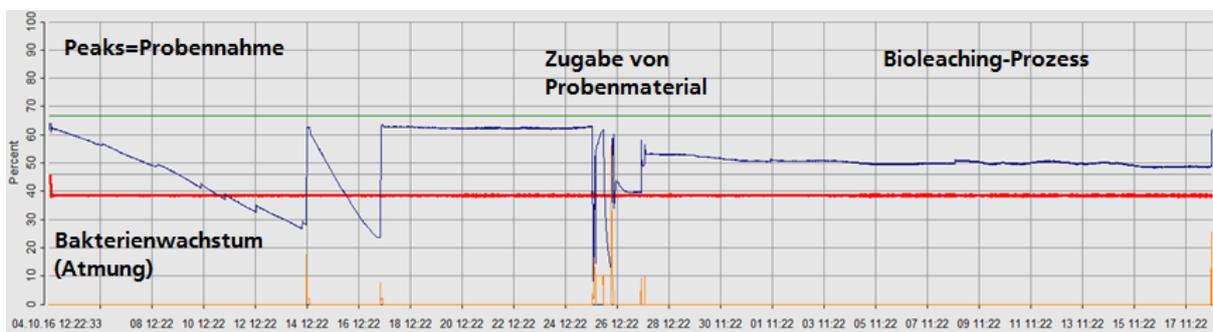
**Abb. 62: REM mit EDX Aufnahmen eines mit Eisen umlagerten Schwefelpartikels.**

Um den Effekt der Partikelgröße zu untersuchen, wurden neben Pulver auch Plättchen und ganze Magnetblöcke eingesetzt. Bezug nehmend auf die quantitative Analyse wurden bei den Plättchen ähnlich hohe Leachingeffizienzen erzielt. Bei den Magnetblöcken hingegen war ein deutlicher Effizienzverlust zu verzeichnen (Tab. 10). Ein Grund hierfür ist sicherlich die kleinere Reaktionsoberfläche für die Bakterien, aufgrund des schlechteren Volumen/Oberflächen-Verhältnisses der Blöcke gegenüber den Pulvern. Eine Störung des Wachstums und morphologische Veränderungen der Bakterien wurden nicht beobachtet, sodass toxische Effekte ausgeschlossen werden konnten.

**Tab. 10: Leachingeffizienzen eines Bioleaching-Prozesses von Magnetmaterial in verschiedenen Form mit einer Reinkultur.**

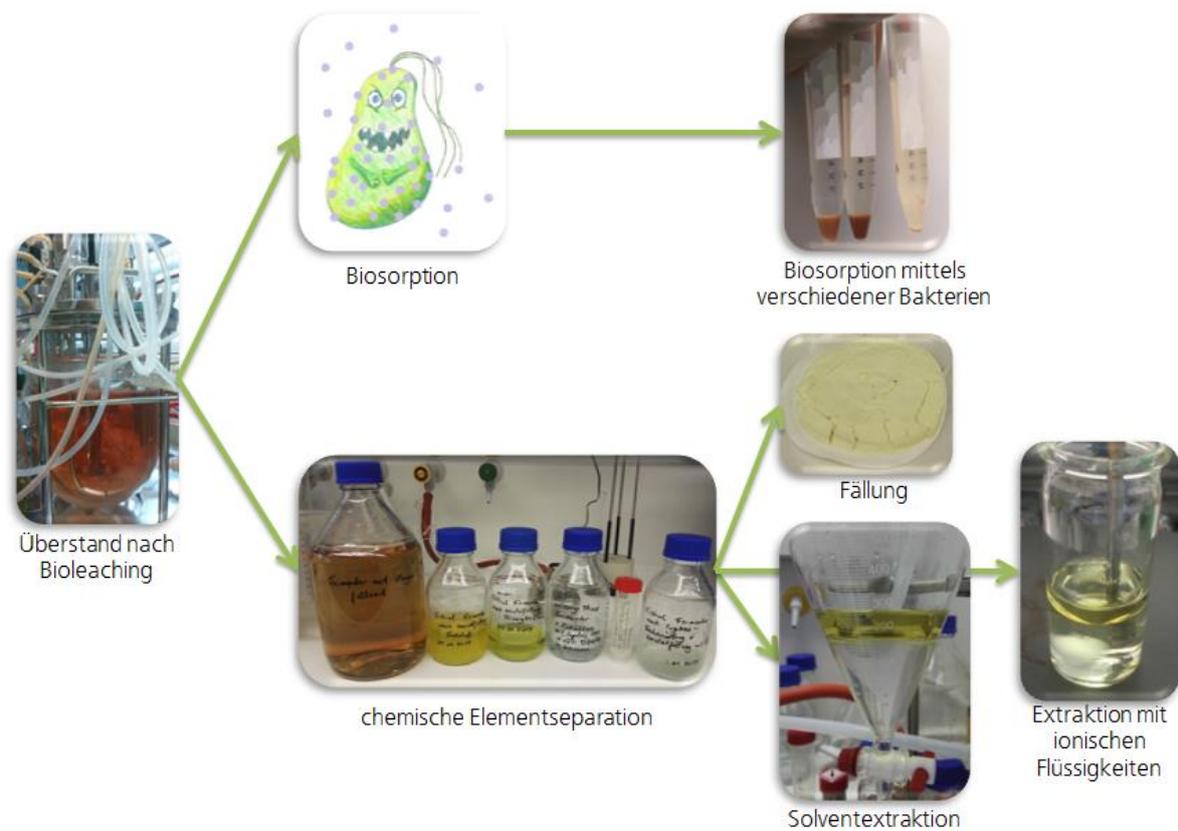
Leachingeffizienz in %	Al	B	Dy	Nd	Pr
Pulver	65	76	86	80	98
Plättchen	82	100	44	90	87
Block	2	19	9	9	9

Nach Optimierung der Parameter erfolgte eine Aufskalierung des Prozesses in einen 3,5 l Maßstab in einem Bioreaktor. Dabei erfolgte die Temperierung, die pH-Wert Angleichung an die optimalen Wachstumsbedingungen und die Sauerstoffzufuhr automatisch durch die Reaktorsteuerung. Zu Beginn sieht man deutlich die stetige Abnahme der Sauerstoffkonzentration, was die zunehmende Atmung der Bakterien und die damit verbundene Vermehrung kennzeichnet (Abb. 63). Nach Übergang der Bakterienkultur in die stationäre Phase (Vermehrungsrate = Sterberate) wurde das Probenmaterial eingesetzt. Direkt nach der Zugabe konnte ein deutlicher Rückgang der Sauerstoffkonzentration und ein Anstieg des pH-Wertes (nicht korrekt aufgezeichnet) bis auf 5,0 verzeichnet werden. Grund hierfür ist die rasche chemische Oxidation des Probenmaterials in der sauren Lösung, wobei Wasserstoff entsteht und somit der pH-Wert ansteigt. Während des Bioleaching-Prozesses wurden keine gravierenden Parameteränderungen verzeichnet, da aufgrund des starken pH-Anstieges das Wachstum der Bakterien bereits stark beeinträchtigt wurde. Mittels der Behandlung des Magnetpulvers in einem Bioreaktor konnten keine Effizienzverluste beobachtet werden. Eine Aufskalierung des entwickelten Prozesses war damit verlustfrei möglich. Es wurden 99 % Dy, 91 % Nd und 75 % Pr durch die eingesetzte Reinkultur in Lösung gebracht.



**Abb. 63: Parameterverlauf der Kultivierung und des Bioleachingprozesses. Dargestellt sind die Parameter Temperatur (rot) und Sauerstoffkonzentration (blau). (pH- Wert (grün) wurde nicht korrekt aufgezeichnet).**

Mittels der Bioleachingversuche konnten große Anteile des Magnetmaterials gelöst werden. Aufgrund der hohen Eisenfracht und Matrixelementfracht in der flüssigen Phase musste jedoch eine zusätzliche Abtrennung nachgeschaltet werden. Dabei wurden neben chemischen auch biologische Verfahren untersucht (s. Abb. 64).



**Abb. 64: Entwicklung eines möglichen nachgeschalteten Aufbereitungsprozess von Bioleachingslösungen von Magnetmaterial.**

Es wurden verschiedene Versuche mittels Biosorption an diesem Mehrkomponentensystem durchgeführt. Allerdings konnte keine selektive Abtrennung von den Seltenen Erden erzielt werden. Auch in der Literatur beziehen sich die meisten Untersuchungen auf Einkomponenten- oder Wenig-Komponentensysteme, für Mehrkomponentensysteme sind bisher nur wenige erfolgreiche Untersuchungen bekannt (Fomina, 2014).

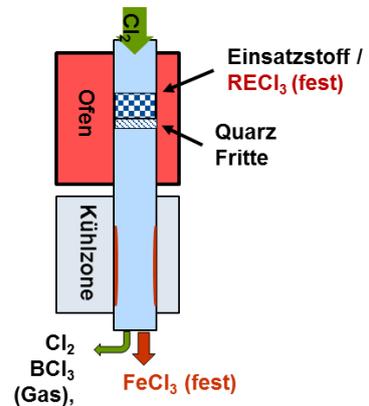
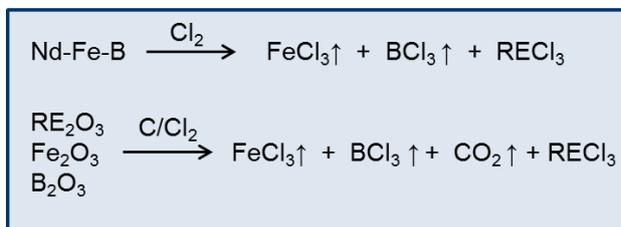
Mittels einer chemischen Separation konnten die Seltenen Erden erfolgreich von den weiteren Matrixelementen getrennt werden. Als effizient erwies sich dabei die Fällung mit einer konzentrierten Oxalsäurelösung. Durch diese Methode konnte ein SE-Gemisch (als Oxalat) mit einer Reinheit von 95 % (enthält noch ca. 4,5 % Eisen) gewonnen werden.

Als weitere effiziente Variante wurde eine Kombination aus Solventextraktionen und Fällungen identifiziert. Eine zwei-stufigen Solventextraktion mit einer ionischen Flüssigkeit führte zu einer erfolgreichen Separation von Eisen im ersten Schritt, sowie Al, B und Co im zweiten Schritt. Die separierten SE wurden anschließend mittels einer Oxalsäure-Fällung in einen filtrierbaren Feststoff umgewandelt. Dadurch konnte ein SE-Gemisch (als Oxalat) mit einer Reinheit von 97,95 % (enthält noch ca. 1,3 % Aluminium und 0,3 % Eisen) gewonnen werden.

## 2.1.5.4. AP5.4: Carbochlorierung

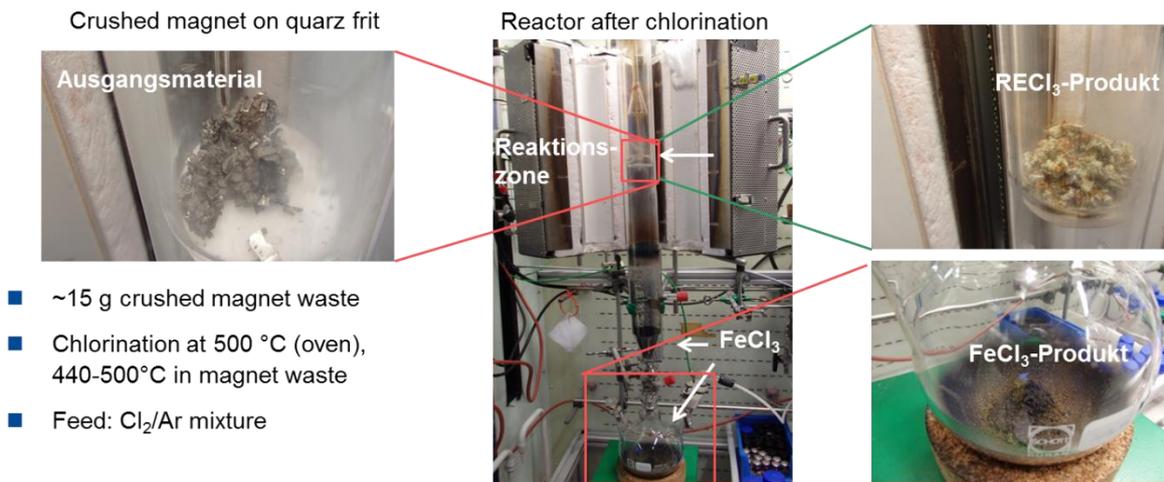
(Bearbeitung BASF)

In diesem Arbeitspaket wurde das Recycling von Seltenen Erden (engl. rare earths (RE)) aus Nd-Fe-B-Magnetlegierungen oder oxidierten Nd-Fe-B-Produktionsabfällen durch Chlorierung oder Carbochlorierung bearbeitet. Die Reaktionen werden bei 500 – 1000 °C durchgeführt. Die Seltenen Erden, Eisen und Bor werden dabei in ihre Chloride überführt. Da  $\text{BCl}_3$  und  $\text{FeCl}_3$  bei diesen Temperaturen flüchtig sind, können sie sehr leicht von den SE-Chloriden abgetrennt werden (Abb. 65 links). Die gebildeten Seltenerdchloride können unter anderem als Einsatzstoff in der Schmelzflusselektrolyse genutzt werden (s. AP5.1: Schmelzflusselektrolyse). Eine schematische Zeichnung des Laboraufbaus, indem die Reaktionen durchgeführt werden ist in Abb. 65 (rechts) gezeigt.



**Abb. 65: links: Reaktionen der Chlorierung und der Carbochlorierung; rechts: Schematische Darstellung des Laboraufbaus.**

Der Laborreaktor besteht aus einem vertikal angebrachten Quarzrohr in einem Ofen. Das Quarzrohr hat eine Fritte, auf der die Magnetproben platziert werden können.  $\text{Cl}_2$ -Gas kann von oben eingeleitet werden. Während der Reaktion entstehendes  $\text{FeCl}_3$  sublimiert und wird durch den Gasstrom durch die Fritte nach unten transportiert. In der Kühlzone unterhalb des Ofens resublimiert es an der Wand und fällt in ein Auffanggefäß. Flüchtliges  $\text{BCl}_3$  und im Überschuss angebotenes  $\text{Cl}_2$  werden im Abgassystem in einen Wäscher geleitet und dort neutralisiert. Die Seltenerdchloride verbleiben auf der Quarzfritte.



- ~15 g crushed magnet waste
- Chlorination at 500 °C (oven), 440-500°C in magnet waste
- Feed: Cl<sub>2</sub>/Ar mixture

- 98-100% removal of Fe as FeCl<sub>3</sub>!
- 98-100% conversion of RE to RECl<sub>3</sub>
- Volume expansion observed (FeNdB → RECl<sub>3</sub>)
- Small amount of water insoluble residue in RECl<sub>3</sub> phase

Abb. 66: Laboraufbau zur (Carbo-)Chlorierung von Magnetproben

### Ergebnisse Chlorierung

Im Rahmen des Projekts wurden von den Projektpartnern unterschiedliche Magnetproben zur Chlorierung bereitgestellt. Bei BASF wurde die Zusammensetzung der Proben mittels Elementaranalyse überprüft. Die Ergebnisse sind in Tab. 11 zusammengefasst und zeigen, dass die Proben je nach Herkunft unterschiedliche Zusammensetzungen und unterschiedliche Fremdelemente (neben Fe, Nd und B) enthalten.



Abb. 67: Untersuchte Magnetproben.

**Tab. 11: Elementaranalysen der untersuchten Magnetproben.**

Zusammensetzung (Gew.-%)	Bosch	Magnetic Support A	Magnetic Support B	Support B after H2 treatment	Small commercial samples	Arelec Resin bonded Magnets	Bosch Magnet sample 06/15	RECVAL 2014-6, "HDD Magnets"
Fe	62	63	62	63	64	67	64	63
Nd	17,5	26,6	21,7	22	22,5	23,8	17,1	22,3
Dy	4,6	2,2	1,3	1,3	0,53	0,09	6,1	6,2
Pr	6,5	2	7,1	7,2	6,9	0,003	5,8	1,3
Tb	1,8	0,036	0,04	0,041	0,03	0,001	1,8	0,003
Sm	0,04	0,002	0,001	0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001
B	0,84	0,92	0,89	0,97	0,97	0,91	1	
Co	0,91	<0,005	0,81	0,89	0,33	2,1	1,8	0,97
Ni	2,8	0,011	0,016	0,016	0,67	0,007	0,011	2,9
Cu	1,4	0,056	0,1	0,1	0,74	0,068	0,49	
Al	0,17	0,54	0,5	0,55	0,7	0,005	0,12	
Ga	0,18	<0,001	0,001	0,001	0,069	0,001	0,09	
C						1,5		
Purity	94,5	96,1	97,4	96,1	97,4	94	98,3	96,7



**Abb. 68: Reaktionsgleichung Chlorierung von metallischen Magneten.**

Alle Proben wurden im oben beschriebenen Aufbau bei 500 °C chloriert. Die Reaktionsgleichung ist in Abb. 68 gezeigt. Die Wertprodukte (FeCl<sub>3</sub>- und SECl<sub>3</sub>-Phase) wurden quantifiziert und mittels Elementaranalyse auf ihre Reinheit untersucht (Tab. 12). Die isolierten Ausbeuten für beide Phasen lagen in allen Fällen bei >95%. Die Reinheit variierte je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, lag jedoch in fast allen Fällen bei über 95 %. In den Fällen, in denen die Reinheit bei < 95 % lag konnten die Rohprodukte mittels Sublimation (FeCl<sub>3</sub>) oder Lösen/Fällen mit Oxalat (SECl<sub>3</sub>) auf > 99 % verbessert werden. Somit konnte gezeigt werden, dass mit dem gewählten Aufbau unterschiedliche Magnet-Ausgangsmaterialien mit ausreichender Reinheit für eine Weiterverwendung erhalten werden können.

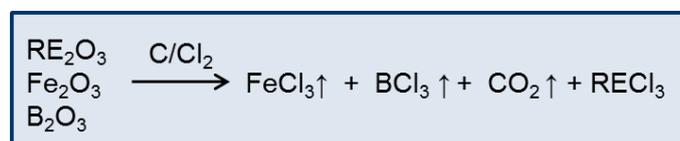
**Tab. 12: Elementaranalyse der Produktfraktionen; Rohprodukte nach Chlorierung. A) SECl<sub>3</sub>-Phase, B) FeCl<sub>3</sub>-Phase**

SECl <sub>3</sub> -Phase Fremdionen (Gew.-%)	Bosch	Magnetic Support A	Magnetic Support B	Support B after H <sub>2</sub> treatment	Small commercial samples	Arelec Resin bonded Magnets	Bosch Magnet sample 06/15	RECVAl 2014-6, "HDD Magnets"
unlöslich	3,93 (Ni, Fe)	1,36	0,57	0,27	0,38	2,36 ( C )	0	5,15 (Ni)
Fe	0,62	0,04	0,06	0,54	0,34	0,64	0,37	0,19
Co	0,61	0,01	0,09	0,07	0,15	1,6	1,46	0,7
Ni	2,44	0,01	0,01	0,02	1,25	0,01		0,01
Al, Cu, B	0,04	0,04	0,02	0,2	0,04	0,05		
SECl <sub>3</sub> Reinheit	87,5	98,4	99	97,7	95,4	92,3	95,7	92,8

FeCl <sub>3</sub> -Phase Fremdionen (Gew.-%)	Bosch	Magnetic Support A	Magnetic Support B	Support B after H <sub>2</sub> treatment	Small commercial samples	Arelec Resin bonded Magnets	Bosch Magnet sample 06/15	RECVAl 2014-6, "HDD Magnets"
Al	0,06	0,19	0,17	0,14	0,22	0,03	-	-
Co	0,2	0,01	0,3	0,34	0,09	0,29	0,07	<0,01
Cu, B, Ni	0,14	0,11	0,14	0,12	0,02	0,06	-	-
Dy	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0
Tb	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0	0	0,07
FeCl <sub>3</sub> Reinheit	98,9	98,8	98,2	98,3	99,3	99,4	>98	>98

### Ergebnisse Carbochlorierung

Neben den metallischen Magnetproben wurde im Rahmen des Projekts von den Projektpartnern auch oxidiertes Magnetmaterial bereitgestellt, welches z.B. bei der Hartbearbeitung (Schleifen) von Magneten anfällt. Das oxidierte Material kann entsprechend Abb. 69 durch Carbochlorierung zunächst reduziert und anschließend analog zu metallischem Material chloriert werden.



**Abb. 69: Reaktionsgleichung Carbochlorierung von oxidiertem Magnetmaterial.**

Bei BASF wurde die Zusammensetzung einer von den Projektpartnern bereit gestellten Probe mittels Elementaranalyse überprüft. Wie auch bei den metallischen Proben waren unterschiedliche Fremdelemente neben Fe, Nd und B enthalten. Die Ergebnisse sind in Tab. 13 zusammengefasst. An der Tatsache, dass der gemessene Metallgehalt deutlich höher als der theoretische Wert für vollständig oxidiertes Material, kann man sehen, dass die Probe trotz Kalzination nicht vollständig oxidiert vorlag.

**Tab. 13: Elementaranalyse des oxidierten Magnetmaterials.**

Zusammensetzung (Gew.-%)	oxidiertes Material
Fe	63
Nd	29
Dy	0,5
Pr	0,08
Tb	0,001
Sm	-
B	0,93
Co	0,003
Ni	0,014
Cu	0,004
Al	2
Metallgehalt	94,6
Sauerstoff (calc)	5,4

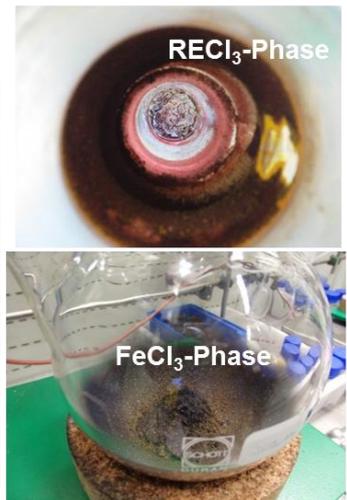
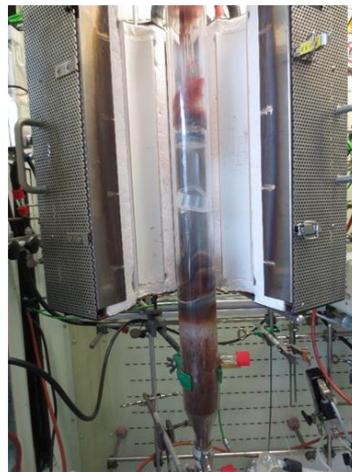
Auf Basis der Elementaranalyse wurde die zur Reduktion nötige Menge an Kohlenstoff bestimmt. Gegenüber der minimal zur Umsetzung der Oxide zu  $\text{CO}_2$  nötigen Menge ( $\text{C} : \text{O} = 0.5 : 1$ ) wurde ein Überschuss an Kohlenstoff eingesetzt ( $\text{C} : \text{O} \sim 1 : 1$ ). Kohlenstoff und oxidiertes Material wurden zu Presslingen verarbeitet und in den Reaktor gefüllt (Abb. 70). Im Unterschied zu den metallischen Proben wurde die Reaktionstemperatur auf  $700\text{ }^\circ\text{C}$  erhöht, um einen vollständigen Umsatz der Oxide zu erreichen.

#### C-bonded Tablets on Frit



- ~30 g Tablets
- Chlorination at  $700\text{ }^\circ\text{C}$  (oven),
- Feed:  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  mixture

#### Reactor after carbochlorination



- **>99% removal of Fe as  $\text{FeCl}_3$ !**
- **Almost quantitative conversion of RE to  $\text{RECl}_3$**
- **Small amount of water insoluble residue in  $\text{RECl}_3$  phase (~3%) (Insoluble oxides or Carbides)**

**Abb. 70: Carbochlorierung von Kohlenstoff/Magnetmaterial.**

Auch die Produkte der Carbochlorierung wurden mittels Elementaranalyse auf Reinheit und Ausbeute untersucht (Tab. 14). Die Reinheiten der Rohprodukte entsprechen denen der metallischen Proben. Analog könnten höhere Reinheiten durch Sublimation ( $\text{FeCl}_3$ ) oder Lösen/Fällen mit Oxalat ( $\text{RECl}_3$ ) erzielt werden. Der Anteil an wasserunlöslichem Material im RE-Rückstand lag bei etwas über 10 %. Die erreichten Umsätze (Entfernung Fe) und Reinheiten (Anteil Fremdionen) lagen trotzdem bei  $> 98\%$ .

**Tab. 14: Elementaranalyse der Produktfraktionen; Rohprodukte nach Carbochlorierung. A) SECl<sub>3</sub>-Phase, B) FeCl<sub>3</sub>-Phase**

SECl <sub>3</sub> -Phase Fremdionen (Gew.-%)	Oxidiertes Material	FeCl <sub>3</sub> -Phase Fremdionen (Gew.-%)	Oxidiertes Material
unlöslich	11,80	Al	0,65
Fe	0,01	Co	0,0078
Co	0,00	Cu, B, Ni	0,0243
Ni	0,00	Dy	0,0078
Al, Cu, B	0,00	Tb	0,0078
SECl <sub>3</sub> Rein- heit	>98	FeCl <sub>3</sub> Reinheit	>98

### Fazit

Der Meilenstein MS5.5: „Demonstration of product quality of (carbo)chlorination process being sufficient for commercial use of products from scrap“ konnte somit im Rahmen des Projekts erfüllt werden.

## 2.1.6. AP6: Ökonomische und ökologische Bewertung

### 2.1.6.1. Ökonomische Bewertung

(Bearbeitung Fh IPA)

#### Ansatz

In Anlehnung an Porter (Porter, 1979) ergibt sich die Vorteilhaftigkeit einer produktionstechnischen Handlung in der Regel aus der einzigartigen Positionierung eines Unternehmens in Bezug auf fünf wesentliche Wettbewerbskräfte (Lieferanten, Kunden, Mitbewerber, Ersatzprodukte und Rivalität). Aufgrund der vorindustriellen Reife der im Rahmen des RECVAl-Projekts untersuchten der Prozessalternativen, ist eine vollumfängliche Analyse der von Porter vorgeschlagenen Kriterien wenig zielführend. Zur ökonomischen Bewertung der hier im Labormaßstab untersuchten Technologieketten wird daher ausschließlich die Interaktion des jeweiligen Prozesses mit seinen Schnittstellen, dem Beschaffungs- und Absatzmarkt, untersucht. Abbildung 71 illustriert den Ansatz.



**Abb. 71: Ansatz zur ökonomischen Bewertung.**

Aus ökonomischer Perspektive ergeben sich hieraus folgende wesentliche Fragestellungen:

Ist eine rationale Wertschöpfung unter den gegebenen Umständen möglich?

Welche Kosten verursachen die Prozesse im Labormaßstab?

Mit welchen Beschaffungs- bzw. Absatzpreisen ist zum jetzigen Zeitpunkt zu rechnen?

Welche Potentiale haben die einzelnen Technologieketten im Hinblick auf eine industrielle Umsetzung?

Während die Ermittlung der Wertschöpfung zu einem Großteil auf Basis quantifizierbarer Daten durchgeführt werden kann, wird für die Skalierbarkeit eine qualitative Darstellung gewählt. Hierbei werden die in den einzelnen Prozessschritten eingesetzten Technologien im Hinblick auf zur Verfügung stehende bzw. im industriellen Maßstab eingesetzte artverwandte Technologien bewertet. Je höher die heutige Verbreitung artverwandter Technologien im industriellen Maßstab, desto wahrscheinlicher ist eine vergleichsweise simple Skalierbarkeit.

#### Datensammlung

Zur Ermittlung der relevanten Daten wurden parallel eine Literaturrecherche und eine Umfrage unter den RECVAl-Projektpartnern durchgeführt. Die Umfrage bei den Projektpartnern hatte zum Ziel die aktuellen Kosten der Prozesse im Labormaßstab sowie die Skalierbarkeit der Technologien zu ermitteln. Für ersteres wurde in Anlehnung an die VDMA 34160 ein Life Cycle Costing (LCC, dt. Lebenszykluskostenrechnung) Fragebogen entwickelt (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2006). Tabelle 15 illustriert den Fragebogen.

**Tab. 15: LCC Fragebogen in Anlehnung an die VDMA 34160 (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2006).**

This template will be used by Fraunhofer for LCC.

<b>PARTNER:</b>		<b>PROCESS:</b>	e.g. dHDDR
		<b>Process Step:</b>	e.g. 1/4
<i>Functional unit</i> : 1 kg of magnet			
	<b>cost</b>	<b>unit</b>	<b>comment**</b>
<b>I: PRIMARY INVEST</b>	<b>0</b>	<b>Euro</b>	<b>cumulative sum</b>
equipment aquisition		Euro	
commissioning		Euro	
infrastructure		Euro	
<b>II. OPERATING COSTS</b>	<b>0</b>	<b>Euro</b>	<b>cumulative sum</b>
<b>Material Costs</b>		<b>Euro</b>	<b>sum</b>
raw materials / starting materials		Euro	
<b>Maintenance Costs</b>	<b>0</b>	<b>Euro</b>	<b>cumulative sum</b>
maintenance / inspection		Euro	
repairs & spare parts (if applicable)		Euro	
training courses		Euro	
<b>Costs of Operation</b>	<b>0</b>	<b>Euro</b>	<b>cumulative sum</b>
required space		Euro	
auxiliaries (incl. water and gases)		Euro	
electric energy		Euro	
personnel		Euro	
<b>Products</b>	<b>0</b>	<b>%</b>	<b>sum</b>
final (intermediate) product		%	
scrap (might flow back to process chain)		%	
waste (to be disposed)		%	
loss		%	
<b>Proction process / Process parameters</b>			
electrical energy		kWh	
hours of operation		h	
production capacity		kg	
scaling factor		-	
technology level (TRL)		-	
<b>III: DISPOSAL COSTS</b>	<b>0</b>	<b>Euro</b>	<b>cumulative sum</b>
disposal of waste		Euro	
recycling of scrap		Euro	

Für die Durchführung der Umfrage wurden die deutschen Partner vom Fraunhofer IPA kontaktiert. Auf französischer Seite war das CEA für die Erhebung der Daten verantwortlich. Nachdem der Fragebogen zunächst per E-Mail an die Partner verteilt und die Rückläufer auf Konsistenz geprüft wurden, wurde mit jedem deutschen Projektpartner ein Telefoninterview durchgeführt. Aufgrund von Problemen bei der technischen Umsetzbarkeit der Versuchsaufbauten sind einige Rückläufer unvollständig. Die vorliegende Analyse bezieht sich auf die Rückläufer der deutschen Projektteilnehmer.

## Analyse

Zur Darstellung der Verwertungswege, ausgehend von den hier betrachteten Quellkategorien bis hin zu den jeweiligen Absatzmärkten, wurde zunächst ein Flussbild entwickelt. Die hier zu untersuchende Wertschöpfungskette ergibt sich somit aus einer Input-Output-Betrachtung. Unterschieden werden dabei drei unterschiedliche Quellkategorien (Automobile, Elektro- und Elektronikgeräte, Windenergieanlagen) und drei Absatzmärkte. Letztere ergeben sich aus dem jeweiligen Produkt des Prozesses. Im Fall des Reuse-Prozesses bleiben Form und Funktionalität der Eingangsgröße erhalten. Die Anwendung bleibt somit dieselbe. Da sich die Reuse-Prozesse ausschließlich für Prozesse größeren Maßstabs als rentabel erweisen, können hier einzig Produkte aus der Automobil- und Windenergiebranche verarbeitet werden. Im Fall der recycelten Magneten bleiben Form und Funktionalität der Eingangsgröße zwar ebenfalls erhalten, die Anwendung der Prozesse ist jedoch prinzipiell auch für Elektro- und Elektronikmärkte denkbar. Nicht zuletzt stellt das Recycling der Seltenen Erden innerhalb der Magnete eine Möglichkeit für eine vielfältige Verwendung durch einen beliebigen Kunden dar. Es bleibt somit festzuhalten, dass die im RECVAL-Projekt untersuchten Technologieketten nicht notwendigerweise miteinander konkurrieren. Abbildung 72 illustriert die Verwertungswege in Form einer Wertschöpfungskette.

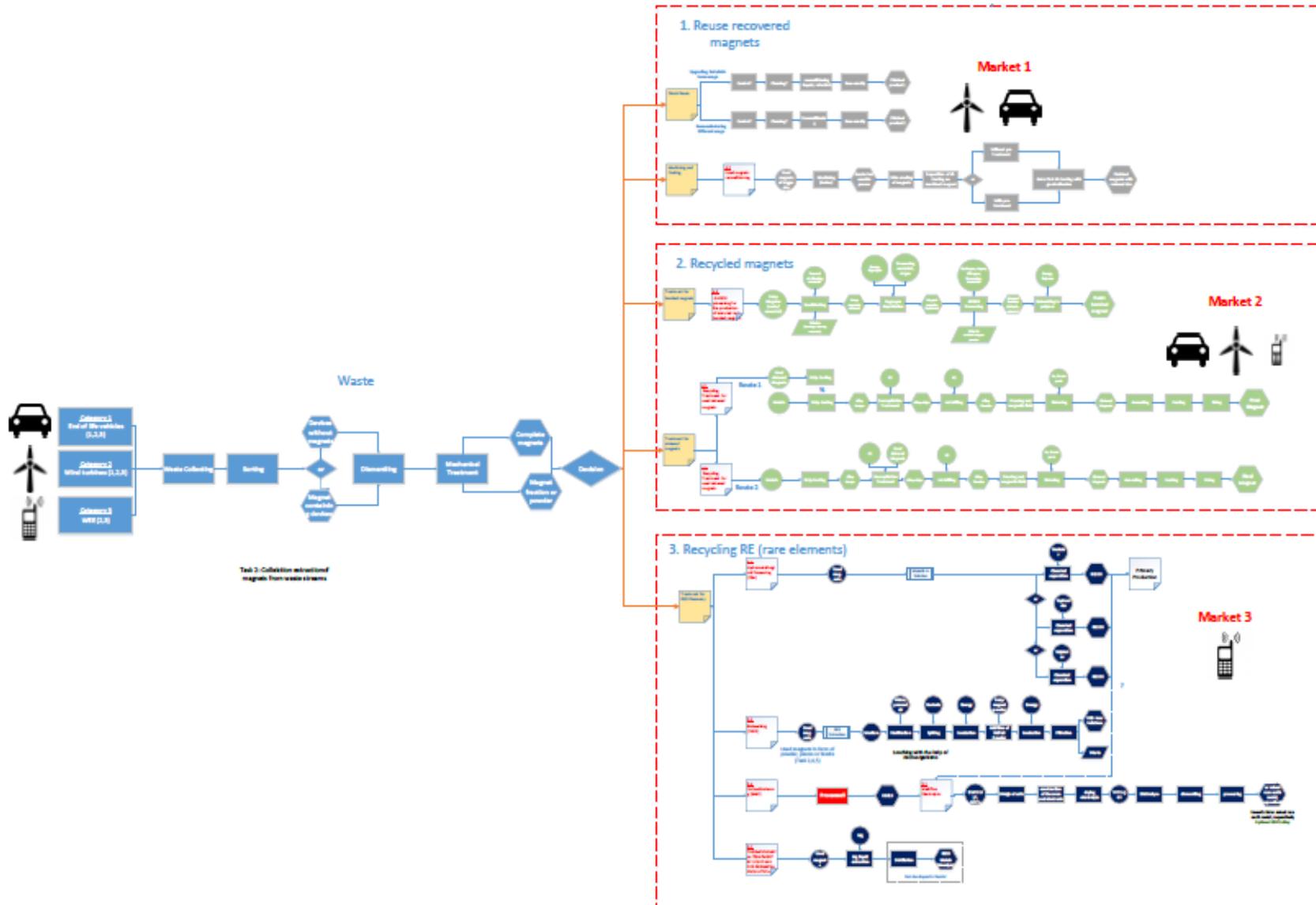


Abb. 72: Verwertungswege in Form einer Wertschöpfungskette.

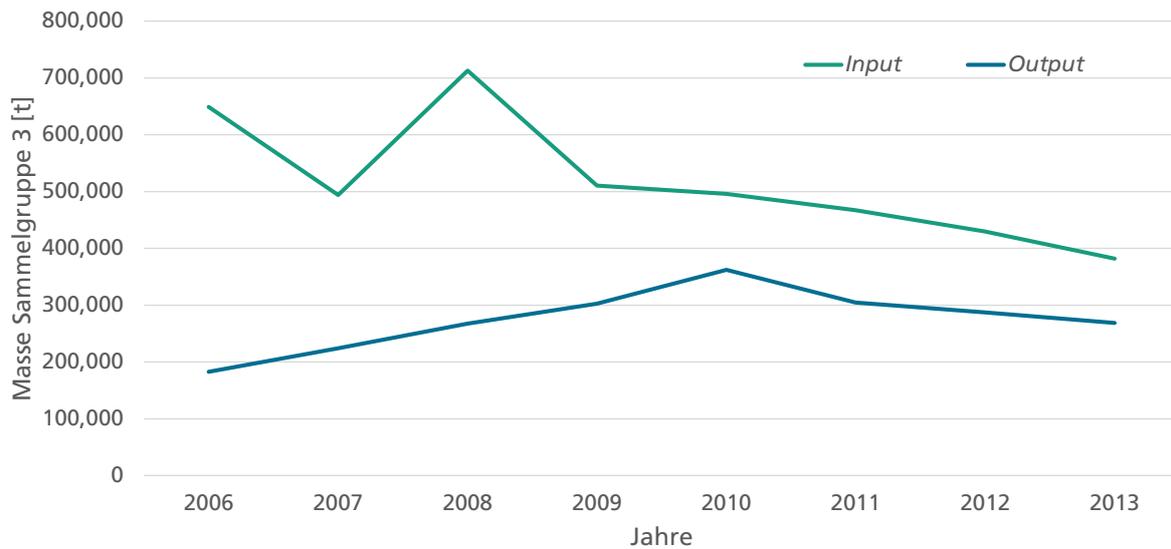
### (3.1) Beschaffungsmarkt

Die Analyse des Beschaffungsmarktes unterscheidet zwischen Mengenprojektion für die drei definierten Quellkategorien. Dabei wird eine technisch-betriebswirtschaftliche Betrachtung verwendet, die sowohl potentielle Wachstums- oder Schrumpfungseffekte berücksichtigt als auch technologische Beschränkungen oder Potentiale einbezieht. Eine Betrachtung und Abschätzung des zukünftigen Marktpreises fokussiert sich ausnahmslos auf makroökonomische Daten, da eine granulare Betrachtung des Rohstoffpreises von vielfältigen Faktoren abhängt und somit die Komplexität den Betrachtungsfokus übersteigen würde. Sowohl die Analyse der Mengenprojektion als auch die des Preises wird zum Zeitpunkt der Betrachtung eine Zeitspanne von ungefähr 20 Jahren umfassen.

Elektro- und Elektronik-Altgeräte werden in Deutschland in 6 Sammelgruppen unterteilt, wonach unterschiedliche Kategorien und deren Gerätearten in Sammelgruppen zusammengefasst werden. Die hier durchgeführte Analyse beschränkt sich zum Projektstart auf die Elektro- und Elektronik-Altgeräte der Sammelgruppe 3. Zu diesem Zeitpunkt beinhaltete diese Gruppe Geräte wie beispielsweise PCs und Laptops, Festplatten, Mobiltelefone, Musikabspielgeräte, Monitore und Fernseher. Im Jahr 2012 wurde diese Einteilung jedoch novelliert und in den folgenden Jahren diese Novellierung umgesetzt, wonach in Kategorie 3 lediglich Monitore und privatgenutzte TV-Geräte beinhaltet sind. Die restlichen Geräte wurden der Sammelgruppe 5 zugeteilt. Deshalb enthält die Analyse neben der Sammelgruppe 3 auch Teile der Sammelgruppe 5.

Der hier verfolgte Ansatz nähert sich der Prognose zu zukünftigem Bedarf und Verbrauch einerseits mithilfe einer Top-Down Vorgehensweise zur Abschätzung der Menge aller Elektrogeräte und andererseits eine Bottom-Up Vorgehensweise zur Analyse der gewichtsspezifischen Neodymanteile ausgewählter Produkte (Sander et al., 2012). Die Systemgrenze des Betrachtungsgegenstands ist der jeweils betrachtete Markt Deutschland. Dies bedeutet, dass als Inputfaktor alle in Verkehr gebrachten Produkte bilanziert werden. Dementsprechend sind Outputs die zurückgenommenen Altgeräte. In einem ersten Schritt wurde für die Jahre 2006 bis 2013 die Input- und Outputmenge in Tonnen erfasst. Dazu wurden mehrere Quellen zur Aufnahme und Validierung der Mengen betrachtet. (Stiftung EAR, 2017; Gallenkemper und Breer, 2014; DeStatis, 2002)

Deutlich wird hierbei, dass signifikant mehr Elektrogeräte in den Markt gebracht werden als aus diesem zurückkommen. Gründe hierfür könnten der Zeitverzug eines Neugerätes bis zu seinem Produktlebensende oder sonstiger Entzug des Marktes über nicht erfasste oder illegale Entsorgung sein. Dennoch ist festzuhalten, dass sich das Verhältnis von Input- zu Outputmenge angleicht. Abbildung 73 illustriert den Verlauf der Input- und Outputmengen in WEEE-Sammelgruppe 3 für Deutschland zwischen 2006 und 2013.



**Abb. 73: Input- und Outputmenge von Neodym in WEEE Sammelgruppe 3 für Deutschland [eigene Berechnung].**

Für den Ansatz der gewichtsspezifischen Menge an Neodym wurden exemplarisch 23 Elektrogeräte herausgenommen. Von diesen wurde zum einen das durchschnittliche Produktgewicht errechnet, indem die stückzahlenspezifischen durchschnittlichen Produktgewichte der 23 Elektrogeräte über die gesamte Absatzmenge aggregiert wurden. Zum anderen wurde analog die durchschnittliche Metallmenge Neodym pro Produkt bzw. deren Mittelwert errechnet. Beide errechneten Zahlen sind exemplarisch aus dem Jahre 2010 (Sander et al., 2012). Auf Basis dieser Daten wurde ein durchschnittlicher gewichtsspezifischer Anteil von Neodym für eine Gewichtsmenge errechnet (siehe hierzu Tab. 16).

Tab. 16: Spezifischer Anteil Neodym bei ausgewählten Produkten  
[Quelle RePro, (Sander et al., 2012)].

Geräte der Sammelgruppe 3	Metallmenge Neodym pro Produkt [mg]	Gesamtmenge Neodym in allen in Verkehr gebrachten Geräten [kg]
PC	6,830.0	10,928.0
Laptop	mit CCFL	298.0
	mit LED	14,612.0
Tablet Computer	347.0	278.0
Externe Festplatten	1.044 - 11.500	3.236 - 35.650
USB-Stick	10.4	123.0
Beamer	-	-
Multifunktionsdrucker mit Scanner	-	-
Schnurloses Heimtelefon	167.0	937.0
Navigationsgerät	1.0	3.5
Handy	46-118	672 - 1.726
Smartphone	120.0	924.0
Digitalkamera	16,6 - 170	136 - 1.393
Camcorder / Videokamera (digital)	20.8	16.6
LCD Monitor	-	-
LCD Fernseher	-	-
CRT Geräte	-	-
Fernbedienung	0,2 - 7,5	6,5 - 266
DVD Spieler	314.0	1,099.0
Tradbare Videospiele	42.9	52.3
Videospielkonsolen	1,238.0	3,837.0
MP3 Player	-	-
Lautsprecher	5,200.0	13,520.0
Kopfhörer	1,370.0	11,097.0
Summe		61.800 - 96.800
<b>Globale Anwendung seltene Erden in EE [kg]</b>		<b>1,596,000</b>
<b>Anteil des Neodyms in den tabellierten Geräten an globaler Anwendung Seltener Erden in EE</b>		<b>3,9 %- 6,1 %</b>

Dadurch wurde für die Jahre 2006 bis 2013 anhand der gegebenen Inputmenge an Elektroaltgeräten eine Maximalabschätzung der zu erwartenden Rückflüsse an Neodym als Sekundärquelle durchgeführt. Obgleich mit hohen Unsicherheiten verbunden, wird hierbei deutlich, dass in Zukunft jährlich mit ca. 60 Tonnen Neodym zu rechnen sind. Abbildung 74 verdeutlicht den Verlauf der voraussichtlichen Menge an Nd in der EU zwischen 2005 und 2050.

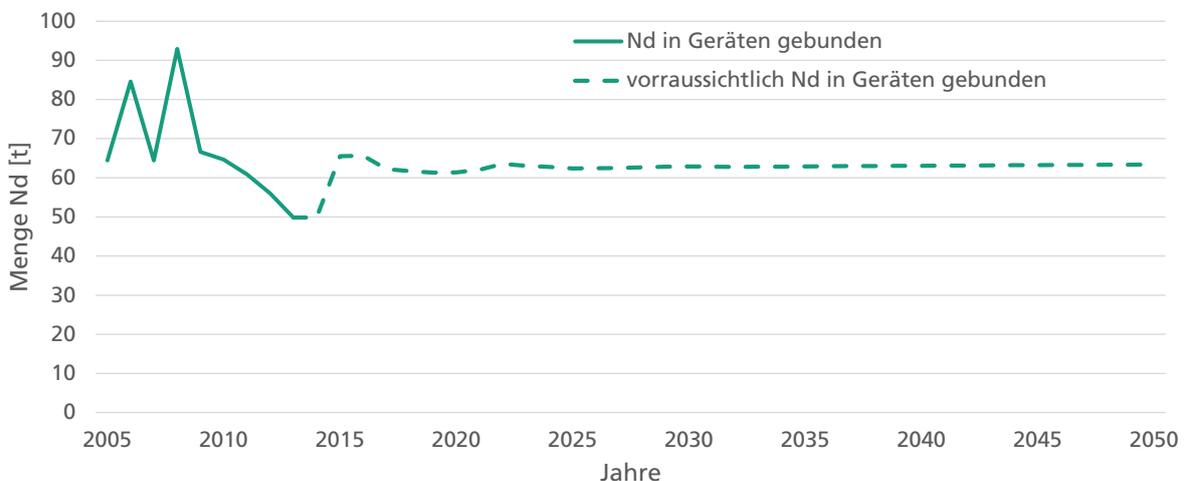


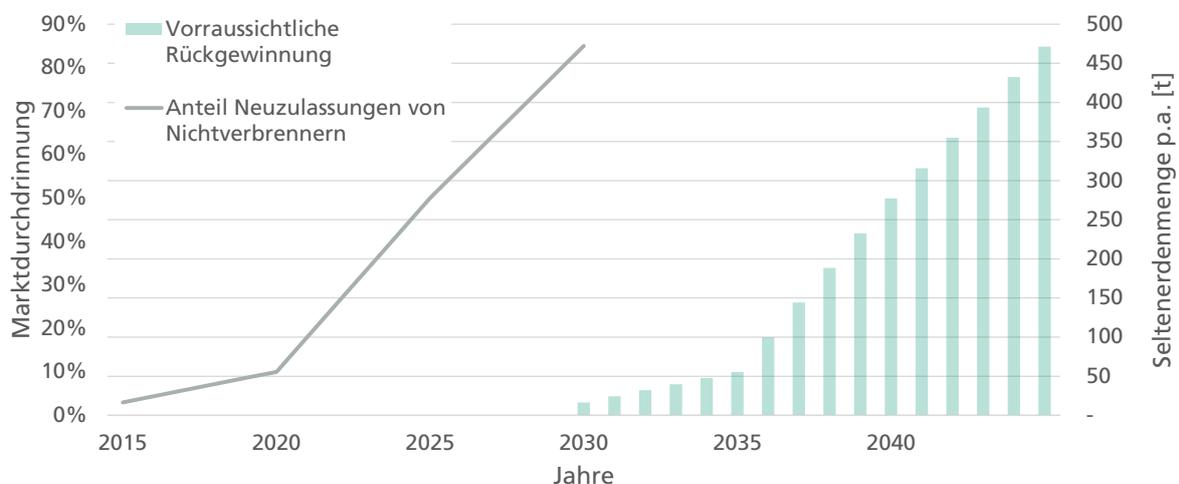
Abb. 74: Voraussichtliche Menge an Nd in der EU [eigene Berechnung].

## Analyse des Sekundärmarktes im Automotive-Bereich

Die Analyse der im Automotive-Bereich anfallenden Recyclingströme von Neodym basiert auf Generatoren bzw. Elektromotoren, die in Automobilen als primäre Antriebsquelle verwendet werden. Als Datengrundlagen für die technischen Randdaten dienen Angaben des Projektpartners Bosch. Weitere Sekundärquellen dienen zur Abschätzung der makroökonomischen Randdaten. Das Vorgehen zur Analyse gestaltet sich analog zu dem oben dargestellten WEEE-Ansatz. Im Bottom-Up Analyseteil wird ein spezifischer Anteil Neodym verwendet, der im Top-Down Verfahren mit der zu erwartendem Markt verrechnet wird. Die technische Bottom-Up-Analyse ergab laut Bosch einen typischen Anteil an Nd-Fe-B-Magnetmaterial in Automotoren von etwa 1,4 kg pro Elektromotor (bei einer durchschnittlichen Leistung von 80 kW). Unter Annahme, dass der Anteil an Seltenerdelementen (Nd, Pr, Dy, Tb, etc.) im Nd-Fe-B-Magnetmaterial typischerweise 30 Gew.-% ausmacht, bedeutet dies einen Seltenerdgehalt von etwa 0,4 kg pro Elektromotor. In der Folge wird von einem Elektromotor pro KFZ und einer durchschnittlichen Leistung von 80 kW ausgegangen.

Aus makroökonomischer Perspektive gestaltet sich die Verwendung historischer Daten schwierig, da es erst in letzten Jahren zu einem Anstieg von Zulassungen von massenmarktfähigen Elektroautomobilen kam. Unter der Annahme derselben durchschnittlichen Lebensdauer von Automobilen mit Verbrennungsmotor (15 Jahre) kann erst in einigen Jahren mit signifikanten Rückflüssen von verbautem und in den Markt gebrachten Nd-Fe-B Magneten gerechnet werden (Entsorgung.de, 2017). Aus diesem Grund werden als Datengrundlage externe Expertenschätzungen verwendet. Die Unternehmensberatung PWC geht davon aus, dass der Anteil von neu zugelassenen Automobilen der Europäischen Union mit konventionellem Verbrennungsantrieb in der Zeit von 2020 bis 2030 von 90 % auf 15 % fallen wird (PWC, 2016). Geht man nun davon aus, dass die Zahlen der jährlichen Neuzulassungen von KFZ in der Europäischen Union von 12 Millionen konstant bleiben, kann die jährliche Menge von im Markt eingebrachtem Neodym abgeschätzt werden (Mock, 2017).

Die Firma Bosch rechnet damit, dass lediglich ein Bruchteil der verkauften Autos im Kreislauf verbleibt. Eine grobe Schätzung sieht vor, dass mit einem Recycling und Rückfluss von rund 10 % der verkauften Autos zu rechnen ist. Wird nun zusätzlich eine Lebensdauer für Fahrzeuge, wie oben beschrieben, von 15 Jahren angenommen so ergibt sich der in Abb. 75 aufgezeigte Rückfluss für Neodym aus Autokomponenten. Wie die Prognose zeigt, wird kein konstanter Rückfluss, sondern einen Anstieg über die Jahre 2025 - 2040 erwartet.



**Abb. 75: Prognostizierte Rückflüsse an SE-Elementen aus Magnetmaterialien aus dem Automotive-Bereich [eigene Berechnung].**

## Analyse des Sekundärmarktes im Bereich Windenergie

Tabelle 17 fasst die Datengrundlage für Produkte aus dem Windenergiemarkt zusammen, auf der die Analyse beruht.

**Tab. 17: Datengrundlage für Produkte aus dem Windenergiemarkt.**

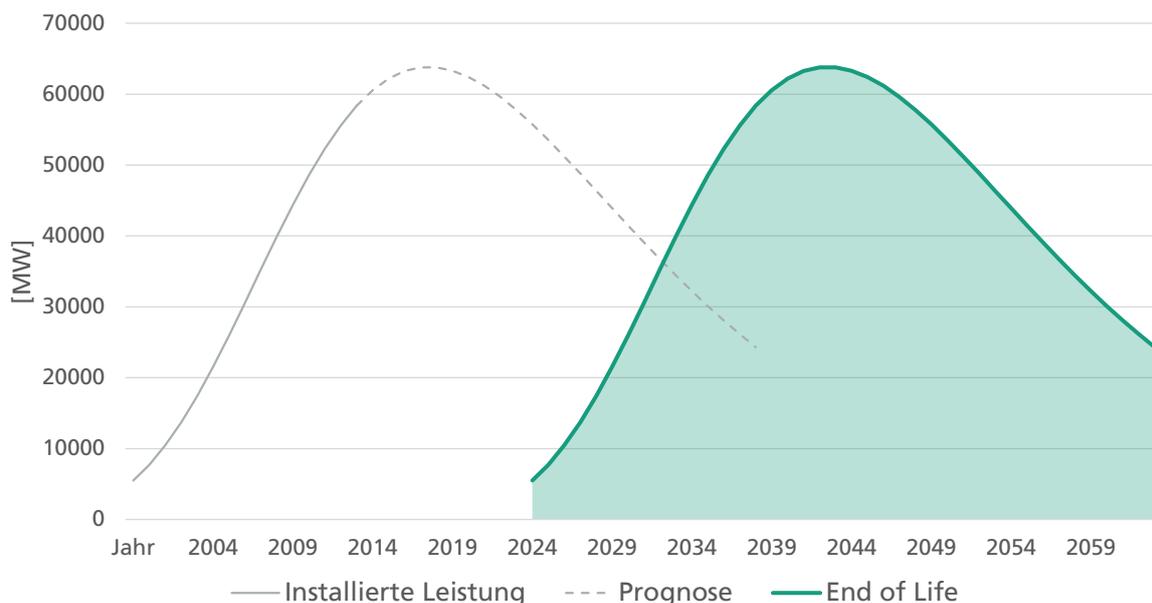
#	Autor 1	Institution	Titel	Ort	Jahr
1	Albers, Prof. Dr.-Ing. Henning	Hochschule Bremen, Institut für Umwelt- und Biotechnik	Recycling von Windenergieanlagen: Erfahrungen aus dem Onshore-Bereich und Ausblicke auf den Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen	Bremen, Germany	2014
2	Yiyang Zhang	Uppsala University, Department of Earth Sciences	Peak Neodymium- Material Constraints for Future Wind Power Development	Uppsala, Sweden	2013
3	Larsen, Hans Hvidtfeldt	Technical University of Denmark	Wind energy — drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix	Kopenhagen, Denmark	2014
4		enova	Erfahrungen im Repowering Onshore – Herausforderungen Offshore aus der Perspektive eines Projektentwicklers	Leer, Deutschland	2014
5		Deutsche Windtechnik	Repowering		2015
6		GE Power & Water	4.1-113 Wind Turbine		2011
7	Bang, D.	Delft University of Technology	Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines	Delft	2013
8	Simbolotti, Giorgio	IRENA	Wind Power - Technology Brief		2016
9	Andersen, Per Dannemand	INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY POLICY AND MANAGEMENT AMEC Environment & Infrastructure	Managing long-term environmental aspects of wind turbines: A prospective case study		2007
10			Wind Turbine Magnets Study	Schottland	2014
11	Ortegon, Katherine	Journal of Cleaner Production	Preparing for end of service life of wind turbines		2013
12		IRENA	Wind Power	Abu Dhabi	2013
13		Fraunhofer IWES	Windenergie Report Deutschland 2013	Kassel	2013
14	Kaiser, Oliver S.	VDI	Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen	Berlin, Deutschland	2014
15		Fraunhofer IWES	Windenergie Report Deutschland 2014	Kassel	2014
16		EPA	Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues	Cincinnati, USA	2012
17	Schüler, Dr. Doris	Öko-Institut e.V.	Study on Rare Earths and Their Recycling	Darmstadt, Deutschland	2011
18	Niederhausen, Herbert		Elektrischer Strom		2016
19	H. Albers	Hochschule Bremen – Institut für Umwelt und Biotechnik	Recycling of Wind Turbine Rotor Blades - Fact or Fiction?		
20	E. Martínez		LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine Offshore Wind Energy Installation and Decommissioning		2009
21	Mark J. Kaiser		Cost Estimation in the U.S. Outer Continental Shelf		2010

Die Analyse wird auf Onshore-Windkraftanlagen, also Windkraftanlagen, die auf dem Festland installiert sind, und Offshore-Windkraftanlagen, dementsprechend Windkraftanlagen, welche sondern auf Hochseegewässern gebaut sind, unterschieden. Dies ist nötig, da eine kostenseitige Betrachtung der Rückbaumaßnahmen sich in beiden Fällen grundlegend unterscheidet. Der Rückbau von Offshore -Windkraftanlagen ist deutlich komplizierter und kostenintensiver. Des Weiteren muss die Lebenszeit von Windkraftanlagen und somit deren Zeitpunkt ihrer Außerbetriebnahme berücksichtigt werden. Die Lebenszeit einer Windkraftanlage wird auf grob 25 Jahre (Jacobson, 2009) geschätzt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese auf 40 Jahre ausgeweitet werden kann.

Die Nutzung von Onshore-Windkraftanlagen zur industriellen Stromgewinnung hat deutlich früher begonnen als die der Offshore-Windkraftanlagen. Diese werden in größerem Maßstab vermehrt seit dem letzten Jahrzehnt eingesetzt. Dementsprechend wird damit gerechnet, dass der Rückbau der Onshore-Technik in naher Zukunft und Offshore-Technik in mittlerer Zukunft stattfinden wird. Eine weitere Unterscheidung wird bezüglich direktgetriebener und indirekt getriebener Windkraftanlagen getroffen. So beinhalten indirekt getriebene Windkraftanlagen ein Getriebe als Zwischenstück zwischen Rotor und Generator. Direkt getriebene Windkraftanlagen nutzen eine andere Generatortechnik und können deswegen auf ein Getriebe verzichten. Der Vorteil dieser neueren Entwicklung liegt in der Reduktion von Verschleißteilen. Somit kann ein wartungsärmerer Betrieb gewährleistet werden, weshalb diese Technik insbesondere für die Offshore-Technik verwendet wird.

Der Unterschied zwischen direkt und indirekt betriebenen Windkraftanlagen ist entscheidend in Bezug auf die Verwendung von Seltenerd-Metallen. So werden im Generator einer direkt getriebenen Windkraftanlage Nd-Fe-B-Magnete verbaut. Grund hierfür ist, dass die Verwendung von Nd-Fe-B-Magneten das Gewicht und die Bauraumgröße reduziert. Deshalb wird sich die Betrachtung auf direkt-getriebene Windkraftanlagen konzentrieren. Erste direkt getriebene Windkraftanlagen hatten einen Nd-Fe-B-Anteil von ca. 600 kg pro MW Leistung. Heutzutage wird mit einem Anteil von 200 kg pro MW gerechnet (Niederhausen und Burkert, 2014).

Auf der makroökonomischen Seite der Analyse werden Daten der bisher weltweit installierten Leistung herangezogen. Für die Jahre 2001 bis 2015 lässt sich ein linearer Anstieg der jährlich installierten Leistung verzeichnen. Ab dem Jahr 2020 wird sich das Wachstum verlangsamen und es wird zu einer geringeren installierten Leistung pro Jahr kommen (WWEA, 2017). Kumuliert man nun die Leistung der seit 2000 bis 2015 verbauten Anlagen, so ergeben sich an die 467.000 MW. Unter der Annahme des direkten Antriebs und der geschätzten 200 kg Nd je MW ergibt sich eine mögliche recycelbare Menge von 93.400 t Neodym. Diese wird jedoch aufgrund der ungefähren Lebensdauer von 25 Jahren erst zwischen 2025 und 2040 anfallen. Aufgrund der theoretisch möglichen Lebensdauer von 50 Jahren ist davon auszugehen, dass nicht alle Windkraftwerke zerlegt werden. Somit kann sich die Menge an rückgewinnbarem Neodym weiter reduzieren. Abbildung 76 verdeutlicht den Verlauf von Installation und Rückbau der Leistung von Windenergieanlagen zwischen 2004 und 2060.



**Abb. 76: Neuinstallation und Rückbau der Leistung von Windenergieanlagen weltweit [eigene Berechnung].**

### (3.2) Wertschöpfung

Nachdem in den vergangenen Abschnitten zunächst die wesentlichen Entwicklungen auf den Beschaffungsmärkten diskutiert wurden, erörtern die nachfolgenden Abschnitte die Wertschöpfung der im Rahmen des RECVAL-Projekts untersuchten Technologieketten anhand einer Kostenbetrachtung (im Labormaßstab) und einer qualitativen Abschätzung des Upscaling-Potentials. Die Ergebnisse der Kostenbetrachtung basieren auf den Rückmeldungen der Partner. Da viele der entwickelten Prozesse noch im Labormaßstab durchgeführt werden, wird von einer zunächst geplanten Kostenvergleichsrechnung an dieser Stelle Abstand genommen. Wie bereits zuvor erwähnt, bezieht sich die Analyse auf die Daten der deutschen Verbundpartner.

Für die nachfolgende Untersuchung der Prozesse aus Kostensicht ist eine Reihe von Annahmen erforderlich, die an dieser Stelle kurz umrissen werden sollen:

Investitionsgüter: Da es sich hier um Forschungsanwendungen handelt, werden Abschreibungen nicht auf Grundlage von AfA-Richtlinien kalkuliert, sondern auf Basis der vom jeweiligen Projektpartner angenommenen Nutzungsdauer und Auslastung.

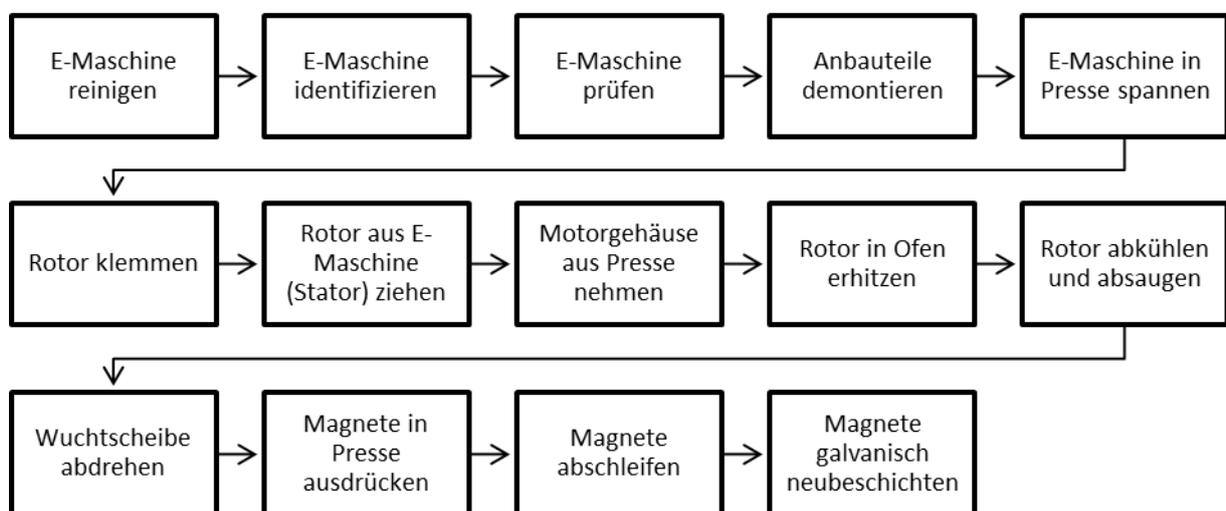
Wartungs- und Entsorgungskosten werden nur berücksichtigt, wenn diese bekannt sind.

Es wird von einem Arbeitstag von 8 h ausgegangen. Ein Arbeitsmonat wird mit 20 Arbeitstagen veranschlagt, ein Arbeitsjahr wird mit 52 Wochen kalkuliert.

Als Eingangsmaterial wird in allen Fällen von einer E-Maschine mit einem Beschaffungspreis i. H. v. 50 €/kg ausgegangen.

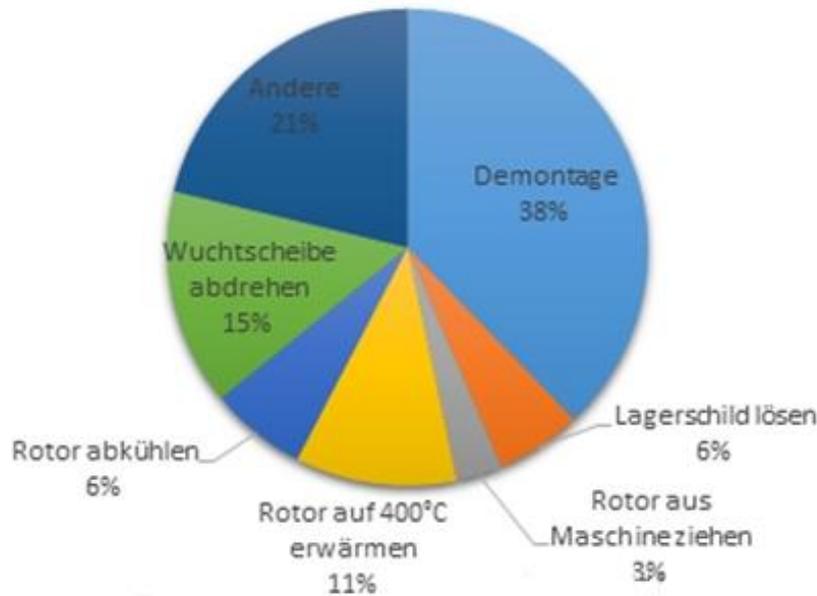
#### (3.2.1) Reuse von Magneten (direkter Reuse)

Der direkte Reuse-Prozess der Firma Bosch kann in eine Abfolge von 14 Schritten unterteilt werden. Abbildung 77 illustriert den Prozess. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die galvanische Neubeschichtung der Magnete bei Bosch keine verlässlichen Daten vorlagen und diese daher in der folgenden Auswertung der Prozessschritte nicht mit berücksichtigt wurde.



**Abb. 77: Prozessabfolge des Bosch-Reuse-Prozesses.**

Da es der Firma Bosch aufgrund interner Restriktionen nicht möglich war konkrete Kostendaten bereitzustellen, wurde an dieser Stelle der Versuch unternommen einzig die Kostentreiber des Prozesses zu identifizieren. Wie in Abb. 78 dargestellt, sind die wesentlichen Kosten die Demontage der Anbauteile, das Abdrehen der Wuchtscheibe, das Entfernen des Rotors aus der E-Maschine, das Erhitzen des Rotors im Ofen, das Abkühlen des Rotors und das Lösen des Lagerbildes.



**Abb. 78: Kostenverteilung des Bosch Reuse-Prozesses nach Schritten.**

Eine genauere Begutachtung offenbart, dass technologische Restriktionen für einen Großteil der Kosten verantwortlich sind (u.a. Pressebetrieb beim Entfernen des Rotors aus der E-Maschine, Ofen- und Gebläsebetrieb beim Erhitzen bzw. Abkühlen des Rotors). In diesen Fällen ist jedoch in Zukunft mit erheblichen Verbesserungen aufgrund von Prozessoptimierung (z.B. Reduktion von Durchlaufzeiten, Verringerung der Temperatur) zu rechnen. Einzig im Fall der Demontage der Anbauteile fallen erhebliche Personalkosten an. Hier stellen Automatisierungslösungen den wesentlichen Stellhebel für eine Optimierung dar. Das Upscaling-Potential des Reuse-Prozesses wird in Anlehnung an das oben durchgeführte Vorgehen als generell gut erachtet, da sämtliche der hier eingesetzten Technologien bereits auf dem Markt in industriellen Maßstäben Anwendung finden. Voraussetzung für ein wirtschaftlich rentables Upscaling mittels Automatisierung ist jedoch die garantierte Verfügbarkeit einer ausreichend großen Anzahl an Rückläuferteilen, die auf der gleichen Linie demontiert werden können. Bei der aktuellen Vielfalt an E-Motoren-Design bleibt abzuwarten, ob sich einzelne Typen oder Modelle in Zukunft durchsetzen werden und somit die benötigte Stückzahl für eine spezialisierte Automatisierung erreicht wird. Signifikante Verbesserungen sind auch auf dem Beschaffungsmarkt in Sicht. Ausgehend von den heutigen Beschaffungspreisen pro E-Maschine i. H. v. 50 - 100 €, die wesentlich von der inkonsistenten Sammlung abhängen, sehen die Experten des Unternehmens ein Reduktionspotential um 50 - 70 € durch neue Geschäftsmodelle (z.B. Rücknahmeverträge mit dem Kunden) und optimierte Logistikkonzepte. Alternative Geschäftsmodelle könnten auch einen Beitrag dazu liefern, den Abfluss von Alteilen aus dem Markt zu verringern.

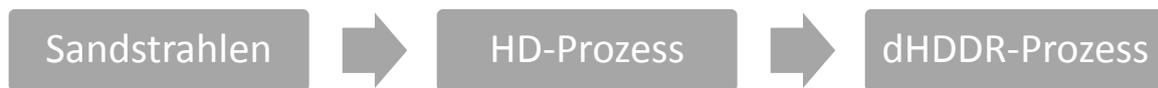
Bei der Wiederverwendungsrouten Reuse werden, im Gegensatz zu den Recyclingmethoden, die Altmagnete direkt wieder in neue Bauteile/Komponenten eingesetzt. D.h. unter Vernachlässigung von Ausschuss im Prozess können aus 1 kg Magneten potentiell wieder 1 kg Magnete Anwendung finden. In Realität erscheint aber eine Annahme von 10-20 % Ausschuss realistisch auf Grund von Beschädigungen bei der Demontage und Prozessfehlern. Bei der betrachteten Linie wurde ein Ofen mit Kapazität für 2 Rotoren betrachtet. Die Gesamtprozesszeit wird in diesem Szenario maßgeblich von der Ofenkapazität beeinflusst und beträgt insgesamt 3,5 h, was einem Reuse-Prozess von etwa 2,8 kg Magnete bzw. 0,84 kg Seltenerdmaterial in diesem Zeitraum entspricht. Dabei sind die Prozesse des Abschleifens und des galvanischen Neubeschichtens - falls erforderlich - nicht berücksichtigt. Bei einer Erweiterung der Ofenkapazität auf beispielsweise 10 Rotoren kann die Menge an rezyklierten Magneten bei einer Gesamtprozesszeit von 5,5 h (zusätzliche Demontageschritte für jeden Motor) dementsprechend verfünffacht wer-

den (14 kg Magnete bzw. 4,2 kg Seltenerdmaterial) und die Wiederaufbereitungsrate für Magnete von etwa 0,8 kg/h auf etwa 2,5 kg/h gesteigert werden.

Aus technischer Sicht wäre eine Umsetzung im Industriemaßstab problemlos möglich, da alle Prozesse industriell etablierte Standardprozesse sind. Bei einer Hochskalierung würden die Personalkosten mitsteigen, da in der hiesigen Betrachtung die Zerlegung der E-Maschine händisch vollzogen wird. Wird auf Grund ausreichender Stückzahlen des gleichen Typs eine Automatisierung sinnvoll, besteht Potential zur Einsparung von Personalkosten. Beim Invest in Anlagen ist deren Auslastung ausschlaggebend für eine kostensparende Nutzung. Eine größere Menge an Input-Material (hier E-Maschinen) bringt nur einen Kostenvorteil, wenn auf kostengünstigere (pro Menge Material) Anlagen umgestiegen werden kann oder wenn die verwendeten Anlagen eine höhere Ausnutzung erfahren.

### (3.2.2) Recycling von Magneten (HDDR-Prozess)

Recycling von Magneten unter Einsatz eines HDDR Prozesses kann grob in eine Abfolge von drei Schritten untergliedert werden. Mittels Sandstrahlen wird zunächst die Antikorrosionsschicht und/oder oxidierte Oberfläche abgetragen. Daraufhin werden die Altmagnete durch den Einsatz von Wasserstoff versprödet (HD-Prozess). Das hierdurch produzierte hydrierte Magnetpulver, bestehend aus einkristallinen Partikeln, und wird in einem weiteren Schritt (dHDDR) in anisotrope polykristalline Partikel umgewandelt. Abbildung 79 illustriert den vereinfachten Prozessablauf.



**Abb. 79: Vereinfachte Prozessabfolge des HDDR-Prozesses.**

Die Kapazitäten der eingesetzten Prozesstechnologien unterscheiden sich dabei erheblich. So ist das Sandstrahlen eine herkömmliche Methode zum Abtrag von Beschichtungen und hat einen hohen Durchsatz. Der Prozess der Wasserstoffversprödung ist zwar in industriellem Maßstab seit langem etabliert (McGuinness et al., 1986; McGuinness et al., 1989), zur Datenerhebung wurde allerdings auf den in den Versuchen eingesetzten HD-Autoklav im Labormaßstab zurückgegriffen.

Auch der HDDR-Prozess wird bereits erfolgreich im industriellen Maßstab von Aichi Steel eingesetzt (Aichi Steel, 2017). Innerhalb dieses Projektes und damit auch für die Datenerhebung muss dieser Prozess jedoch als der limitierende Schritt angesehen werden, bedingt durch Kapazität und Durchsatz des HDDR-Autoklaven. Hierbei handelt es sich um einen reinen Labor-Reaktor mit einem maximalen Fassungsvermögen von 10 g Magnetpulver je Batch und gleichzeitig der deutlich längsten Prozessdauer. Ein aus industrieller Sicht rationaler Betrieb ist unter den gegebenen Umständen natürlich nicht möglich. Da jedoch alle hier verwendeten Anlagen auch in der Industrie bereits im Einsatz sind, stellt eine Aufskalierung prinzipiell kein Problem dar.

Je Durchlauf ist für das Sandstrahlen eine Zeit von 1h, für den HD-Prozess von 4h und für den dHDDR-Prozess von 8h nötig. Die Aufwendungen des Fraunhofer IWKS ergeben sich demnach wie folgt:

### Materialkosten

Bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver belaufen sich die Materialkosten auf 0,53 €.

### Investitionskosten

Das Fraunhofer IWKS geht von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer für sämtliche Investitionsgüter in Höhe von 20 Jahren aus. Insgesamt fallen hier rund 225.200 € an (5.500 € für die Sandstrahlanlage, 12.500 € für den Reaktor, 6.000 € für die Pumpe, 1.200 € für die H<sub>2</sub>-Sensoren sowie rund 200.000 € für die Konstruktion und den Aufbau der dHDDR-Laboranlage). Die Sandstrahlanlage ist mit rund 8 h pro Woche ausgelastet. Reaktor, Pumpe und H<sub>2</sub>-Sensoren werden hingegen 24 h pro Woche betrieben. Der dHDDR-Prozess wird mit 16 h pro Woche veranschlagt. Die Abschreibung errechnet sich wie folgt:

$$A_i = \frac{I_i * t_{b,i}}{(n_i * a_i)}$$

- $A_i$  Abschreibung des Investitionsguts i
- $I_i$  Investitionssumme des Investitionsguts i
- $n_i$  Nutzungsdauer des Investitionsguts i
- $a_i$  Auslastung des Investitionsguts i
- $t_{b,i}$  Betriebszeit des Investitionsguts i

Bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver ergeben sich folgende Abschreibungen auf die Investitionsgüter:

Sandstrahlanlage:	0,01 €
Reaktor:	0,17 €
Pumpe:	0,08 €
H <sub>2</sub> -Sensoren:	0,02 €
dHDDR-Anlage:	38,46 €
Gesamt:	38,73 €

Deutlich wird hier bereits der unnatürlich hohe Kostenanteil der dHDDR-Anlage, die im Fall einer Standardisierung der Konstruktion bzw. einer adäquaten Dimensionierung zu erheblichen Kosteneinsparungen führen würde.

### Wartungskosten

Die Wartungskosten belaufen sich auf geschätzte 350 € pro Jahr (50 € für die Sandstrahlanlage und 300 € für die Pumpen). In Anlehnung an die Berechnung der Abschreibungen ergeben sich folgende Verrechnungssätze bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver:

Sandstrahlanlage:	0,00 €
Pumpe (HD):	0,04 €
Pumpe (dHDDR):	0,58 €
Gesamt:	0,62 €

### *Personalkosten*

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Personalaufwendungen wird angenommen, dass sämtliche Mitarbeiter nach TVÖD<sup>1</sup> bezahlt werden. Entsprechend entscheiden Qualifizierung und Bearbeitungszeit über die Höhe der Personalkosten. Bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver ergeben sich folgende Aufwände:

Sandstrahlen (EG5, 1h):	0,15 €
HD-Prozess (EG5, 2,5h):	4,91 €
dHDDR-Prozess (EG12, 2,5h):	50,07 €
<i>Gesamt:</i>	<i>55,76 €</i>

### *Betriebsstoffkosten*

Als Betriebsstoffe kommen Glasperlen und Druckluft für das Sandstrahlen sowie Wasserstoff, Argon, Stickstoff und Verbrauchsmaterialien für die HD- und dHDDR-Prozesse zum Einsatz. Je Durchführung fallen hierfür Kosten i. H. v. rund 0,5 € für das Sandstrahlen, 0,2 € für den HD-Prozess und 2 € für den dHDDR-Prozess an. Bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver ergeben sich folgende Aufwände:

Sandstrahlen:	0,01 €
HD-Prozess:	0,03 €
dHDDR-Prozess:	2,00 €
<i>Gesamt:</i>	<i>2,04 €</i>

### *Energiekosten*

Der Stromverbrauch bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver beläuft sich auf geschätzte 0,2 kWh. Die Energiekosten werden daher mit 0,06 € veranschlagt.

### *Entsorgungskosten*

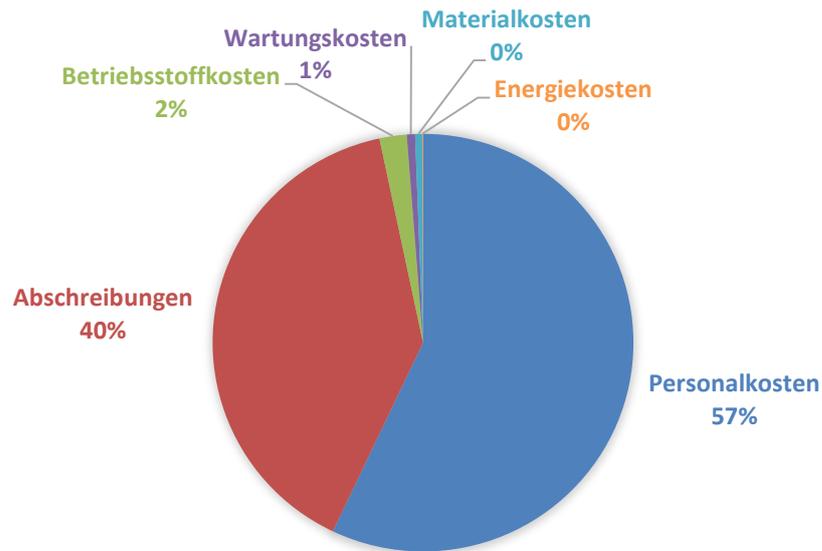
Sämtliche entstehenden Abfälle des HDDR-Prozesses können über den Laborabfall entsorgt werden. Die dadurch anfallenden Kosten sind dabei bereits im Labormaßstab vernachlässigbar klein. Bei einer Aufskalierung des Prozesses wird das zu entsorgende Material im Vergleich zur prozessierten Menge verschwindend gering sein, daher wird an dieser Stelle auf die Berücksichtigung der Entsorgungskosten verzichtet.

### *Zwischenfazit*

Bezogen auf eine Ausbringungsmenge i. H. v. 8 g Magnetpulver ergeben sich Gesamtkosten von 97,68 €. Dabei machen Personalkosten und Abschreibungen alleine 97% aus. Von den 40 % Abschreibungskosten sind wiederum rund 91% auf die dHDDR-Anlage zurückzuführen sind. Abbildung 80 illustriert die Zusammensetzung. Nochmals hervorzuheben ist, dass die Werte die Kosten eines reinen Laborprozesses widerspiegeln.

---

<sup>1</sup> Als Referenz dient hier die TVÖD-Endgeldtabelle 2016 (Stufe 1): <http://www.oeffentlichen-dienst.de/images/pdf/tvoed-vka.pdf>



**Abb. 80: Kostenzusammensetzung des HDDR-Prozesses.**

### (3.2.3) Recycling von SE-Verbindungen

Die im RECVAl-Projekt untersuchten Prozessketten im Bereich Recycling von Seltenen Erden umfassten das hydrometallurgische Verfahren (CEA), das Bioleaching (Fh IWKS), die Carbochlorination (BASF) und die Schmelzelektrolyse (Fh IPA).

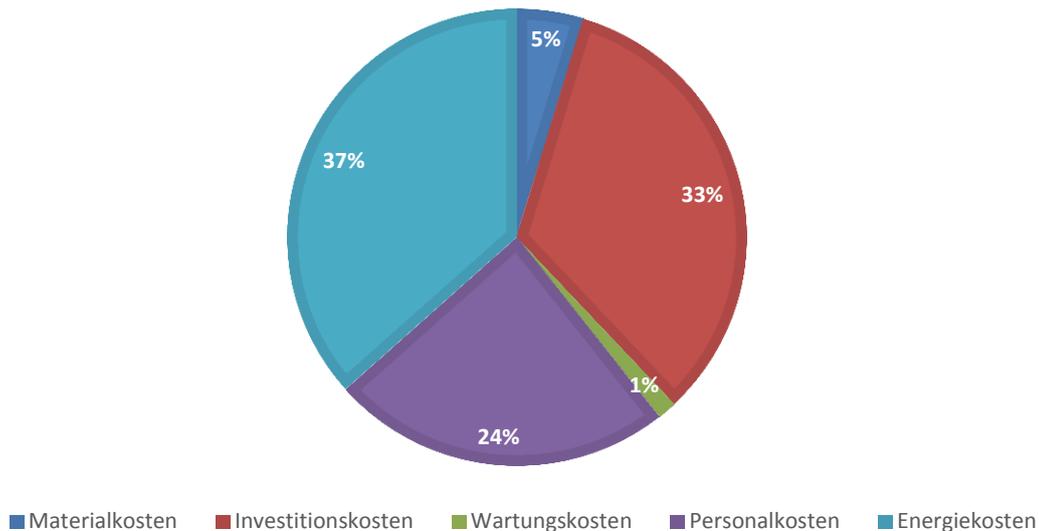
#### (3.2.3.1) Bioleaching

Das Bioleaching ermöglicht eine direkte Extraktion der seltenen Erden aus Altmagneten. Der Prozess kann grob in eine Abfolge von vier Schritten untergliedert werden: Kultivierung, Bioleaching, Filtration und Separation. Abbildung 81 illustriert den vereinfachten Prozessablauf:



**Abb. 81: Vereinfachte Prozessabfolge des Bioleaching-Prozesses.**

Die Durchführung des im Labormaßstab getesteten Prozesses ergab folgende Kostenverteilung:



**Abb. 82: Kostenverteilung des Bioleaching-Prozesses.**

Die Hochskalierung der Kosten, des im Labormaßstab getesteten Prozesses vom Fh IWKS würde unter diesen Bedingungen einen unrealistisch hohen sechsstelligen Gesamtbetrag von ca. 182.000 € verursachen. Dabei stellen Investition und Energie die Hauptkosten dar (Abb. 82). Wie eben erwähnt, ist diese Abschätzung allerdings nicht realistisch, da die Investitionskosten bei großtechnischen biotechnologischen Anlagen (Kundenanfertigungen) nicht kalkulierbar sind und Energie und Wartungskosten darauf aufbauen.

Da der Prozess im Rahmen des Projekts, u.a. aufgrund der Prozesszeit und Kapazität des Bioreaktors, lediglich einmalig zum Nachweis der Realisierbarkeit durchgeführt wurde, wird im Folgenden von einem Vergleich mit anderen Prozessen abgesehen. An dieser Stelle soll daher ausschließlich auf die Möglichkeiten der Hochskalierung eingegangen werden:

Mit den hier untersuchten Prozessparametern ist für die Herstellung von 1 kg Seltenerd-Konzentrat (Pulvermix verschiedener Seltener Erden) 7,8 kg Altmagnetpulver notwendig. Um das Pulver mit einem Durchlauf zu leachen ist ein Bioreaktor mit 100 L Fassungsvermögen (statt hier 3,5 L) notwendig. Bioreaktoren sind als Einzelmodelle heute bis zu Größen von 5000 L erhältlich (i. d. R. Einzelanfertigung nach Kundenwünschen). Ein Fermenterlauf (Kultivierung und Bioleaching) dauert 336 h. Somit könnte innerhalb von 336 h ca. 50 kg Seltene-Erden-Konzentrat gewonnen werden. Bioreaktoren können auch als Mehrkomponentensysteme betrieben werden, d.h. mehrere einzelne Bioreaktoren werden miteinander gekoppelt. Aus technischer Sicht wäre eine Umsetzung im Industriemaßstab daher problemlos. Eine solche Hochskalierung würde sich gleichzeitig wenig auf die Personalkosten auswirken, da der Prozess vollautomatisch läuft und Personal für Input-, Output- und Kontrollschritte notwendig ist.

Die Auslastung des Prozesses ist abhängig vom Input (Menge an zur Verfügung stehenden Altmaterial). Durch eine Nutzung eines Mehrkomponentensystems mit mehreren einzelnen Bioreaktoren könnte hier flexibel auf Schwankungen reagiert werden (z.B. durch Ab- bzw. Zuschalten von einzelnen Reaktoren). Durch weitere Untersuchungen und Optimierungen der Prozessparameter kann der Einsatz der wässrigen Phase (Nährmedium) verringert werden und dadurch der Umsatz gesteigert werden. Dies würde sich gleichermaßen auf die Kosten der Chemikalien und auf die Prozessdauer auswirken. Der Schritt der Filtration kann ebenfalls großtechnisch realisiert werden, wobei der Einsatz von wiederverwertbaren Filtern denkbar wäre (Kosten/Aufwand Abschätzung). Die Elementseparation und Reinigung erfolgte bei dem dargestellten Prozess durch einfache Fällung mit konzentrierter Oxalsäure. Da diese verbraucht wird, sind in diesem Bereich keine Einsparungen möglich. Der letzte Prozessschritt kann aber auch in bereits etablierte Verfahren, z.B. Trennung nach der Primärproduktion eingeschleust werden, um die Trennung ökonomischer zu gestalten und Produkte mit einer höheren Reinheit zu gewinnen.

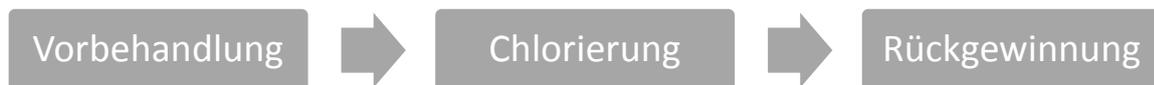
### (3.2.3.1) Hydrometallurgische Verarbeitung, Carbochlorierung und Schmelzflusselektrolyse

#### *Hydrometallurgische Verarbeitung*

Wie oben bereits erwähnt, werden in diesem Abschnitt die Prozesse der deutschen Partner evaluiert. Eine Auswertung der hydrometallurgischen Ansätze mit Hinblick auf eine ökonomische Vorteilhaftigkeit wird daher an dieser Stelle nicht durchgeführt.

#### *Carbochlorierung*

Die Carbochlorierung kann grob in eine Abfolge von drei Schritten untergliedert werden: Vorbehandlung, Chlorierung und Rückgewinnung. Abbildung 83 illustriert den vereinfachten Prozessablauf.



**Abb. 83: Vereinfachte Prozessabfolge des Carbochlorierung-Prozesses.**

Aus einer Eingangsmenge von 2 kg Altmagnet werden hier jährlich 0,504 kg SE-Oxid hergestellt, die wiederum als Ausgangsstoff der Schmelzflusselektrolyse dienen (20 g per Batch, 200 Arbeitstrage/Jahr, 1 Tag Prozesszeit, 1 Tag Reinigung →  $100 * 20 \text{ g/Jahr} = 2 \text{ kg}$ ). Die Kosten der Firma BASF ergeben sich wie folgt:

**Tab. 18: Kostenart und -höhe Carbochlorierung-Prozesses.**

Kostenart	Kostenhöhe	Erläuterung
Materialkosten	0,07 €	Annahme: 3,5 €/kg Altmagnetmaterial (Niedrigpreisniveau)
Investitionskosten	7 €	Annahme: 10 Jahre Nutzungsdauer, 2 T/Woche Auslastung, 16 h Beanspruchung durch Prozess (8h Bearbeitungszeit, 8h Reinigen)
Wartungskosten	3 €	Annahme: 2 T/Woche Auslastung, 16 h Beanspruchung durch Prozess (8 h Bearbeitungszeit, 8 h Reinigen)
Personalkosten	220 €	Annahme: 8 h Bearbeitungszeit, 8 h Reinigen (ausgebildeter Laborant – TVÖD EG5)
Energiekosten	12 €	Annahme: 5200 kWh/Jahr, 0,3 €/kWh, 2 T/Woche Auslastung, 16 h Beanspruchung durch Prozess (8 h Bearbeitungszeit, 8 h Reinigen)
<i>Gesamtkosten</i>	247 €	Zur Herstellung von 5,04 g RE-Oxid

Der hier untersuchte Prozess basiert auf der großtechnisch eingesetzten Chlorierung von Eisen zur Herstellung von Eisenchlorid, welches durch Sublimation aus der Reaktionszone entfernt wird. Wird statt Eisen eine Nd-Fe-B-Legierung eingesetzt, bleiben die Seltenerdbestandteile als nicht-flüchtige Seltenerdchloride in der Reaktionszone zurück und werden so vom Eisenchlorid getrennt. Die Chloride werden in Wasser gelöst, filtriert und mit Natriumoxalat-Lösung als Seltenerdoxalat gefällt. Durch Kalzinieren können die Oxalate in Seltenerdoxide umgewandelt werden. Eine Trennung der Seltenerdmetalle erfolgt hierbei nicht, und das Verhältnis von Neodym zu den anderen enthaltenen Seltenerdmetallen entspricht dem der eingesetzten Magnete. Bor wird zu flüchtigem Bortrichlorid umgewandelt, wobei sich die Rückgewinnung aus dem Gasstrom aufgrund der geringen Menge nicht lohnt. Neben metallischen Magnetabfällen kann

auch oxidiertes Magnetschrott (z.B. Schleifschlamm aus der Herstellung von Magnet-Formkörpern) analog verarbeitet werden, wenn die Oxide vor der Chlorierung mit Kohlenstoff reduziert werden. Ebenso können Mischungen aus metallischen und oxidierten Abfällen verarbeitet werden, wenn die Kohlenstoffmenge an den Oxidgehalt angepasst wird.

Der hier betrachtete Prozess basiert auf einem Laborreaktor mit einer Jahreskapazität von 2 kg Altmagneten. Der Reaktor wird hierzu Batchweise betrieben, mit einer Ansatzgröße von 20 g (20 g pro batch, 200 Arbeitstage pro Jahr, 1 Tag Prozessdauer, 1 Reinigung -> 100 \* 20 g pro Jahr = 2 kg). Die angenommenen Ausbeuten, Umsatzraten und erzielten Reinheiten basieren auf den Versuchsergebnissen aus diesem Maßstab. Basierend auf den Erfahrungen der Chlorierung von Eisen zu Eisenchlorid ist eine Skalierung des Chlorierungsschritts auf eine jährliche Kapazität von 500 t plausibel. Die Rückgewinnung der Seltenerdmetalle durch Auflösen/Filtration/Fällen mit Oxalat ist in der Seltenerdgewinnung großtechnisch etabliert. Aufgrund der Löslichkeit des Fällungsmittels Natriumoxalat entstehen beträchtliche Volumenströme (vgl. ca 20 L Lösung pro 2 kg Magnetabfall), weshalb die Anlagenteile für die Rückgewinnung größer sind als diejenigen für die Chlorierung. Ebenso fallen entsprechende Mengen Abwasser an. Technische Lösungen hierfür sind jedoch verfügbar.

### Schmelzflusselektrolyse

Um aus dem  $\text{NdCl}_3$  aus der Carbochlorierung Neodym-Metall herzustellen wurde im Rahmen des Recval-Projekts die Schmelzflusselektrolyse untersucht. Der Prozess kann grob in eine Abfolge von sechs Schritten untergliedert werden: Vorbereitung, Trocknung, Mischen, Trocknung, Elektrolyse und Extraktion. Abbildung 84 illustriert den vereinfachten Prozessablauf.



**Abb. 84: Vereinfachte Prozessabfolge der Schmelzflusselektrolyse.**

Im derzeitigen Versuchsaufbau wird aus Neodymchlorid mittels Elektrolyse Neodym-Metall hergestellt. Die Extraktion eines nutzbaren Produkts (reines Neodym-Metall) war im Rahmen des Projekts nicht erfolgreich (siehe auch AP 5.1). Die Aufgestellte Kostenanalyse bezieht sich deshalb immer auf die theoretische Ausbeute beim verwendeten Einsatz von 4 g  $\text{NdCl}_3$ , die 2,3 g beträgt. Die Prozessdauer beläuft sich auf 47h (2h Vorbereitung, 24h Trocknung, 2h Mischen, 15h Elektrolyse, 4h Extraktion). Die Kosten des Fraunhofer IPA ergeben sich wie folgt:

**Tab. 19: Kostenart und -höhe der Schmelzflussanalyse.**

Kostenart	Kostenhöhe	Erläuterung
Materialkosten	77 €	Annahme: 180 € für 25 g $\text{NdCl}_3$ im Chemikalienhandel, 5 € für $\text{KaCl}$ , 20 € für $\text{LiCl}$ , 400 € je W-Elektrode (20 Versuche) und 150 € Graphit-Elektrode (50 Versuche)
Investitionskosten	142 €	Annahme: 106.000 € Investition, 20 Jahre Nutzungsdauer, 20 % Auslastung, 47 h Beanspruchung durch Prozess
Wartungskosten	226 €	Annahme: 2000 € Wartung, 20 % Auslastung, 47 h Beanspruchung durch Prozess
Personalkosten	6 €	Annahme: 6 h ausgebildeter Laborant – TVÖD EG5
Energiekosten	45 €	Annahme: ca. 150 kWh, 0,3 €/kWh
<b>Gesamtkosten</b>	<b>496 €</b>	zur Herstellung von (theoretisch) 2,3 g Neodym

Die angegebene Kostenübersicht zeigt auf den ersten Blick extreme Kosten bezogen auf die sehr geringe theoretische Ausbeute (204 € pro Gramm Neodym). Allerdings müssen diese Kosten für eine mögliche Hochskalierung differenzierter betrachtet werden.

Besonders auffällig sind die Kosten für die Anlage was Investition und Wartung angeht. Allerdings ist die derzeit verwendete Anlage bereits für einen bis zu Faktor 10 größeren Aufbau geeignet, wodurch die Kosten pro Neodymmenge noch deutlich verringert werden können. Andererseits könnten weitere Investitionskosten für eine Durchführung der Arbeiten in einer vollständig inertem Arbeitsumgebung entstehen. Die Wartungskosten entstanden durch einzelne notwendige Ersatzteile, deren Austausch unter anderem auf die geringe Erfahrung in der Hochtemperatur elektrolyse zurückzuführen ist. In einem dauerhaften Betrieb ist deshalb mit deutlich geringerem Wartungsaufwand zu rechnen. Außerdem gilt auch hier die Einsparung pro Gramm Neodym durch einen größeren Ansatz.

Die Energiekosten werden vor allem durch das Heizen getrieben. Da ein größerer Ofenraum deutlich effizienter beheizt werden kann, steigen die Kosten dafür kaum in einer größeren Anlage. Der Energieverbrauch im Stand der Technik liegt bei 11-13 kWh/kg Nd bei 1050 °C (Vogel und Friedrich, 2015). Auch für die Elektrodenmaterialien Wolfram und Graphit steigen die Kosten nur wenig, da diese Kosten weniger dem Materialpreis als der Verarbeitung (Fräsen, Drehen, Bohren) geschuldet sind. Der angenommene Preis für Neodymchlorid gilt für den Chemikalienhandel und spielt in einem integrierten Prozess keine Rolle, da das Neodymchlorid dann aus dem vorherigen Prozessschritt stammt. Insgesamt ergibt sich noch ein immenses Einsparungspotential durch die Konzeptionierung als kontinuierlichen Prozess mit ständiger Zuführung von Neodymchlorid. Aufheizen und Abkühlen entfallen, außerdem muss nicht wie im Labormaßstab ständig neues Elektrolytsalz verwendet werden.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Besonderheiten beim Upscaling sind geschätzte Kosten ca. 10 € pro Gramm Neodym denkbar. Im Vergleich mit dem gängigen Marktpreis von Neodym (ca. 60 €/kg) ist somit selbst ein Upscaling als nicht wirtschaftlich zu bewerten. Die Vielzahl an Annahmen und Schätzungen lassen jedoch keine endgültige Aussage zu. Das Technology Readiness Level ist derzeit noch zu gering, um einen sinnvollen Vergleich mit Prozessen aus dem Stand der Technik zu führen. Das größte Problem ist derzeit die fehlende Extraktion eines nutzbaren Produkts, die eine Hochskalierung von vorneherein verhindert.

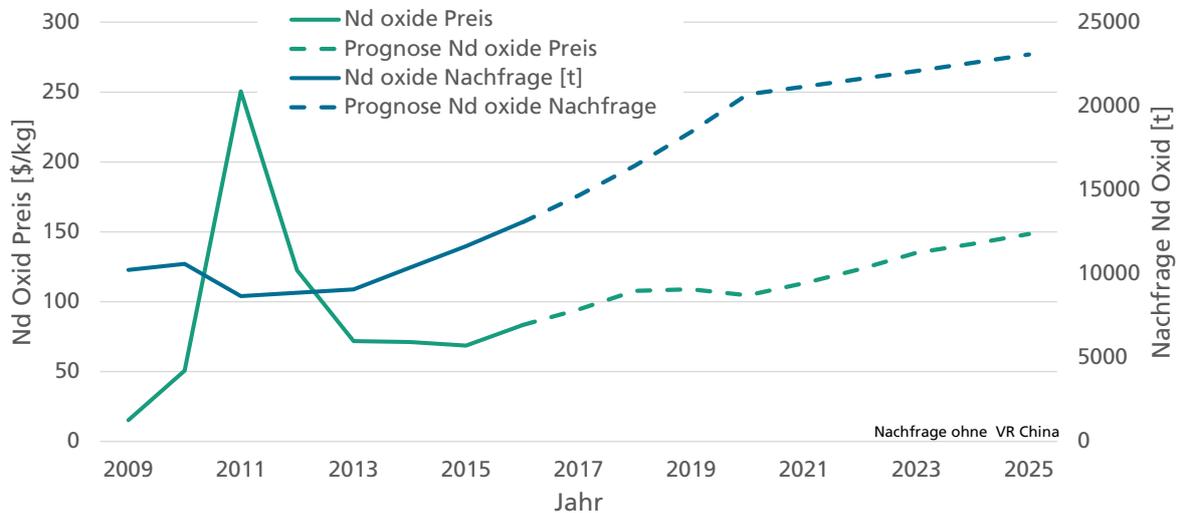
### (3.3) Absatzmarkt

Zur Abschätzung der spezifischen Interaktion einer originären Wertschöpfungstätigkeit im Hinblick auf ihre ökonomische Sinnhaftigkeit ist eine vergleichende Analyse auf dem Absatzmarkt notwendig. Als Vergleichsobjekt dienen hier in der Regel Konkurrenzprodukte. In dem vorliegenden Fall sind dies im Wesentlichen Nd aus der Primärproduktion sowie die entsprechenden Vergleichsprodukte der Quellkategorien, ebenfalls aus Primärproduktion. Ein Prozess ist dann als sinnvoll zu erachten, wenn das Ausgangsprodukt mindestens zu dem gleichen Preis auf dem Markt angeboten werden kann, wie bei einer Primärproduktion. In vielen Fällen ist es sogar sinnvoll deutlich unterhalb des Marktpreises der Primärproduktion zu sein, da dem Kunden oftmals schwer eine gleiche Funktionalität und Lebensdauer von Reuse- oder Recycling-Produkten vermittelt werden kann. Aufgrund der Vielzahl möglicher Produkte aus den unterschiedlichen Quellkategorien wird diese Option allerdings in der vorliegenden Analyse nicht weiter betrachtet.

#### *Nd-Preisprognose*

Der Marktpreis ergibt sich stets aus dem Verhältnis von Angebot und Nachfrage. Im Fall von Neodymoxid lag dieser vor dem Jahr 2009 unter 50 \$/kg. Erst nach 2009 kam es zu einem starken Anstieg des Neodymoxidpreises bis auf 250 \$/kg durch eine erhöhte Nachfrage. Der darauf folgende rapide Preisabfall bis auf 60 \$/kg wird von Experten durch ein erhöhtes Angebot an

Neodymoxid, u.a. durch illegale Produktion in China, erklärt U.S. Geological Survey (USGS, 2014). Die Prognose wird neben der ungewissen Nachfrage zusätzlich durch politische Einflüsse und Unsicherheiten auf der Anbieterseite erschwert. Dennoch gehen Experten von einem kontinuierlichen Anstieg des Neodympreises in den nächsten 15 Jahren aus. (Hykawy, 2014). Abbildung 85 illustriert den Trend.



**Abb. 85: Neodymoxid Preis und Bedarf [nach (Hykawy, 2014)].**

### 2.1.6.2. Ökobilanzierung

(Bearbeitung Fh IWKS)

#### Hintergrund der Studie

Im Projekt RECVAl-HPM soll die Basis geschaffen werden für eine innovative Reuse- und Recycling-Wertschöpfungskette für Hochleistungspermanentmagnete aus Nd-Fe-B.

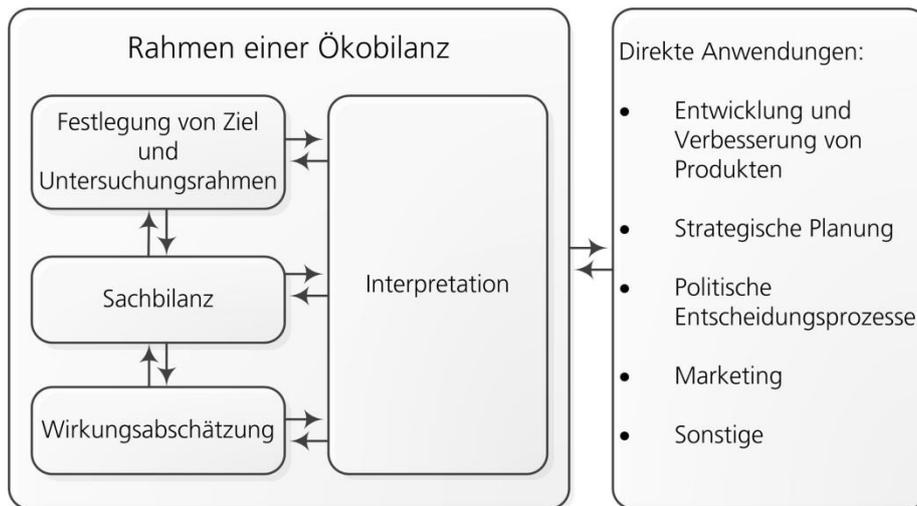
Die im Projekt entwickelten Recyclingtechnologien konzentrieren sich dabei in AP4 auf die Herstellung neuer Magneten, während die Zielsetzung von AP5 die Herstellung von Selten-Erd-Verbindungen ist.

Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) ist eine analytische Methode zur Abschätzung potenzieller Umweltwirkungen von Systemen z.B. Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen. Sie bietet die Möglichkeit Problemverschiebungen, z.B. zwischen verschiedenen Lebensphasen, Wirkungskategorien und Medien (Luft, Wasser, Boden) zu erfassen. Eine Ökobilanz umfasst gemäß DIN EN ISO 14040/44 vier Phasen (siehe Abb. 86) (DIN EN ISO 14040 2009; DIN EN ISO 14044 2006):

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung.

Diese vier Schritte werden nicht einfach nacheinander durchgeführt und abgearbeitet, sondern bilden einen iterativen Prozess. So können z.B. Zwischenergebnisse aus der Sachbilanz- oder Wirkungsabschätzungs-Phase eine Anpassung des Ziels und Untersuchungsrahmens nötig machen.

Die vorliegende Ökobilanz wurde in Anlehnung an die genannten Normen durchgeführt. Eine externe kritische Prüfung hat nicht stattgefunden.



**Abb. 86: Phasen einer Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040:2009.**

### Ziel und Anwendungsbereich der Studie

Die im Rahmen des RECVAl-HPM-Projekts durchgeführten Ökobilanzen sollen die unterschiedlichen Verwertungs- und Recyclingwege für Nd-Fe-B-Altmanete aus verschiedenen Anwendungsbereichen untersuchen. Das Hauptziel dabei war den Projektpartnern aufzuzeigen, an welchen Stellen Optimierungspotenzial im Sinne der ökologischen Auswirkungen besteht und was die Stellschrauben sein könnten (Hot-spot-Analyse). Zielgruppe der Studie sind damit alle Projektpartner, die an der Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Verwertung und Wiederverwendung von Nd-Fe-B-basierten Altmaneten arbeiten. Ein Vergleich der Umweltwirkungen der verschiedenen Recyclingprozesse war ausdrücklich nicht Ziel dieser Studie. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionen und Systemrahmen der Prozessketten sowie des frühen Entwicklungsstands ist ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Prozessketten nicht möglich. Auch ein Vergleich der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Recyclingprozesse mit bereits etablierten und großtechnisch umgesetzten Prozessen der Primärgewinnung und -produktion wurde aufgrund der niedrigen Technology Readiness Levels als nicht zielführend erachtet.

### Untersuchungsrahmen

#### *Funktionelle Einheit*

Im Projekt RECVAl-HPM geht es um die Entwicklung von Reuse- und Recyclingkonzepten für Altmaneten auf Basis von Nd-Fe-B aus verschiedenen Anwendungsbereichen, um eine möglichst geschlossene Wertschöpfungskette für Hochleistungspermanente Magnete zu schaffen. Die im Projekt entwickelten Recyclingtechnologien konzentrieren sich dabei in AP 4 auf die Herstellung neuer Magnete, während die Zielsetzung von AP 5 auf der Rückgewinnung von SE-Verbindungen liegt. Dabei unterschieden sich sowohl die Ausgangsmaterialien als auch die Produkte der verschiedenen Prozessketten. Deshalb konnte keine allgemein gültige funktionelle Einheit definiert werden. Die funktionellen Einheiten, auf die sich die Umweltwirkungen der einzelnen Prozesse beziehen, wurden deshalb individuell festgelegt. Die Definitionen der funktionellen Einheiten und der Referenzflüsse finden sich in den Abschnitten zu den einzelnen Prozessketten.

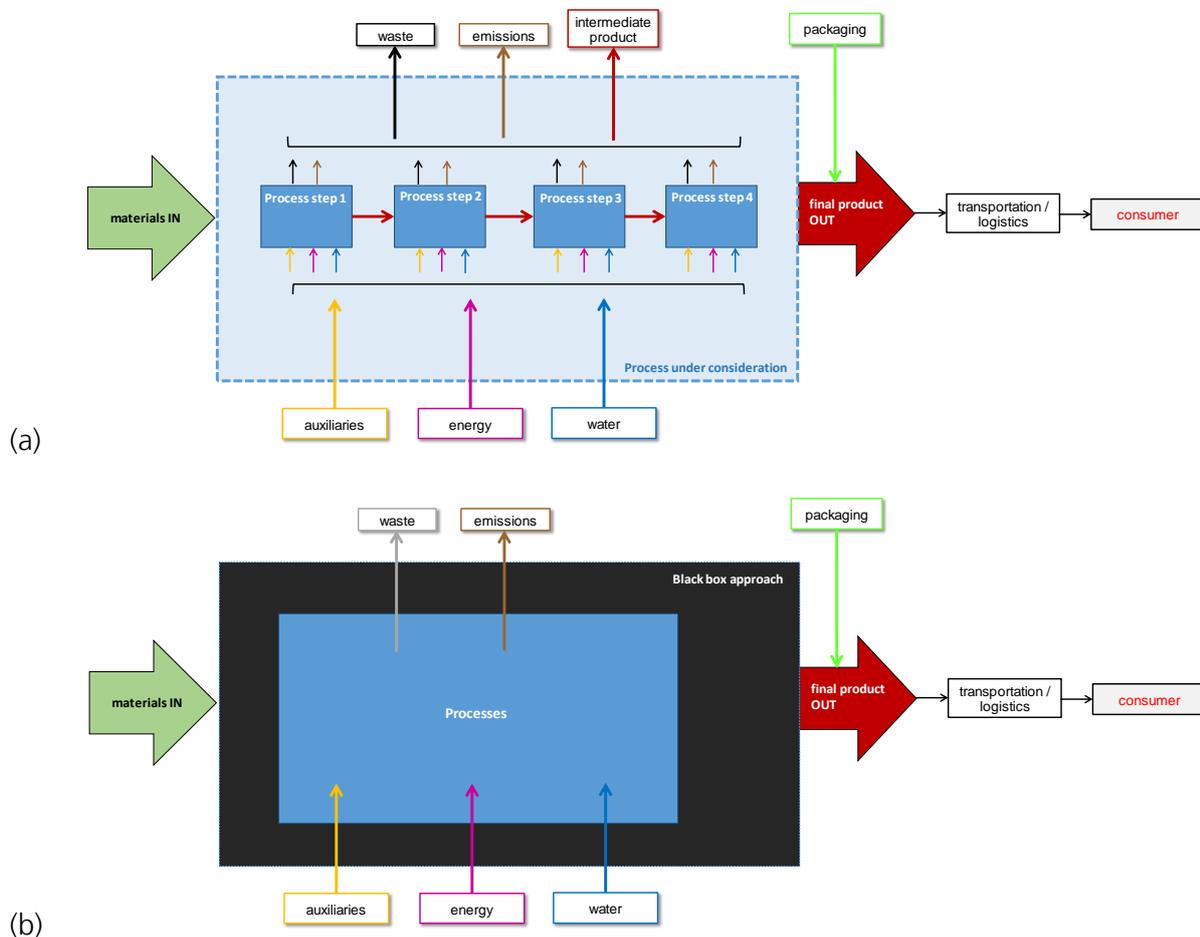
#### *Datenerhebung und Datenqualität*

Die Datenerhebung erfolgte mithilfe eines standardisierten Fragebogens, der an die Partner verteilt wurde. Grundlage dafür war das in Abb. 87a dargestellte schematische Prozessdiagramm. Für den Fall, dass Partner aus Geheimhaltungsgründen keine detaillierten Prozessdaten für einzelne Schritte weitergeben konnten, bestand die Möglichkeit der Betrachtung des Gesamt-

prozesses als Black Box (siehe Abb. 87b). Von dieser Möglichkeit wurde allerdings kein Gebrauch gemacht, was für alle Fallbeispiele eine große Transparenz ermöglichte.

Zur Erstellung der Sachbilanz wurden die Partner aufgefordert, alle Material- und Energieflüsse (inkl. Energieträger) aufzulisten und die jeweiligen Mengen für ihre Versuche anzugeben. Darüber hinaus sollten auch die typischen Entsorgungs- bzw. Verwertungswege für Abfälle angegeben werden. Die zur Erstellung der Ökobilanzen genutzten erhobenen und generischen bzw. modifizierten Datensätze sind im Anhang aufgeführt.

Bei Unsicherheit der Daten wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss der Datenunsicherheiten auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung beurteilen zu können.



**Abb. 87: Schematisches Flussdiagramm eines Gesamtprozesses (a) in einzelnen Prozessschritten und (b) als Black Box.**

Die Sachbilanzdaten für die Hintergrundsysteme, z.B. Vorketten zur Produktion bestimmter Edukte, stammen ausschließlich aus der Datenbank ecoinvent v3.1. Informationen zu den generischen Datensätzen sind der Dokumentation der ecoinvent-Datenbank zu entnehmen (ecoinvent-Datenbank, 2017; Wernet et al., 2016).

Die technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität der vorliegenden Studie ist im Folgenden aufgeführt.

- Technologische Repräsentativität: Die Sachbilanzdaten der Partner beziehen sich auf den jeweiligen aktuellen Stand der Forschung, d.h. im Allgemeinen werden die Gesamtprozesse im Labormaßstab, z.T. auch in größerem Maßstab, durchgeführt. Abschätzungen zu einer Aufskalierung, also einer großtechnischen Umsetzung, wurden nicht getroffen. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der Ergebnisse mit bestehenden Prozessen, z.B. der Primärproduktion von Permanentmagneten, nicht möglich.
- Geographische Repräsentativität: Die Vordergrunddaten der Partner beziehen sich auf ihre jeweiligen Standorte in Deutschland. Für die Hintergrunddaten aus derecoinvent-Datenbank wurden so weit möglich Daten mit geographischem Bezug auf Deutschland oder Europa gewählt. Waren keine deutschen Datensätze vorhanden wurde als Näherung auf europäische oder globale Datensätze zurückgegriffen.
- Zeitliche Repräsentativität: Die Daten der Vordergrundprozesse sind jeweils repräsentativ für das Jahr 2017. Die für das Hintergrundsystem gewählten Datensätze aus der Datenbankecoinvent v3.1 beziehen sich allerdings auf frühere Zeiträume. Weitere Informationen hierzu sind der Dokumentation derecoinvent-Datenbank zu entnehmen.

### *Systemgrenzen*

Die Systemgrenzen eines Gesamtprozesses sind schematisch in Abb. 87 dargestellt. Bei der Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse der bilanzierten Prozesse werden die betrachteten Prozessschritte jeweils kurz vorgestellt (s. folgendes Kapitel). Da zu dem Zeitpunkt der Datenerhebung und in der Folgezeit nicht in allen Fällen der vollständige Gesamtprozess mit den anvisierten Produkten technisch realisiert werden konnte, wurden in diesen Fällen nur Teilprozesse bilanziert. Dies wurde in den schematischen individuellen Prozessflussdiagrammen kenntlich gemacht. Auch im Text wurde an gegebener Stelle darauf hingewiesen.

Bei der Modellierung der betrachteten Prozesse fließen Altmagnete bzw. die Anwendungen, aus denen sie stammen (Generatoren und Elektromotoren), lastenfrei ein. Gutschriften für die Recyclingprodukte (auch Nebenprodukte) wurden ebenfalls nicht bilanziert. Es wurden also nur die negativen Umweltwirkungen bilanziert, die durch die Prozessketten selbst entstehen. Hierdurch waren keine Allokationen im Vordergrundsystem notwendig. Alle Ergebnisse gelten nur für diesen Modellierungsansatz. Informationen zu Allokationen in den Datensätzen, die zur Modellierung des Hintergrundsystems verwendet wurde, sind der Dokumentation der Datenbankecoinvent v3.1 zu entnehmen. Als Systemmodell für die Hintergrunddaten wurde „cut-off“ gewählt.

### *Berücksichtigte Wirkungskategorien*

Die im Projekt untersuchten und entwickelten Re-Phasen der Altmagnetverwertung können unterschiedliche Umweltwirkungen bedingen. Diese werden in Wirkungskategorien unterteilt und in der Wirkungsabschätzung erfasst. Es wird analysiert, zu welchen Wirkungskategorien die erfassten Stoff- und Energieströme beitragen (Klassifizierung) und in welchem Umfang dies geschieht (Charakterisierung). Letzteres kann entweder auf dem Level der Schutzbereiche natürlicher Ökosysteme, menschlicher Gesundheit oder Ressourcen am Wirkungsendpunkt, d.h. schadensorientiert am Endpunkt (Endpoint), oder bereits früher in der Wirkungskette (Midpoint) erfolgen. In dieser Studie wurde die Wirkungsabschätzung aller betrachteten Prozesse am Midpoint-Level durchgeführt. Auf die optionalen Elemente einer Wirkungsabschätzung (Normierung, Ordnung oder Gewichtung) wurde in der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Die Charakterisierungsfaktoren oder Indikatoren sind in Wirkungsabschätzungsmethoden zusammengefasst. In der vorliegenden Studie wurde die Methode ReCiPe Midpoint (H) w/o LT (Goedkoop et al., 2013) verwendet und folgende Wirkungskategorien betrachtet:

- Klimawandel
- Ozonabbau
- Photochemische Oxidantienbildung
- Versauerung, terrestrisch
- Eutrophierung, Frischwasser und Meerwasser
- Ressourcenverbrauch, Metalle, fossile Ressourcen, Wasser

Diese Wirkungskategorien werden im Folgenden kurz erläutert.

#### *Globale Erwärmung, auch Klimawandel oder anthropogener Treibhauseffekt genannt*

Das Treibhauspotenzial ist ein Maß für den Einfluss, den atmosphärische Gase auf den Treibhauseffekt haben. Die Referenzeinheit bezieht sich auf Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und gibt an, welche Menge CO<sub>2</sub> den gleichen Treibhauseffekt hätte wie die betrachtete Menge eines bestimmten Gases (Klöpper und Grahl, 2009).

Treibhausgase lassen etwa 70 % der kurzwelligen Sonnenstrahlung passieren, absorbieren jedoch einen Teil der von der Erdoberfläche abgestrahlten langwelligen Wärmestrahlung. Dies führt zu einer Erwärmung der Atmosphäre. Der natürliche Treibhauseffekt ist wichtig für das Leben auf unserem Planeten, da er eine durchschnittliche Lufttemperatur auf der Erdoberfläche von +15 °C bedingt, die ohne ihn bei lediglich -18 °C läge.

Der durch menschlichen Einfluss verursachte oder anthropogene Treibhauseffekt entsteht durch emissionsbedingt erhöhte Konzentrationen bestimmter Spurengase (Treibhausgase) in der Atmosphäre (Herrmann 2010). Der Primäreffekt in dieser Wirkungskategorie ist die erhöhte Absorption von Infrarotstrahlung mit Wellenlängen von 10-15 µm in der Atmosphäre. Als Sekundäreffekt wird die dadurch steigende Temperatur in der Troposphäre bezeichnet. Tertiäreffekte sind bspw. das Schmelzen der Polarkappen, steigende Meeresspiegel, Klimainstabilitäten, Veränderungen in Ökosystemen und Epidemien. Die wichtigsten Treibhausgase sind Kohlendioxid, Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), Ozon (O<sub>3</sub>) und bestimmte synthetische persistente Chemikalien (Klöpper und Grahl, 2009).

#### *Ozonabbau*

Die Wirkungskategorie Ozonabbau (engl.: ozone depletion potential, ODP) beschreibt das Potenzial eines Systems, zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht beizutragen (Klöpper und Grahl 2009). Die Referenzsubstanz der ReCiPe-Methode bezieht sich auf das FCKW Trichlorfluormethan (CFC-11) (Goedkoop et al. 2013) und gibt an, welche Menge an CFC-11 den gleichen schädlichen Charakter hätte wie die betrachtete Substanz.

Ursache für Ozonabbau ist das Aufsteigen der natürlichen und anthropogenen Spurengase aus der Troposphäre in die Stratosphäre, wo sie in Radikale umgewandelt werden und als Katalysatoren zum Abbau des stratosphärischen Ozons beitragen (Herrmann 2010). Da Ozonmoleküle in der Stratosphäre Solarstrahlung mit Wellenlängen < 290 nm absorbieren, ist der Primäreffekt des Ozonabbaus ein erhöhter Anteil der solaren UV-Strahlung, der die Erdoberfläche erreicht. Solare UV-Strahlung kann direkte Effekte auf die menschliche Gesundheit haben, wie z.B. Schädigung der Augen, Alterung der Haut, Sonnenbrand, Hautkrebs und eine Schwächung des Immunsystems. Auch Ökosysteme können durch erhöhte UV-Exposition geschädigt werden. So kann die Wachstumsrate und die chemische Zusammensetzung von Pflanzen beeinflusst werden, was die Attraktivität der Blätter für herbivore Organismen senken kann.

UV-Strahlung wirkt sich weiterhin auf die Atmosphärenchemie aus, was die Biosphäre und das Klima des gesamten Planeten beeinflusst. Die starken Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Ozonabbau sind weitgehend unerforscht (UNEP, 2017). Die

wichtigsten Substanzen bezüglich des stratosphärischen Ozonabbaus sind neben Trichlorfluormethan (CFC-11 bzw. R-11) auch Dichlordifluormethan (CFC-12 bzw. R-12), 1,1,2-Trichlor-1,2,2-trifluorethan (R-113) und chlorierte Lösungsmittel (Klöpffer und Grahl, 2009).

#### *Photochemische Oxidantienbildung*

Die Bildung photochemischer Oxidantien, auch Sommersmog genannt, beschreibt das Potential zur Bildung bodennahem Ozons (Herrmann, 2010). Referenzsubstanzen für das POCP sind Ethen ( $C_2H_4$ ) (Herrmann 2010), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (Goedkoop et al., 2013) und Stickoxide ( $NO_x$ ) (Curran, 2008). Letztere sind allerdings nicht unbedingt sinnvoll, da die Bildung von Ozon stark von dem Verhältnis von NO und  $NO_2$  abhängt.

Troposphärisches Ozon wird durch die Kombination aus primären und sekundären Schadstoffen wie  $NO_x$ , Kohlenmonoxid (CO) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und bestimmten meteorologischen Bedingungen wie hohen Lufttemperaturen, hoher Sonneneinstrahlung und hohem Atmosphärendruck gebildet. Windstille verhindert zusätzlich die Verdünnung von Ozon und andern Schadstoffen (Aidaoui et al., 2015). Ozon kann zu Entzündungen der Atemwege sowie zur Schädigung der Lunge führen und kann in erhöhten Konzentrationen Asthma und chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen zur Folge haben (Goedkoop et al., 2013).

Photochemische Luftverschmutzung hat negative Auswirkungen auf Ökosysteme, z.B. die Schädigung von Blatt- und Nadeloberflächen (Herrmann, 2010), und kann zu Ernteschäden führen (Aidaoui et al., 2015).

#### *Versauerung*

Das Versauerungspotenzial definiert das Potenzial, den pH-Wert von Böden und Gewässern durch den Eintrag von Säuren zu senken. Die Referenzsubstanz bezieht sich auf Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) und gibt an, welche Menge  $SO_2$  die gleiche Versauerung verursachen würde wie die betrachtete Substanz (Klöpffer und Grahl, 2009).

Säuren oder säurebildende Gase wie  $SO_2$ , Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) oder Salpetersäure ( $HNO_3$ ) gelangen als anthropogene Emissionen in die Atmosphäre und werden durch Niederschläge in Böden und Gewässer eingetragen (Herrmann, 2010). Terrestrische Versauerung kann zur Entwaldung („Waldsterben“) führen. Als Folge der Versauerung können auch bestimmte Nährstoffe (z.B.  $K^+$  und  $Na^+$ ) und Schwermetalle mobilisiert werden und das Grundwasser belasten. So können sich  $Al^{3+}$ -Ionen, die für aquatische Organismen hochgiftig sind, in sauren Milieus von Alumosilicaten lösen.

#### *Eutrophierung*

Die Eutrophierung oder Nährstoffanreicherung beschreibt ein Überangebot an Nährstoffen in einem Ökosystem. Das Eutrophierungspotenzial ist oft in terrestrische und aquatische Eutrophierung gegliedert, da terrestrische Ökosysteme eher mit Nährstoffen aus der Luft belastet werden, während der Nährstoffeintrag in aquatische Ökosysteme eher über das Medium Wasser geschieht (Herrmann 2010). Die Referenzsubstanz bezieht sich normalerweise auf Phosphat ( $PO_4$ ) oder Phosphor (P), da das Element Phosphor neben Stickstoffverbindungen den Hauptbeitrag zur Eutrophierung leistet.

Die Primäreffekte der Eutrophierung sind die vermehrte Bildung von Biomasse und erhöhter Sauerstoffverbrauch durch bakterielle Abbauprozesse. Dies kann zu einer radikalen Änderung des Charakters und des Spezienspektrums eines Gewässers führen. In Seen können sich anoxische Zonen und in Extremfällen anaerobe Ökosysteme bilden („Umkippen“ eines Gewässers) (Klöpffer und Grahl, 2009).

### Ressourcenverbrauch

Der mineralische Ressourcenverbrauch beschreibt den Verbrauch an knappen mineralischen Ressourcen, z.B. Metallen. Der Endpoint-Effekt dieser Kategorie ist eine reduzierte Menge an Ressourcen, die zukünftigen Generationen zur Verfügung steht. Das Referenzmaterial der ReCiPe-Methode ist Eisen (Goedkoop et al., 2013). Es herrscht noch kein Konsens über die Charakterisierungsfaktoren (Curran, 2008).

Der fossile Ressourcenverbrauch beschreibt den Verbrauch an fossilen auf Kohlenwasserstoffen basierten festen (z.B. Kohle), flüssigen (z.B. Erdöl) und gasförmigen (z.B. Erdgas) Ressourcen. Die Referenzsubstanz der ReCiPe-Methode ist Erdöl (Goedkoop et al., 2013). Der Wasserverbrauch beschreibt entsprechend den Verbrauch an Wasser.

### Auswertung

Die Auswertung erfolgt anhand der in DIN EN ISO 14040/44 genannten Komponenten:

- Identifizierung der signifikanten Parameter anhand der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung
- Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen
- Einschränkungen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

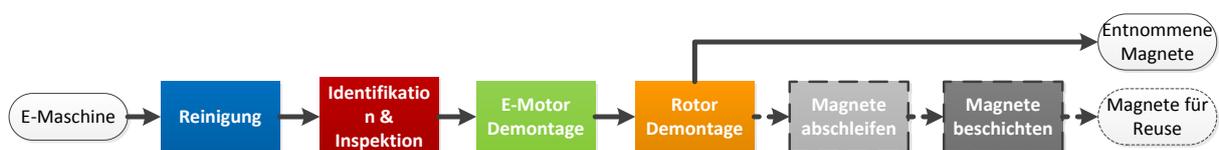
### Ökobilanzen der RECVAL-HPM-Prozesse: Ergebnisse und Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der im Rahmen des RECVAL-HPM-Projekts erarbeiteten Ökobilanzen vorgestellt und diskutiert.

Dismantling and Reuse (AP 2.2)
Partner: Bosch

Wenn es um Nachnutzungsoptionen von End-of-Life(EoL)-Produkten geht, ist nicht nur das Recycling relevant, sondern auch die Vorbereitung bzw. Aufarbeitung von einzelnen Komponenten oder ganzen Geräten / Anwendungen für eine Wiederverwendung oder Reuse. Diesen Ansatz verfolgte der Projektpartner Bosch in Arbeitspaket 2.2 mit der Demontage von E-Motoren zur Extraktion der darin enthaltenen Magnete. Um diese Magnete für Reuse-Zwecke zu verwenden, ist eine Prozesskette aus sechs Schritten erforderlich. Davon wurden die ersten vier Prozessschritte modelliert, da nur diese im Rahmen des AP2.2 durchgeführt wurden (siehe Abb. 88): Im ersten Prozessschritt ging es um die Reinigung des E-Motors mittels einer Schneestrahlanlage. Daran schlossen sich elektrische Tests an mithilfe derer der E-Motor zunächst identifiziert und dann auf Funktionsfähigkeit geprüft wurde (Prozess 2). In Prozessschritt 3 ging es um die Demontage des E-Motors, bei der der Rotor aus dem Stator herausgepresst wurde, so dass Gehäuse und Rotor separat vorlagen. Um die enthaltenen Magnete zu entnehmen, musste der Rotor weiter demontiert werden (Prozess 4). Zunächst wurde er in einem Durchlaufofen erhitzt. Nach dem Abkühlen wurde ein Teil der Wuchtscheibe auf einer Drehbank abgedreht, bevor die Magnete mithilfe einer Handpresse herausgepresst wurden. Die funktionelle Einheit wurde daher als die Entnahme von 1 kg Magneten aus EoL-E-Motoren gewählt. Der Referenzfluss ist 1 kg entnommene Magnete.

Vor der Wiederverwendung müssten die Magnete zur Entfernung von Kleberesten abgeschliffen und mit einer Korrosionsschutzschicht neu beschichtet werden.



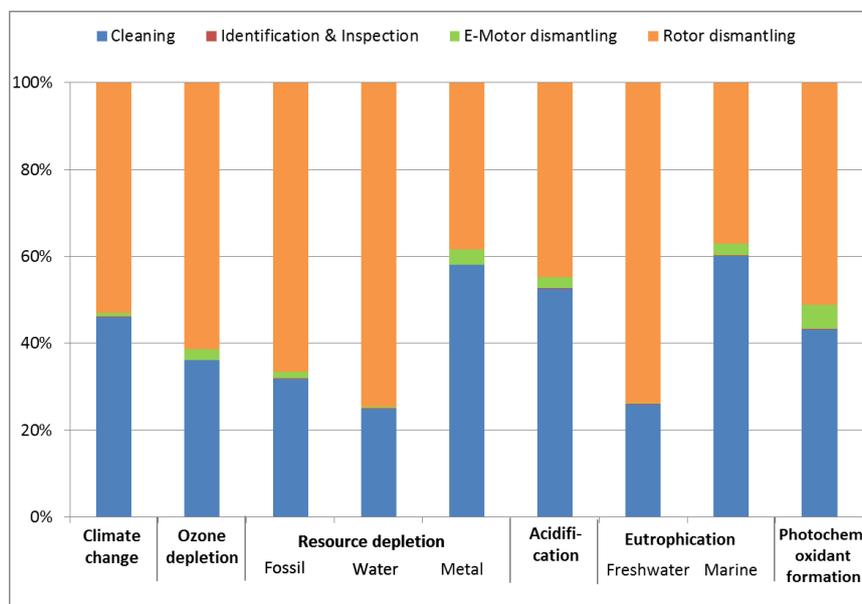
**Abb. 88: Schematisches Prozessschema Dismantling and Reuse.**

Die Aufstellung der Sachbilanz und der verwendeten generischen Prozesse aus der ecoinvent-Datenbank ist im Anhang in Tab. 20 aufgeführt. Die Vordergrunddaten wurden bei Bosch erhoben. Da für die Schneestrahlanlage aus Prozessschritt 1 und den assoziierten Trockeneis- und Druckluftbedarf keine experimentell ermittelten Werte zur Verfügung standen, wurde die Ökobilanzierung anhand verschiedener Szenarien durchgeführt, die sich an den im Datenblatt angegebenen Kennzahlen des Geräts orientieren:

- oberes Limit: maximale Menge Druckluft und Trockeneis (12 m<sup>3</sup>/min und 120 kg/h)
- mittlere Abschätzung 1: mittlere Menge Druckluft und Trockeneis (7 m<sup>3</sup>/min und 75 kg/h)
- unteres Limit: minimale Menge Druckluft und Trockeneis (2 m<sup>3</sup>/min und 30 kg/h)

Als Referenzprozess diente das Szenario „oberes Limit“, das die maximal möglichen Umweltauswirkungen widerspiegelt.

Die Modellierung des Dismantling and Reuse-Prozesses anhand der Sachbilanz liefert die in Abb. 89 gezeigten Beiträge der Einzelprozesse zu den untersuchten Wirkungskategorien. Für diese Prozesskette tragen lediglich Prozess 1, die Reinigung des E-Motors mit der Schneestrahlanlage, und Prozess 4, die Demontage des Rotors, maßgeblich bei. Die Demontage des E-Motors spielt in allen Wirkungskategorien eine deutlich untergeordnete bis gar keine Rolle.

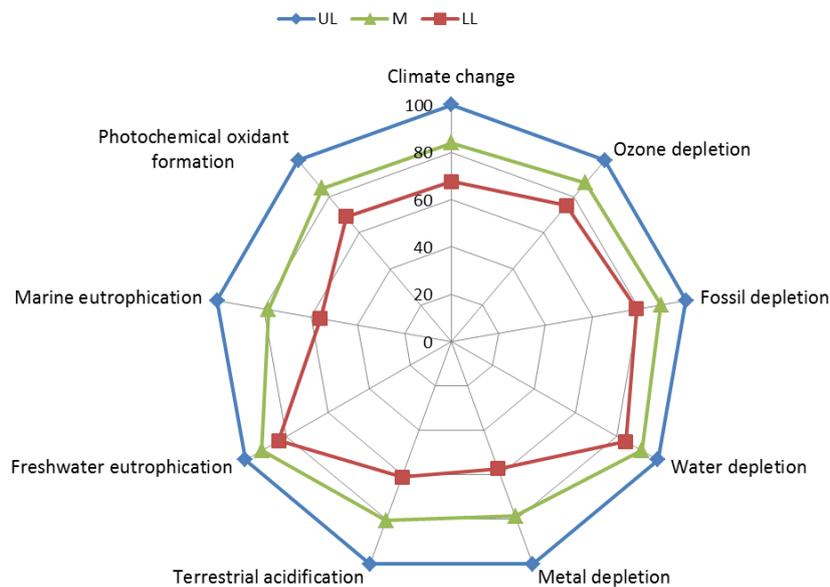


**Abb. 89: Beiträge der vier Prozessschritte des *Dismantling and Reuse*-Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien für das Szenario „oberes Limit“.**

Hauptinflussfaktoren für diese Ergebnisse sind der Energiebedarf insbesondere der Bedarf für Strom und für den Reinigungsprozess in geringem Umfang auch für Heizung. In die Kategorie Klimawandel gehen neben aus der Stromproduktion resultierenden Beiträgen auch direkte Emissionen von Methan ein, die bei der CO<sub>2</sub>-Produktion (in der Vorkette der Schneestrahlanlage) anfallen. Aufgrund des gegenüber Kohlendioxid 23-fachen Klimapotentials von Methan spielt dieses eine größere Rolle. Für den Beitrag des Reinigungsprozesses zur Wirkungskategorie tragen zusätzlich auch die direkten Emissionen des Kohlendioxids selbst bei, das während des Reinigungsvorgangs in die Luft entweicht.

Der Einfluss der für den Prozessschritt 1 gewählten Szenarien auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse geprüft (siehe Abb. 90). Je nach Wirkungskategorie verringern sich die Umweltauswirkungen um 16 % bis 44 % im Vergleich zum Referenzprozess. Die genaue Kenntnis des tatsächlichen Verbrauchs an Druckluft und Trockeneis während des Reinigungsprozesses ist demnach für einige Wirkungskategorien (z.B. Versauerung,

Ressourcenverbrauch Metalle oder marine Eutrophierung) relevanter als für andere (z.B. Ressourcenverbrauch Wasser oder Eutrophierung von Frischwasser).



**Abb. 90: Einfluss der für Prozessschritt 1 definierten drei Szenarien auf die betrachteten Wirkungskategorien: UL upper limit – oberes Limit, M medium approximation – mittlere Abschätzung, LL lower limit – unteres Limit. Als Referenzprozess wurde das Szenario „oberes Limit“ gewählt.**

dHDDR-Prozess (AP 4.3)
Partner: Fraunhofer IWKS

Die bei der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS im Arbeitspaket 4.3 verfolgte und entwickelte dHDDR-Prozesskette unterteilt sich gemäß Abb. 91 in vier Prozessschritte. Als Ausgangsmaterial dienen Altmagnete aus Elektromotoren, die bereits demontiert vorlagen. Herzstücke des Gesamtprozesses sind der HD-Prozess und der dHDDR-Prozess, die beide auf der Interaktion der Altmagnete mit Wasserstoff beruhen. Um den Angriff durch Wasserstoff zu ermöglichen ist als erster Schritt ein Abtrag der Beschichtung und eventuell korrodierter Bereiche durch Sandstrahlen nötig, (Prozess 1). Danach schließt sich die Wasserstoffversprödung an (Prozess 2): Durch Absorption von Wasserstoff wird das Material hydriert. Dies geschieht zunächst in der Nd-reichen Zwischenkornphase, was mit einer Volumenzunahme verbunden ist. Durch die erzeugten mechanischen Spannungen wird der Magnet pulverisiert und es entstehen einkristalline Partikel. Dieses Pulver wird einer weiteren Wasserstoffbehandlung unterzogen, dem dHDDR-Prozess (Prozess 3). Durch reversible wasserstoffinduzierte Phasenumwandlung werden die einkristallinen  $Nd_2Fe_{14}B_1$ -Pulverpartikel in polykristalline, anisotrope Pulverpartikel umgewandelt. In einem letzten Schritt werden diese in einen geeigneten Kunststoff eingebettet, gepresst und im Magnetfeld ausgerichtet (Prozess 4). Das Resultat ist ein kunststoffgebundener anisotroper Sekundärmagnet.

Als funktionelle Einheit wurde die Produktion von 1 kg kunststoffgebundener Sekundärmagneten aus Altmagneten gewählt. Der Referenzfluss ist 1 kg Sekundärmagnet.

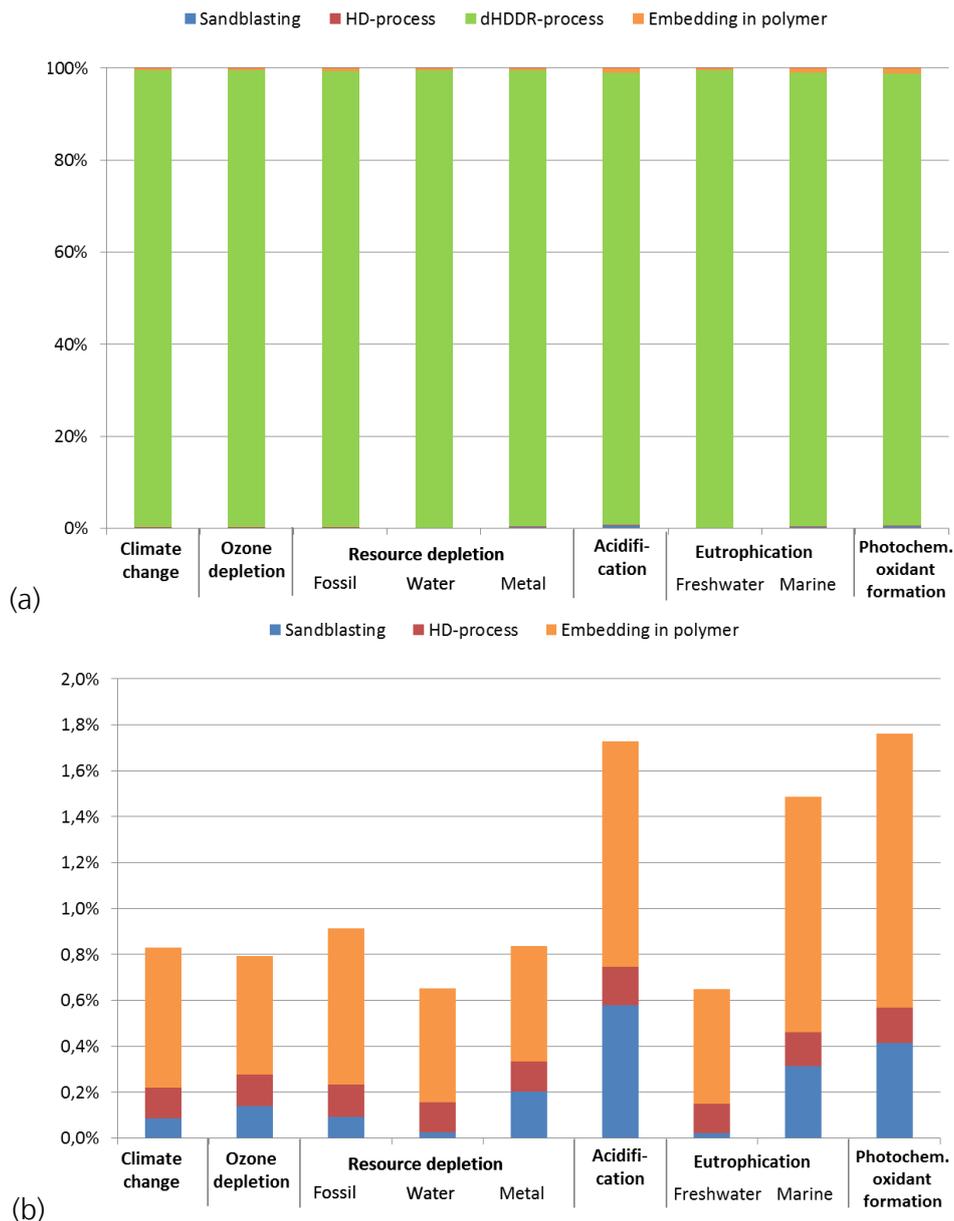


**Abb. 91: Schematisches Prozessschema *dHDDR*.**

Die Aufstellung der Sachbilanz und der verwendeten generischen Prozesse aus der ecoinvent-Datenbank ist im Anhang in Tab. 21 aufgeführt. Für die Prozesse wurden darüber hinaus folgende Annahmen getroffen:

- Ofenleistung der *dHDDR*-Anlage: Die maximale Leistungsaufnahme des Ofens ist durch einen Trafos auf 2 kW begrenzt. Die tatsächliche Leistungsaufnahme im Betrieb liegt darunter und kann nur gemessen werden. Für die Modellierung wird zunächst die maximale Leistung als oberer Grenzwert angesetzt und abweichende Werte in einer Sensitivitätsanalyse untersucht.
- Das im realen Versuch verwendete Temperaturprofil des HDDR-Ofens, das für die Versuchsdurchführung gewählt wurde, bleibt in der vorliegenden Analyse unberücksichtigt.

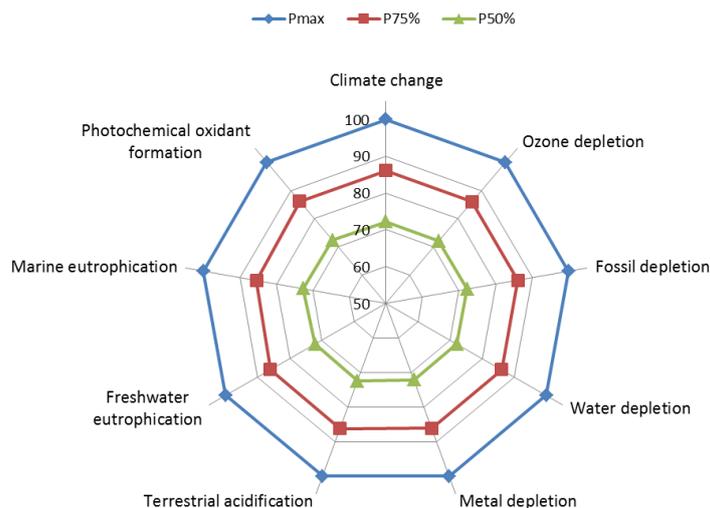
Die Modellierung des HDDR-Prozesses anhand der Sachbilanz liefert die in Abb. 92a gezeigten relativen Beiträge der Einzelprozesse zu den untersuchten Wirkungskategorien. Es ist klar ersichtlich, dass der HDDR-Prozess in allen Wirkungskategorien den weitaus größten Beitrag liefert, zwischen 98 und 100 %. Die drei anderen Einzelprozesse tragen dem gegenüber weniger als 2,0 % bei (vgl. Abb. 92).



**Abb. 92: (a) Beiträge der vier Prozessschritte des dHDDR-Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien. (b) Ausschnitt, bei dem nur die Einzelprozesse Sandstrahlen, HD-Prozess und Einbetten in Kunststoff dargestellt sind.**

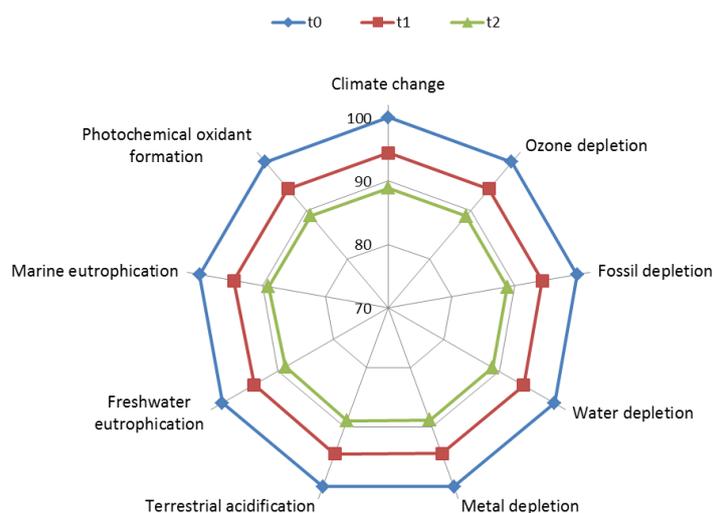
Haupteinflussfaktor für dieses Ergebnis ist der Betrieb des Ofens im dHDDR-Prozessschritt und der hierfür benötigte Strom. Für eine relativ lange Dauer von 5 h müssen hohe Temperaturen von 800 - 900 °C eingestellt werden, um die wasserstoffinduzierte Phasenumwandlung des Magnetpulvers zu ermöglichen. Die Stromproduktion ist demnach verantwortlich für die Hauptbeiträge in allen betrachteten Wirkungskategorien.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die maximal angesetzte Ofenleistung an Bedeutung, weswegen ihr Einfluss auf die Ergebnisse in einer Sensitivitätsanalyse untersucht wurde. Zu diesem Zweck wurde sie auf 75% bzw. 50 % der Maximalleistung verringert. Da es eine gemeinsame Ursache für die Umweltwirkungen in allen Wirkungskategorien gibt, verringern sich alle Umweltwirkungen gleichmäßig um 14,0 % bzw. 27,7 % (siehe Abb. 93).



**Abb. 93: Einfluss der Ofenleistung im Prozessschritt 3 (dHDDR) auf die Wirkungskategorien. Für diese Abschätzung wurde eine Verweildauer im Ofen von 5 h angesetzt.**

Ähnliche Effekte ergeben sich, wenn die Gesamtdauer des HDDR-Ofenprozesses (oder auch die Prozesstemperatur) reduziert wird. Vor dem Hintergrund der Verringerung von Umweltwirkungen ist es sinnvoll, in Prozessschritt 3 die Verweildauer der Proben im Ofen zu verringern. Dies kann allerdings nur in einem Rahmen durchgeführt werden, der die final resultierenden magnetischen Eigenschaften der Sekundärmagnete nicht zu stark negativ beeinflusst. Um einen Eindruck zu erhalten, wie sich eine Verringerung der Zeit im HDDR-Ofen auswirkt, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (vgl. Abb. 94). Eine Reduktion der Verweildauer um 30 min bedingt eine gleichmäßige Abnahme (da gleiche Ursache) der Umweltwirkungen von 5,6 % in allen Wirkungskategorien. Verbleiben die Proben statt 5 h nur 4 h im Ofen sind es entsprechend 11,1 %.



**Abb. 94: Einfluss der Zeit im Prozessschritt 3 (dHDDR) auf die Wirkungskategorien;  $t_0 = 5$  h,  $t_1 = 4,5$  h und  $t_2 = 4$  h. Für diese Abschätzung wurde die maximale Ofenleistung angesetzt.**

Die Prozesskette der Schmelzflusselektrolyse wurde im Arbeitspaket 5.1 vom Projektpartner Fraunhofer IPA entwickelt. Als Ausgangsmaterial dient Neodymchlorid ( $\text{NdCl}_3$ ). Im ersten Schritt, der Präparation des Elektrolyten, findet eine Mischung mit Kaliumchlorid ( $\text{KCl}$ ) und Lithiumchlorid ( $\text{LiCl}$ ) statt. Dem Elektrolyten wird das  $\text{NdCl}_3$  zugegeben und die Salzmischung der Schmelzflusselektrolyse zugeführt. Der Elektrolyt wird anschließend unter Zufuhr von Wärme getrocknet. Der getrocknete Elektrolyt wird der Schmelzflusselektrolyse zugeführt. In diesem Prozessschritt wird metallisches Neodym erzeugt, welches teilweise nicht an der Kathode haftet und deshalb stark mit Elektrolytrückständen verunreinigt ist. Eine Rückgewinnung des metallischen Neodyms in einem abschließenden Prozessschritt war zum Zeitpunkt der Datensammlung noch nicht erfolgt, weshalb eine Modellierung und Auswertung dieses Prozessschrittes im Rahmen dieser Ökobilanz nicht möglich war. Das Produkt ist daher das verunreinigte metallische Neodym. Die Prozesskette ist in Abb. 95 dargestellt.

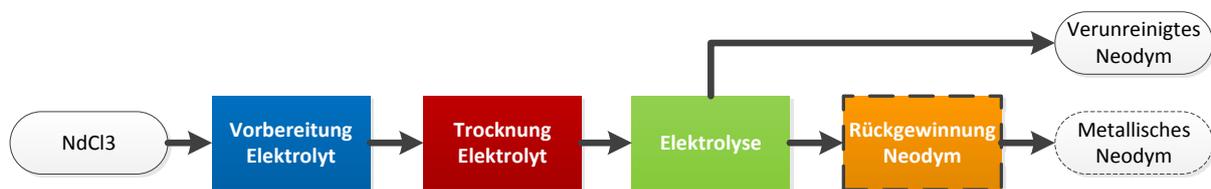


Abb. 95: Schematisches Prozessschema *Schmelzflusselektrolyse*.

Aufgrund der unvollständigen Prozesskette wurde die funktionelle Einheit als Gewinnung von 1 kg metallischem Neodym aus Neodymchlorid definiert, in verunreinigtem Zustand. Der Referenzfluss ist 1 kg nicht-reines Neodym. Alle angegebenen Umweltwirkungen beziehen sich auf die funktionelle Einheit.

Die Sachbilanz einschließlich der für die Material- und Energieströme verwendeten ecoinvent v3.1-Datensätze ist im Anhang in Tab. 22 aufgeführt. Die Vordergrunddaten stammen direkt vom Projektpartner Fraunhofer IPA.

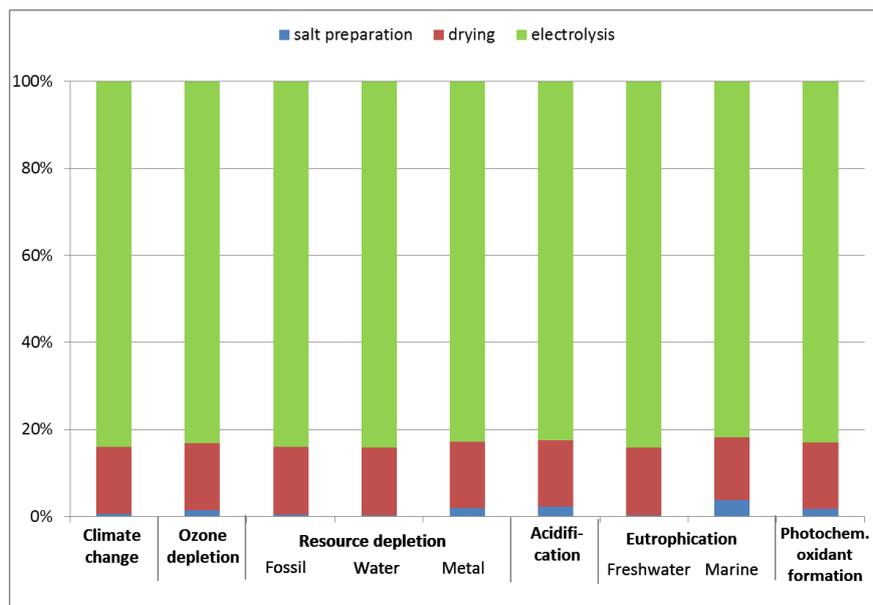


Abb. 96: Beiträge der vier Prozessschritte des *Schmelzflusselektrolyse*-Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien.

Die relativen Beiträge der einzelnen Prozessschritte zu den Gesamtumweltwirkungen in den betrachteten Umweltwirkungen sind in Abb. 96 dargestellt. Der Beitrag des Elektrolyseschritts liegt bei etwa 82 - 84 %. Dies ist auf den hohen Stromverbrauch der Elektrolyse bei sehr kleinem Durchsatz zurückzuführen. Der Trocknungsschritt trägt etwa 15 % zu allen Wirkungskategorien bei. Hier werden die Umweltwirkungen durch den Strombedarf für die Trocknung verursacht. Die Vorbereitung des Elektrolyten weist keinen Strombedarf auf und trägt dementsprechend nur 0,3 - 3,8 % zu den Umweltwirkungen bei.

Der signifikanteste Parameter ist der Strombedarf. Dieser hat kumuliert über alle Prozessschritte einen Anteil von 94 % (marine Eutrophierung) bis über 99 % (z.B. Klimawandel) an den Umweltwirkungen. Der Strombedarf wäre bei einer großtechnischen Umsetzung relativ zum Durchsatz deutlich geringer als im Labormaßstab. Da der Einfluss des Parameters Strombedarf überdeutlich ist, wurde auf eine Sensitivitätsanalyse diesbezüglich verzichtet. Der Elektrolyt kann theoretisch wiederverwendet werden, dies ist allerdings im Laborversuch bisher nicht geschehen. Es wurde daher eine Entsorgung modelliert. Als Kathode wurde eine Kohlenstoffelektrode angenommen, da keine Datensätze für Wolframelektroden oder für Wolfram als Ressource in ecoinvent v3.1 vorhanden sind. Aufgrund des großen Einflusses des Strombedarfs auf die Ergebnisse der Wirkungsbilanz wurden diese Annahmen jedoch nicht als signifikante Parameter bewertet. Es wurde daher keine Sensitivitätsanalyse diesbezüglich durchgeführt.

Biobleaching (AP 5.3)
Partner: Fraunhofer IWKS

Diese Prozesskette wurde im Arbeitspaket 5.3 vom Projektpartner Fraunhofer IWKS entwickelt. Als Ausgangsmaterial diente pulverförmiges Magnetmaterial. Im ersten Schritt mussten zunächst die notwendigen Mikroorganismen in einem spezifischen Nährmedium in einem Bioreaktor kultiviert werden. Sobald das Wachstum der Mikroorganismen abgeschlossen war (nach ca. 3-7 Tagen), wurde im zweiten Schritt das Magnetmaterial hinzugefügt und der Bioreaktor weitere 14 Tage betrieben, um das Biobleaching durchzuführen. Nach Beendigung dieses Prozessschrittes wurden die festen Rückstände und die Biomasse mittels Vakuumfiltration von der Lösung abgetrennt. Die Seltenen Erden werden anschließend mit Oxalsäure gefällt und mittels Vakuumfiltration abgetrennt. Als Produkt liegt ein SE-Konzentrat als Oxalat vor. Es konnten 99 % Dysprosium, 91 % Neodym und 75 % Praseodym der sich ursprünglich im Ausgangsmaterial befindlichen Menge mittels Biobleaching in Lösung gebracht werden. Das Mengenverhältnis des Produktes entspricht also ungefähr der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.



**Abb. 97: Schematisches Prozessschema *Biobleaching*.**

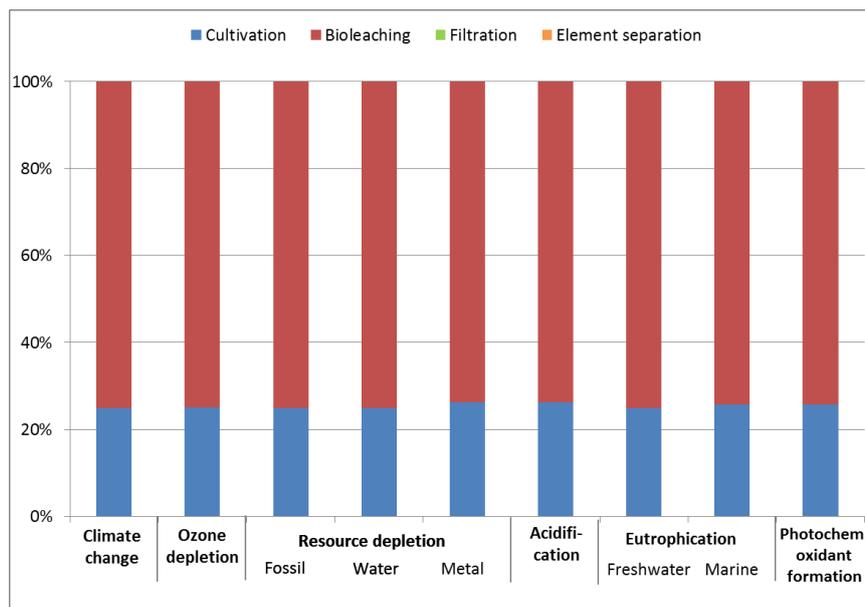
Die funktionelle Einheit wurde als die Gewinnung von 1 kg SE-Verbindungen aus Altmagneten definiert. Der Referenzfluss ist 1 kg SE-Verbindung.

Die Sachbilanz einschließlich der für die Material- und Energieströme verwendeten ecoinvent v3.1-Datensätze ist im Anhang in Tab. 23 aufgeführt. Die Vordergrunddaten wurden am Fraunhofer IWKS erhoben. Da Datensätze für die Modellierung der Chloride des Nährmediums benötigt werden, aber nicht in der Datenbank vorhanden waren, wurden diese Verbindungen wie folgt ersetzt:

- Magnesiumsulfat anstatt Magnesiumchlorid
- Mangansulfat anstatt Manganchlorid
- Zinksulfat anstatt Zinkchlorid
- Kupfersulfat anstatt Kupferchlorid

Aus der experimentellen Praxis ist bekannt, dass die Kultivierung von Mikroorganismen für Bioleaching auch mit diesen Verbindungen möglich ist. Die ebenfalls für das Nährmedium eingesetzten Verbindungen  $\text{CoCl}_2$  und  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  konnten nicht berücksichtigt werden, da keine geeigneten Datensätze zur Verfügung standen.

Ein Datensatz für  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  wurde basierend auf dem ecoinvent-Datensatz für  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  modelliert.



**Abb. 98: Beiträge der vier Prozessschritte des *Bioleaching*-Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien.**

Abbildung 98 zeigt, dass die Umweltwirkungen in allen betrachteten Wirkungskategorien auf das Leaching und die Kultivierung der Mikroorganismen entfallen. Die Beiträge der Filtration und der Elementseparation hingegen sind mit weniger als 0,01 % in allen Wirkungskategorien vernachlässigbar. Das Bioleaching selbst hat einen Anteil von 74 – 75 % an den Umweltwirkungen in den verschiedenen Kategorien. Etwa 25 – 26 % der Umweltwirkungen entfallen auf die Kultivierung.

Die Umweltwirkungen in den beiden signifikanten Prozessschritten sind zum überwiegenden Teil auf den Strombedarf des Bioreaktors zurückzuführen. Dazu gehören Rühren, Temperieren, Systemsteuerung, Justierung von pH-Wert (Pumpen), Zuluft- und Abluftregulierung, sowie nach Prozessende Reinigung und Sterilisation. Der Strombedarf verursacht z.B. über 99,5 % der Treibhausemissionen der Prozesskette. Bezogen auf die funktionelle Einheit würde der Energiebedarf bei einer großtechnischen Umsetzung deutlich sinken. Aufgrund des hohen Einflusses auf die Ergebnisse ist der Energiebedarf der signifikante Parameter.

Es wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, weil der Einfluss des Strombedarfs auf die Gesamtergebnisse überdeutlich ist und keine Abschätzungen zu einer möglichen Hochskalierung getroffen werden konnten.

Diese Prozesskette wurde im Arbeitspaket 5.4 vom Projektpartner BASF entwickelt. Als Ausgangsmaterial diente oxidiertes Altmagnetmaterial. Dieses wurde im ersten Prozessschritt durch Zugabe von Kohlenstoff reduziert. Im zweiten Prozessschritt wurde das reduzierte Altmagnetmaterial chloriert. Dies fand unter Zufuhr von Wärmeenergie in einem Ofen statt. Aus der entstandenen Gasphase wird Eisen(III)-chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) zurückgewonnen. Der Feststoff, welcher Seltenerdchlorid und überschüssigen Kohlenstoff enthält, wurde zunächst in Wasser gelöst. Durch Filtration wurde der Kohlenstoff abgeschieden. Anschließend wurden die Seltenen Erden gefällt, von der Flüssigphase abgetrennt, getrocknet und kalziniert. Das Produkt ist ein Seltenerdoxid. Die vereinfachte Prozesskette ist in Abb. 99 dargestellt.



Abb. 99: Schematisches Prozessschema Carbochlorierung.

Die funktionelle Einheit, die für diesen Prozess gewählt wurde, ist die Herstellung von 1 kg SE-Oxid aus oxidiertem Altmagnetmaterial. Der Referenzfluss ist 1 kg SE-oxid. Das Mengenverhältnis der enthaltenen Seltenen Erden entspricht dem Gehalt des eingesetzten Altmagnetmaterials.

Die Sachbilanz einschließlich der für die Material- und Energieströme verwendeten ecoinvent v3.1-Datensätze ist im Anhang in Tab. 24 aufgeführt. Die Vordergrunddaten stammen direkt vom Projektpartner BASF.

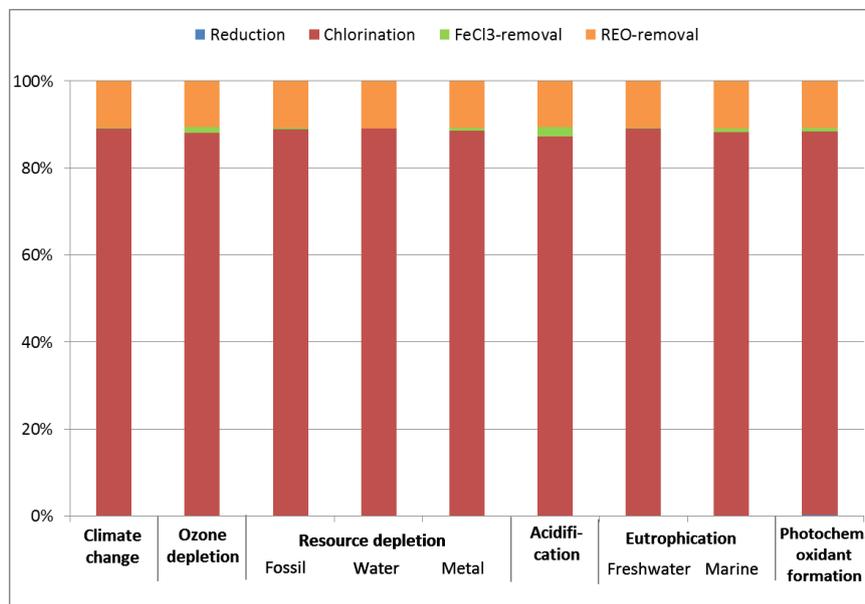


Abb. 100: Beiträge der vier Prozessschritte des Carbochlorierung-Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien.

Abbildung 100 zeigt die relativen Beiträge der einzelnen Prozessschritte zu den Gesamtumweltwirkungen in den betrachteten Wirkungskategorien. Die Chlorierung liefert in allen Wirkungskategorien mit 87 - 89 % den größten Beitrag. Den zweitgrößten Beitrag liefert die SE-Oxid-Extraktion mit ca. 11 % in allen Kategorien. Dies ist größtenteils auf den hohen Stromverbrauch der Öfen bei sehr kleinem Durchsatz zurückzuführen. Auf die Extraktion von  $\text{FeCl}_3$  (0,1 - 2,3 %) und die Reduktion (unter 1 % in allen Kategorien), die beide keinen Stromverbrauch aufweisen, entfällt nur ein geringer Anteil der Umweltwirkungen.

Insgesamt entfallen über 99,5 % der klimarelevanten Emissionen dieser Prozesskette auf den Strombedarf. In der Wirkungskategorie terrestrische Versauerung sind es 97,4 % der Emissionen. Auch in den anderen Wirkungskategorien trägt der Strombedarf in einem vergleichbaren Ausmaß zu den Gesamtumweltwirkungen bei. Bei einer großtechnischen Umsetzung dieser Prozesskette würde der Wärmebedarf relativ zum Durchsatz deutlich sinken.

Weiterhin ist ein Einsatz von Gas als Energieträger wahrscheinlich. Der Energiebedarf ist daher als signifikanter Parameter zu identifizieren. Von einer Sensitivitätsanalyse wurde allerdings abgesehen, weil einerseits der Einfluss des Strombedarfs auf die Gesamtergebnisse überdeutlich ist und andererseits keine Abschätzungen zu einer möglichen Aufskalierung getroffen werden konnten.

#### *Beurteilung der Ergebnisse*

Die Vollständigkeit der Daten ist als befriedigend zu bewerten. Es wurden Daten zu allen relevanten Prozessschritten der entwickelten Prozessketten erhoben. Im Rahmen des Projektes konnten jedoch nicht alle Entwicklungen abgeschlossen werden. So konnte der abschließende Extraktionsschritt der Schmelzflusselektrolyse nicht entwickelt werden. Auch beim *Dismantling and Reuse* waren zum Zeitpunkt der Datenerhebung keine Daten zur abschließenden Beschichtung der Magneten vorhanden, weshalb dieser Prozessschritt im Rahmen dieser Ökobilanz nicht betrachtet werden konnte.

Sensitivitätsprüfungen zu den Wirkungsabschätzungen der einzelnen Prozessketten wurden bei Bedarf durchgeführt. Diese sind in den jeweiligen Abschnitten im Anschluss an die Ergebnisse dokumentiert.

Die Erfassung der Vordergrunddaten erfolgte mit einer konsistenten Excel-Vorlage, die von allen Projektpartnern ausgefüllt wurde. Die erhaltenen Daten wiesen jedoch einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad auf, der Detaillierungsgrad der Daten innerhalb der Prozessketten ist einheitlich. Die Hintergrunddaten stammen ausschließlich aus der Datenbank ecoinvent v3.1. Das Systemmodell *cut-off* wurde bei der Nutzung der Datensätze konsistent verfolgt. Der Detaillierungsgrad und das Alter der Datensätze in ecoinvent v3.1 weisen allerdings gewisse Unterschiede auf, welche der Dokumentation der Datenbank zu entnehmen sind. Die Charakterisierungsfaktoren stammen aus der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe und damit aus einer einheitlichen Quelle.

#### *Einschränkungen*

Eine wichtige Einschränkung ergibt sich durch die Systemgrenzen. Die Ergebnisse sind nur für die Prozessschritte gültig, die in den Prozessen enthalten sind. Die Nutzungsphasen der Magnete sowie weitere Behandlungsschritte, die den hier entwickelten Prozessketten vor- oder nachgeschaltet sind, wurden nicht betrachtet. Die Ergebnisse gelten nur für den gewählten Allokationsansatz, nach dem die Ausgangsmaterialien (z.B. oxidierte Altmagnete) lastenfrei in das System eintreten und dafür keine Gutschriften für die Produkte gewährt werden.

Diese Studie stellt keine vergleichende Ökobilanz dar. Ein Vergleich der unterschiedlichen Prozessketten war ausdrücklich nicht Ziel der Studie. Aufgrund der unterschiedlichen Edukte und Produkte und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen funktionellen Einheiten und Systemgrenzen ist ein solcher Vergleich mit den Ergebnissen dieser Ökobilanz nicht möglich.

Auch ein Vergleich mit der Primärproduktion von Permanentmagneten, SE-Metallen oder SE-Verbindungen war ausdrücklich nicht Ziel der Studie. Ferner können keine konkreten Aussagen zur Hochskalierung getroffen werden. Es ist aber zu erwarten, dass insbesondere die Umweltwirkungen der Anteile, die durch den Stromverbrauch verursacht werden, bei einer großtechnischen Umsetzung deutlich geringer ausfallen werden. Ein aussagekräftiger Vergleich von innovativen Prozessketten, deren Technology Readiness Level noch sehr gering ist, mit großtechnisch umgesetzten Prozessen der Primärgewinnung und -produktion ist nicht sinnvoll. Dadurch wür-

den für die neu entwickelten Recyclingprozesse unrealistisch hohe Umweltwirkungen angenommen.

Weiter ist zu beachten, dass im Rahmen des RECVAL-HPM-Projekts Produkte mit unterschiedlicher Qualität gewonnen wurden. In welchem Umfang Primärmaterial durch diese Recyclingprodukte ersetzt werden kann, ist noch nicht bekannt.

Es hat keine kritische Prüfung dieser Ökobilanz in Anlehnung an ISO 14040/44 stattgefunden.

### *Fazit und Empfehlungen*

In der begleitenden Ökobilanz wurden die auf deutscher Seite entwickelten Prozessketten zum Reuse und Recycling von Permanentmagneten im Rahmen einer Ökobilanz bezüglich der Wirkungskategorien Klimawandel, Ozonabbau, fossiler Ressourcenverbrauch, Wasserverbrauch, Verbrauch von mineralischen Ressourcen, terrestrische Versauerung, Süßwassereutrophierung, marine Eutrophierung und Photooxidantienbildung untersucht.

Das Ziel war die Identifizierung der Parameter, die den größten Beitrag zu den Umweltwirkungen der einzelnen Prozessketten leisten. Es hat sich gezeigt, dass in allen Prozessketten der Strombedarf im Vordergrund steht. Dies war zu erwarten, da alle Prozessketten im Labormaßstab entwickelt wurden und demzufolge noch einen niedrigen Technology Readiness Level aufweisen. Es ist zu erwarten, dass sich der Energiebedarf und damit auch die Umweltwirkungen bezogen auf die funktionelle Einheit bei einer großtechnischen Umsetzung deutlich verringern werden. So können die Prozesse auf den geplanten Durchsatz optimiert werden. Auch könnten teilweise effizientere Technologien eingesetzt werden, z.B. würde bei einer Hochskalierung der Carbochlorierung anstelle des Elektroofens ein Gasofen zum Einsatz kommen. Auch war es bei vielen Prozessschritten zunächst das Ziel, die technologische Machbarkeit nachzuweisen, sodass Energieeffizienz nicht im Vordergrund stand.

Die vorliegende Ökobilanz bildet den Entwicklungsstand im Jahr 2017 ab. Es wird empfohlen, die Entwicklungen weiterhin im Rahmen von Ökobilanzen zu begleiten. Sobald für die Recyclingverfahren eine großtechnische Umsetzung erfolgt ist, oder zumindest realistische Abschätzungen hierzu vorliegen, ist ein Vergleich mit der Primärproduktion zu empfehlen, um das Umweltentlastungspotenzial der Recyclingverfahren aufzuzeigen.

### **2.1.7. Fazit und Ausblick**

Ziel des RECVAL-HPM Projekts war eine ganzheitliche Strategie hinsichtlich des Recyclings von Nd-Fe-B-Permanentmagneten zu entwickeln. Dazu wurde im AP 2 zunächst das Potential von Elektroaltgeräten als mögliche Quellen für rezyklierbare Nd-Fe-B-Magnete evaluiert. Aus den WEEE Sammelgruppen wurden dabei die Sammelgruppen 1-3 als ergiebigste Posten identifiziert. Allerdings zeigte sich, dass in Sammelgruppe 1 und 2 lediglich ein Teil der Gerätetypen mit Nd-Fe-B-Permanentmagneten bestückt ist. Neben einer Vorabsortierung der Geräte sollten die entnommenen Magnete auch noch einer Schnellanalyse (z.B. mittels Röntgenfluoreszenz), zur Differenzierung von Nd-Fe-B und Ferriten unterzogen werden. Geräte aus Sammelgruppe 3 (Festplatten aus PCs und Laptops) enthielten hingegen nahezu alle Nd-Fe-B-Magnete. Aus wirtschaftlicher Sicht ist jedoch eine automatisierte Demontage der Magnete aus den Festplatten unabdingbar.

Weiter wurden im Rahmen des AP2.2 Vorschläge für ein recyclinggerechtes Design am Beispiel eines Elektromotors gemacht. Neben einem einfachen Zugang zu den jeweiligen Komponenten (Magnete, Rotor/Stator, etc.) wird die Verwendung von möglichst vielen Gleichteilen ähnlich eines Baukastenprinzips vorgeschlagen. Eine standardisierte Bauweise erlaubt einen höheren Grad an Automatisierung bei der Zerlegung und mehr Wiederverwendungsmöglichkeiten der Komponenten. Hinsichtlich des Remanufacturing, also der Wiederverwendung eines Produktes

oder Bauteils nach Instandsetzung und Qualitätsprüfung sollten Schnittstellen vorhanden (und zugänglich) sein, die eine Funktionsprüfung einzelner Teile ermöglichen.

Aufgrund der großen Vielzahl an unterschiedlichen Spezifikationen (Geometrie, physikalischer Eigenschaften, chemischer Zusammensetzung, Oberflächenbeschichtung etc.) und der Verwendung von auf die Anwendung zugeschnittenen Magnetwerkstoffen wird eine direkte Wiederverwendung der Magnete als kritisch beurteilt.

Der Wiedereinsatz von gebrauchten Magneten nach einer Aufarbeitung wurde im AP3.2 untersucht. Bezüglich der Beschichtung der umgearbeiteten Magnete zeigte sich, dass eine Zinkphosphatierung, aufgetragen durch ein einfaches Tauchverfahren, eine vielversprechende Variante der herkömmlichen Beschichtungen darstellt.

Technologische Prozesse zum werkstofflichen Recycling wurden in AP4 entwickelt. Im AP4.1 und 4.2 wurden erfolgreich neue Sintermagnete unter Beimischung von Rezyklat zu Primärmaterialien beim Projektpartner CEA hergestellt.

Die Ergebnisse im AP4.3 demonstrieren, dass Sintermagnet-Material aus EoL- Anwendungen auch mittels HD- und dHDDR-Prozessierung in anisotropes Magnetpulver überführt werden kann, das seinen Einsatz in der Herstellung kunststoffgebundener Magnete findet.

Verfahren zur Rückgewinnung von SE-Verbindungen waren Fokus des AP5. Im Vergleich zu konventionellen rein chemischen Leachingmethoden, konnten auch für einige Bakterienkulturen hohe Leachingraten der Seltenen Erden erzielt werden (Bioleaching). Durch geringere Kosten und eine geringere Belastung der Abwässer durch den Bioleaching-Prozess, bietet dies eine einfache und kostengünstige Variante zur Auflösung des Probenmaterials.

Sehr gute Ausbeuten und Reinheiten der rückgewonnenen SE-Verbindungen konnten mit dem Prozess der Carbochlorierung erzielt werden. Die Güte des Produkts, das mit diesem Verfahren aus Altmagnetmaterialien (jeglicher Form und Qualität) erreicht werden konnte, erlaubt eine kommerzielle Weiterverwendung des Produkts.

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung und der Ökobilanzierung, die im Rahmen des AP6 zu den Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren von Nd-Fe-B-Magneten gewonnen wurden, identifizieren die Prozessschritte, die die größten Beiträge der ökonomischen und ökologischen Kosten zur Folge haben und bei denen noch Optimierungsmöglichkeiten bestehen. Da es sich um Neuentwicklungen in kleinem Maßstab handelt, wurde der Strombedarf prozessübergreifend als der Parameter identifiziert, der die größten Umweltwirkungen nach sich zieht. Durch die Aufskalierung sind hier deutliche Verbesserungen bezüglich der Umweltwirkungen aller entwickelten Prozesse zu erwarten.

Das Konsortium ist der Meinung, dass Recycling von Altmagneten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Versorgungslage von SE-Elementen in Europa liefern kann. Hinsichtlich der Prozesstechnologien konnte im Projekt im Labormaßstab erfolgreich gezeigt werden, dass sowohl ein werk- als auch ein rohstoffliches Recycling des Magnetmaterials bzw. der Seltenen Erden sinnvoll realisierbar ist. Die nächsten Schritte beinhalten die Hochskalierung der erarbeiteten Prozesse.

Als noch verbesserungsfähigen Punkt hinsichtlich einer Kreislaufführung von SE-haltigen Magneten wird die Rückführung von Bauteilen, die Magnete enthalten, angesehen. Auch im Bereich einer kostengünstigen (automatisierten) Demontage der Bauteile besteht aufgrund der enormen Vielzahl und Varianz noch Optimierungsbedarf. Weiter würde auch eine Kennzeichnung der verbauten Materialien/Magnete die Bedingungen für eine erfolgreiche Kreislaufführung erheblich verbessern.

## 2.2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt. Die bereitgestellten Mittel wurden bei den Partnern entsprechend der jeweils durchgeführten Arbeiten eingesetzt (s. dazu Punkt 2.3 „Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten“).

Bei der Fh Projektgruppe IWKS wurden die bereit gestellten Mittel (neben Budget für Personal) vornehmlich für die Deckung von Verbrauchskosten eingesetzt. Diese enthielten u.a. Kosten für Gase (Arbeiten unter Schutzgas, Prozessgase), Verbrauchsmaterialien zur Probenpräparation/Analysen, Laborbedarf (sterile Zentrifugengefäße, Spritzen, Filter, etc.), ionische Flüssigkeiten, Chemikalien und Primärmaterialien (als Referenz).

Beim Fh IPA wurden die hauptsächlichen Investitionskosten von fast 120 t€ für den Inertgasofen zur Elektrolyse inkl. Installation vom Institut selbst getragen. Über das Projekt beschafft wurden die Einsatzchemikalien zur Herstellung der Elektrolytschmelzen, Verbrauchsmaterialien für die notwendige chemische Analytik, die Elektrolyseeinbauten in den Ofen sowie Hilfsmittel wie z.B. ein „Inertgaszelt“ zum Handling der oxidations- und feuchteempfindlichen Substanzen.

## 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

### Bosch:

Bei Bosch wurde der Großteil der Ressourcen in der ersten Projekthälfte für die Definition von Wiederverwendungsmöglichkeiten, die theoretische Planung und tatsächliche Zerlegung einer E-Maschine, sowie der Aufarbeitung der Prozesskette, der nötigen Fertigungsinformationen verwendet. Dabei fand auch eine Ableitung von Designrichtlinien, sowohl an der beispielhaft betrachteten, als auch an weiteren E-Motoren, statt. Über die mechanische Bearbeitung und magnetische Charakterisierung der Magneten wurde die technische Machbarkeit eines Reuse im Projekt bewertet. Neben der technischen Bewertung erfolgte weiterhin die Bewertung des Reuse unter Wirtschaftlichkeits- und Geschäftsmodellaspekten. Die erarbeiteten Prozess-Daten wurden dann im weiteren Projektverlauf in Kostenschätzungen weiterverarbeitet, welche eine wirtschaftliche Bewertung verschiedener Wiederverwendungs-Szenarien mit verschiedenen Randbedingungen erlauben. Parallel wurden Marktmechanismen bei der Altteilrückführung aufgestellt und analysiert und diese Informationen ins Projekt übergeben.

### BASF:

Im AP 5.4 wurden die Ressourcen für die Umsetzung der von den Projektpartnern bereit gestellten Proben in der (Carbo-)Chlorierung sowie für die Analytik der Startmaterialien und Produkte eingesetzt. In Zusammenarbeit mit dem AP 6 wurde eine LCA und LCC Analyse des Prozesses durchgeführt (Auswertung der Ausbeuten und Rohstoffkosten).

### Fh Projektgruppe IWKS:

Die Fh Projektgruppe war neben der Projektkoordination (AP1) in den Arbeitspaketen AP2.1 (Stoffstromanalyse), AP4.3 (dHDDR Prozessierung von Altmagneten), AP5.3 (Biobleaching) und AP6.2 (Ökologische Bewertung der Prozesse) mit jeweils unterschiedlichen Kompetenzbereichen involviert. In AP2.1 war sie für die Durchführung der Stoffstromanalyse verantwortlich. Dazu wurden in mehreren Messkampagnen Daten zu vorhandenem Magnetmaterial in Elektroaltgeräten bei einem Recyclingunternehmen erhoben und durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter der Projektgruppe ausgewertet. Diese Daten wurden durch Analysen des Materials (durchgeführt am IWKS) und Erkenntnisse aus der Literatur ergänzt.

Weiter lag die *d*HDDR Prozessierung von Altmagneten zur Herstellung anisotroper kunststoffgebundener Magnete im Verantwortungsbereich des IWKS. Hauptaugenmerk dieses Arbeitspakets lag in der Durchführung experimenteller Arbeiten: HD- und *d*HDDR-Prozessierung der Altmagnete, Einbettung der Pulver zur Herstellung der Magnete und zu Charakterisierungszwecken. Größere Mengen prozessiertes *d*HDDR-Pulver wurden zur Produktion von kunststoffgebundenen Magneten an die Firma Arelec weitergegeben.

Die Rückgewinnung von SE-Verbindungen mittels Bioleaching wurde im Rahmen einer Doktorarbeit am IWKS durchgeführt. Schwerpunkt bildeten dabei die experimentellen Arbeiten im Labor sowie die Auswertung der Ergebnisse.

Weiterhin war die Fh Projektgruppe IWKS für die ökologische Bewertung der von den Verbundpartnern im Projekt erarbeiteten Prozesse verantwortlich (Datenerhebung und Auswertung hinsichtlich definierter Kriterien).

#### Fh IPA:

Die erforderlichen Arbeiten im AP3.2 wurden eng mit dem französischen Projektpartner Arelec abgestimmt und orientierten sich dementsprechend an den für Arelec notwendigen Informationen. Mit der Phosphatierung konnte ein Verfahren identifiziert werden, das prinzipiell eine gangbare technische Lösung für das Beschichten wiederaufgearbeiteter Magnete darstellt. Es war daher angemessen, entsprechende Untersuchungen zur Anpassung der Phosphatierparameter an das Grundmaterial durchzuführen.

Die Arbeiten im AP.5.1 AP folgten weitgehend der Planung nach Antrag. Es musste allerdings mehr Aufwand in die konstruktive Gestaltung der in den Inertgasöfen eingebauten Elektrolyseeinheit gesteckt werden als geplant, um eine definierte Versuchsdurchführung zu gewährleisten und um die elektrochemischen Messungen durchführen zu können. Die Durchführung der einzelnen Versuche gestaltete sich inklusive der notwendigen Vor- bzw. Nacharbeiten zeitaufwendiger als geplant. Die festgestellten Probleme bei der Erzeugung einer geschlossenen, dichten und haftfesten Neodymschicht erforderten zeitaufwendige Untersuchungen bzw. separate Versuchsreihen.

Weiter war das Fh IPA für die ökonomische Bewertung der im Projekt erarbeiteten Prozesse verantwortlich.

### **2.4. Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans**

Im Rahmen von Beiträgen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften erfolgte eine teilweise Veröffentlichung der Ergebnisse (s. Abschnitt 2.6). Weiter ging aus dem Projekt eine Patentanmeldung hervor.

Detailliertere Auskünfte zu Nutzen und Verwertbarkeit hat jeder Partner dem PTJ im Rahmen des partnerspezifischen Erfolgskontrollberichts separat übermittelt.

### **2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Projektlaufzeit des RECVAL-HPM wurden auch Erkenntnisse aus anderen Forschungsvorhaben zum Thema Rückführung von NdFeB Magneten veröffentlicht. Hervorzuheben ist dabei der Projektbericht des Verbundvorhabens MORE (Motorrecycling) – Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben, BMBF FKZ: 03X4622, PTJ, Jülich (Bast et al., (2014)) sowie Beiträge auf Konferenzen/Veröffentlichungen aus dem EREAN Projekt (EREAN, 2017).

## 2.6. Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt

Auerbach, R., Bokelmann, K., Stauber, R., Schnell, S., Ratering, S.: Recycling of metals and rare earth elements from magnetic powder by means of bioleaching using acidophilic bacteria and fungi, 24th International Workshop on Rare Earth and Future Permanent Magnets and their Applications, Darmstadt (Germany) 2016 (Proceeding-article + Poster), 545.

Auerbach, R., Bokelmann, K., Stauber, R., Schnell, S., Ratering, S.: Bioleaching of metals and rare earth elements from secondary raw materials using acidophilic bacteria and fungi, Chemie, Ingenieur, Technik Vol. 88, I. 9 (2016), 1346; ProcessNet-Jahrestagung und 32. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen, Aachen (Germany) 2016 (Vortrag + Poster).

Auerbach, R., Bokelmann, K., Stauber, R., Schnell, S., Ratering, S.: Recycling of metals and rare earth elements from waste and end of life products by bioleaching using acidophilic bacteria, 14th Symposium on Bacterial Genetics and Ecology, Aberdeen (United Kingdom) 2017 (Poster).

R. Gauß, O. Diehl, E. Brouwer, A. Buckow, N. Groth, K. Gueth, M. Schönfeldt, K. Rachut, A. Dirks, J. Gassmann, R. Hord, R. Stauber, O. Gutfleisch  
Scrap alloys for new magnets. Advanced functional recycling approaches to Nd-Fe-B-magnets 24th International Workshop on Rare Earth and Future Permanent Magnets and their Applications, Darmstadt (Germany) 2016 (Proceeding-article + Poster), 254.

O. Diehl, E. Brouwer, A. Buckow, K. Güth, R. Gauss, O. Gutfleisch, Processes for the recycling of rare earth permanent magnets, TMS 2016 145<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition

R. Gauß, O. Diehl, E. Brouwer, A. Buckow, K. Güth, O. Gutfleisch, Verfahren zum Recycling von seltenerdhaltigen Permanentmagneten, Chemie Ingenieur Technik 2015, 87, No. 11, 1477–1485)

E. Brouwer, O. Diehl, A. Dirks, K. Güth, H. Hibst, A. Lixandru, A. Buckow, R. Gauß, O. Gutfleisch, Patentanmeldung „Recyclingverfahren zur Herstellung isotroper, magnetischer Pulver“ im August/September 2016 erfolgt

J. Öhl: Challenges in electrolysis of solid neodymium in chloride melts at 500 °C, 2<sup>nd</sup> International Conference on Rare Earth Resources (ERES 2017), Santorini, 2017 (Vortrag)

D. Fischer, J. Öhl: Induced codeposition for the material recycling of NdFeB magnets, 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 2016), Darmstadt, 2016 (Poster).

J. Öhl, D. Fischer, K. Schmid: Mechanistic Studies on the Electrodeposition of Neodymium in Molten Chloride Electrolyte, 26th EUCHEM Conference on Molten Salts and Ionic Liquids, Wien, 2016. (Poster+Vortrag)

### III. Literatur

Aichi Steel (2017), Online unter [https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/products/electromagnetic/bonded\\_magnet/index.html](https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/products/electromagnetic/bonded_magnet/index.html). Zuletzt geprüft am 06.11.2017

Aidaoui, L., Triantafyllou, A. G., Azzi, A., Garas, S. K., Matthaios, V. N. (2015). Elevated stacks' pollutants' dispersion and its contributions to photochemical smog formation in a heavily industrialized area, *Air Qual Atmos Health* (2), S. 213–227.

Albers, H.; Greiner, S. (Hg.) (2014). *Recycling von Windenergieanlagen: Erfahrungen aus dem Onshore- Bereich und Ausblicke auf den Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen*. AMEC (2014): IMT002-019 Wind Turbine Magnets Study. Wind turbine market and opportunities for recovery of neodymium magnets in Scotland.

Albers, H., (2012). *Recycling of Wind Turbine Rotor Blades - Fact or Fiction?* Online verfügbar unter [http://www.dewi.de/dewi\\_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_34/05.pdf](http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin_34/05.pdf).

Bast, U., Blank, R., Buchert, M., Elwert, T., Finsterwalder, F., Hörnig, G., et al. (2014). MORE Abschlussbericht - Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtriebwerken. Online verfügbar unter [http://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Dokumente\\_News\\_ETC/MORE\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Dokumente_News_ETC/MORE_Abschlussbericht.pdf). Zuletzt geprüft 08.11.2017

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. In: *Journal of Cleaner Production* 51, S. 1–22. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037.

Charalampides, G., Vatalis, K. I., Apostoplos, B., Ploutarch-Nikolas, B. (2015). Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance* 24, S. 126–135. DOI: 10.1016/S2212-5671(15)00630-9.

Crock (2016). Mapping stocks and flows of neodymium, TU Delft. Online verfügbar unter : <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:4929a4c4-5df2-4005.../download>. Zuletzt geprüft 10.11.2017

Curran, M. A. (2008). *Development of Life Cycle Assessment Methodology: A Focus on Co-product Allocation*. Erasmus University Rotterdam, Online verfügbar. <http://hdl.handle.net/1765/12679>. Zuletzt geprüft 16.11.2017.

Dannemand Andersen, P.; Borup, M.; Krogh, T. (2007). Managing long-term environmental aspects of wind turbines. A prospective case study. *International journal of technology, policy and management* : IJTPM 7 (4), S. 339–354.

DeStatis (2002). *Fachserie / Statistisches Bundesamt*. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/Monatsausgaben/WistaOktober02.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/Monatsausgaben/WistaOktober02.pdf?__blob=publicationFile). Zuletzt geprüft am 21.11.2017.

Diaz, L., Chamelot, P., Gibilaro, M.; Massot, L.; Serp, Jérôme (2017). *Electrochemical Behaviour of Neodymium in Molten Chloride Salts*. *Rare Metal Technology* 2017. Cham: Springer (The Minerals, Metals & Materials Series), S. 77–86.

DIN EN ISO 14040 (2009). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 14044 (2006). Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

ecoinvent-Datenbank. Dokumentation and Files (2017). Online verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/support/documents-and-files/documents-and-files.html>. Zuletzt geprüft am 19.09.2017.

ENOVA (2014). Erfahrungen im Repowering Onshore. Herausforderungen Offshore aus der Perspektive eines Projektentwicklers. Leer Online verfügbar [http://www.offshore-hub.net/files/downloads/Repowering%20Konferenz/3\\_Enova\\_Ralf%20Brinkema.pdf](http://www.offshore-hub.net/files/downloads/Repowering%20Konferenz/3_Enova_Ralf%20Brinkema.pdf) Zuletzt geprüft 14.11.2017

Entsorgung.de (2017). Autoverschrottungen 2014 in Deutschland. Entsorgungstatistik für das 1. Halbjahr 2014. Online verfügbar unter <http://www.entsorgung.de/autoverschrottungen-2014.xhtml>. Zuletzt geprüft am 14.09.2017.

ESG Edelmetall-Service GmbH & Co. KG (2017). Online verfügbar <https://www.scheideanstalt.de/elektroschrott-preise-und-sortierkriterien/>. Zuletzt geprüft am 17.11.2017.

Eurostat 2016. Eurostat WEEE data collector, Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste operations, Online verfügbar <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.doc>. Zuletzt geprüft am 08.10.2016.

EREAN (2017). European Rare Earth (Magnet) Recycling Network. Online verfügbar <http://erean.eu/index.php>. Zuletzt geprüft am 10.11.2017.

Fomina, M. G. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. Bioresource Technology, S. 3-14.

Gallenkemper, B., Breer, J. (2014). Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2011 und 2012 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2014. Online verfügbar unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_09\\_2015\\_analyse\\_der\\_datenerhebung\\_nach\\_elektrog.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2015_analyse_der_datenerhebung_nach_elektrog.pdf). Zuletzt geprüft am 08.11.2017.

Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A.;Struijs J., Van Zelm R, (2013). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation. Online verfügbar unter <http://www.lcia-recipe.net>. Zuletzt geprüft am 09.11.2017.

Habib, K., Schibye, P. K., Vestbø, A. P., Dall, O., Wenzel, H. (2014). Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach, *Environ Sci Technol.*, 48 (20):12229-37.

Herrmann, C. (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung im Unternehmen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

Hykawy, J.; (2014): INDUSTRY REPORT //Rare Earths. INITIATING SECTOR COVERAGE The Rare Earths Market Keeps Changing. Online verfügbar <http://static.squarespace.com/static/535e7e2de4b088f0b623c597/t/54697223e4b054b6f26537f7/1416196643789/Stormcrow-Rare+Earths+Industry+Report-Nov2014.pdf> Zuletzt geprüft am 11.11.2017

- Jacobson, M. Z., (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ. Sci.* 2 (2), S. 148–173. DOI: 10.1039/b809990c.
- Kaiser, O. S., Seitz, H. (2014): Kurzanalyse Nr. 9: Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. Online verfügbar [https://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf](https://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf). Zuletzt geprüft am 09.11.2017.
- Kaksonen, A. L. (2011). Bioleaching and recovery of metals from final slag waste of the copper smelting industry. *Minerals Engineering*, S. 1113-1121.
- Klöppfer, W., Grahl, B. (2009), Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Lee, J. P. (2012). Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction- A review. *Waste Management*, S. 3-18.
- Lewis, G. G. (2011). Bio hydrometallurgical recovery of metals from Fine Shredder Residues. *Mineral Engineering*, S. 1166-1171.
- Ma, B.M., Herchenroeder, J.W., Smith, B. Suda, M., Brown, D.N, Chen, Z. (2002). Recent development in bonded NdFeB magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 239, 418–423
- Martínez, E., Jiménez, E., Blanco, J., Sanz, F. (2010). LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine. *Applied Energy* 87 (7), S. 2293–2303. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.11.025.
- McGuinness, P.J., Harris, I.R., Rozendaal, E. et al. (1986): The production of a Nd-Fe-B permanent magnet by a hydrogen decrepitation/attritor milling route, *J. Mater. Sci.* (21) 4107
- Mc Guinness, P.J; Devlin, E.; Harris, I.R.; Rozendaal, E.; Ormerod J. (1989): A study of Nd-Fe-B magnets produced using a combination of hydrogen decrepitation and jet milling, *J. Mater. Sci.* (24) 2541
- Mock, P. (2017). European vehicle market statistics, 2015/2016, Online verfügbar unter <http://www.theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20152016>. Zuletzt geprüft am 21.11.2017.
- Niederhausen, H., Burkert, A. (2014): Elektrischer Strom. Gesteuerung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie im Kontext der Energiewende. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg
- Ortegon, K., Nies, L. F., Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines., *Journal of Cleaner Production* 39, S. 191–199. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.08.022.
- Plambeck, J. A. (1976). Fused Salt Systems. In: James A. Plambeck (Hg.): *Encyclopedia of electrochemistry of the elements*, Bd. 10. New York: Dekker.
- Polinder, H.; Mueller, M. (Hg.) (2013). *Electrical drives for direct drive renewable energy systems*. Oxford: Woodhead Pub (Woodhead Publishing series in energy, no. 24)
- Porter, M. E. (1979). How Competitive Forces Shape Strategy. In: *Harvard Business Review* 59 (2), S. 137-145.

PWC (2016). Bis 2030 ist jeder dritte Neuwagen in der EU ein Elektroauto. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/pressemittelungen/2016/bis-2030-ist-jeder-dritte-neuwagen-in-der-eu-ein-elektroauto.html>. Zuletzt geprüft 08.11.2017.

Sander, K., Schilling, S., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., von Gries, N., Hobohm, J. (2012). Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten. Meilensteinbericht August 2012. Online verfügbar unter [http://www.oekopol.de/archiv/material/603\\_RePro\\_Meilensteinbericht\\_1.pdf](http://www.oekopol.de/archiv/material/603_RePro_Meilensteinbericht_1.pdf). Zuletzt geprüft 08.11.2017

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., Mer, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Darmstadt. Online verfügbar [http://www.ressourcenfieber.eu/publications/reports/Rare%20earths%20study\\_Oeko-Institut\\_Jan%202011.pdf](http://www.ressourcenfieber.eu/publications/reports/Rare%20earths%20study_Oeko-Institut_Jan%202011.pdf) Zuletzt geprüft 14.11.2017

Symbolotti (2016), Wind Power Technology Brief. Online verfügbar unter [http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP\\_Tech\\_Brief\\_Wind\\_Power\\_E07.ashxS](http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.ashxS). Zuletzt geprüft am 21.11.2017.

Statista (2016)\_statista.de, Absatz von Desktop-PCs und Notebooks auf dem Konsumentenmarkt in Deutschland von 2005 bis zum 1. Halbjahr 2017 (in 1.000 Stück). Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28292/umfrage/absatzzahlen-fuer-desktop-pcs-und-notebooks-seit-2005/>. Zuletzt geprüft am 08.10.2016

Stiftung EAR (2016): Kennzahlen. stiftung elektro-altgeräte. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/service/kennzahlen/bestaetigte-abholungen-gesamta/>. Zuletzt geprüft am 08.11.2017.

Stiftung EAR (2017): Kennzahlen. stiftung elektro-altgeräte. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/service/kennzahlen/bestaetigte-abholungen-gesamta/>. Zuletzt geprüft am 08.11.2017.

Tang, H., Pesic, B. (2015). Electrochemistry and the mechanisms of nucleation and growth of neodymium during electroreduction from LiCl–KCl eutectic salts on Mo substrate. Journal of Nuclear Materials 458, S. 37–44. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.084.

UNEP (2017), Environmental Effects of Ozone Depletion and its Interactions with Climate Change. 2010 Assessment. Online verfügbar unter <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1495&context=scipapers>. Zuletzt geprüft am 14.03.2017.

USGS (2014), U.S. Geological Survey 2014 Minerals Yearbook. Online verfügbar unter [https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earth/myb1-2014-raree.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2014-raree.pdf). Zuletzt geprüft am 21.11.2017.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau VDMA (2006): 34160:2006-06 - Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Technische Regel, 2006-06, Beuth Verlag.

Vogel, H., Friedrich, B. (2015), Development and Research Trends of the Neodymium Electrolysis - A Literature Review, Development and Research Trends of the Neodymium Electrolysis. Online verfügbar unter [http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/emc\\_2015\\_vogel\\_id\\_2892.pdf](http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/emc_2015_vogel_id_2892.pdf). Zuletzt geprüft: 11.9.2017

Walton, A., Yi, H., Rowson, N.A., Speight, J.D., Mann, V.S.J., Sheridan, R.S., Bradshaw, A., Harris, I.R., Williams, A.J. (2015). The use of hydrogen to separate and recycle neodymium-iron-boron-type magnets from electronic waste. *Journal of Cleaner Production* (104), 236

Weber (2012): Rare Earth Elements. A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. Online verfügbar unter <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhardt, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. P. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I). overview and methodology ([online] 21(9)). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, S. 1218–1230.

WWEA (2017): Global Wind Market Report 2016 Online verfügbar unter <http://files.gwec.net/register?file=/files/GWR2016.pdf> Zuletzt geprüft 14.11.2017

Yan, Y.-D., Xu, Y.-L., Zhang, M.-L., Xue, Y., Han, W., Huang, Y. et al. (2013). Electrochemical extraction of neodymium by co-reduction with aluminum in LiCl–KCl molten salt. *Journal of Nuclear Materials* 433 (1-3), S. 152–159. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2012.09.008.

YIYING ZHANG (2013): Peak Neodymium. Material Constraints for Future Wind Power Development. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:668091/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt geprüft am 14.11.2017.

Zhu, H. (2013). *Rare Earth Metal Production by Molten Salt Electrolysis*. Berlin: Springer-Verlag (Encyclopaedia of Applied Electrochemistry).

Wind energy - drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix (2014). [Roskilde]: Technical University of Denmark (DTU international energy report, 2014).

Windenergiereport Deutschland 2013 (2014). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter [http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/SR\\_2013\\_Recycling\\_von\\_Windenergieanlagen.pdf](http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/SR_2013_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf). Zuletzt geprüft am 21.11.2017.

## IV. Anhang

### Erhobene und generische Sachbilanzdaten für die Ökobilanzierung

**Tab. 20: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess *Dismantling and Reuse*.**

Component	Dataset (ecoinvent v3.1) or Reference
<b>1. Cleaning</b>	
e-machine, as is	user defined
compressed air	compressed air production, 600kPa gauge, >30kW average generation [GLO]
carbon dioxide	market for carbon dioxide liquid [RER]
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
Output: carbon dioxide	carbon dioxide, non-fossil [air/unspecified]
<b><i>cleaned e-machine</i></b>	<b><i>user defined, reference flow</i></b>
<b>2. Identification &amp; inspection</b>	
cleaned e-machine	user defined
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
<b><i>tested e-machine</i></b>	<b><i>user defined, reference flow</i></b>
<b>3. E-machine dismantling</b>	
tested e-machine	used defined
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
Output: Fe-Si-sheet	market for scrap steel [GLO]
Output: copper	market for scrap copper [GLO]
Output: aluminium	market for scrap aluminium [GLO]
<b><i>rotor</i></b>	<b><i>user defined, reference flow</i></b>
<b>4. Rotor dismantling</b>	
rotor	used defined
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
Output: Parts of rotor	market for scrap steel [GLO]
Output: Fe-Si-sheet	market for scrap steel [GLO]
Output: Steel	market for scrap steel [GLO]
<b><i>magnets</i></b>	<b><i>user defined, reference flow</i></b>

**Tab. 21: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess dHDDR.**

Component	Dataset (ecoinvent v3.1) or Reference
<b>1. Sandblasting</b>	
scrap magnets	user defined
compressed air, 600 kPa gauge	compressed air production, 600kPa gauge, >30kW average generation [RER]
blasting material	market for aluminium oxide [GLO]
waste: blasting material & losses	market for inert waste for final disposal [GLO]
<b>cleaned scrap magnets</b>	<b>user defined, reference flow</b>
<b>2. Hydrogen decrepitation</b>	
cleaned scrap magnets	user defined
hydrogen	market for hydrogen, liquid [RER]
argon	market for argon, liquid [GLO]
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
offgas, argon	argon-40, air unspecified, elementary flow
offgas, hydrogen	hydrogen, air unspecified, elementary flow
waste	inert waste for final disposal
<b>magnet powder, hydrated</b>	<b>user defined, reference flow</b>
<b>3. dHDDR processing</b>	
magnet powder, hydrated	user defined
hydrogen	market for hydrogen, liquid [RER]
nitrogen	market for nitrogen, liquid [RER]
argon	market for argon, liquid [GLO]
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
offgas, hydrogen	hydrogen, air unspecified, elementary flow
offgas, nitrogen	nitrogen, air unspecified, elementary flow
offgas, argon	argon-40, air unspecified, elementary flow
waste	inert waste for final disposal
<b>magnet powder, dehydrated</b>	<b>user defined, reference flow</b>
<b>4. Embedding in polymer</b>	
magnet powder, dehydrated	user defined
polymer	market for epoxy resin, liquid [GLO]
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
<b>resin bonded magnet</b>	<b>user defined, reference flow</b>

**Tab. 22: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess Schmelzflusselektrolyse.**

Component	Dataset (ecoinvent v3.1) or Reference
<b>1. Salt preparation</b>	
NdCl <sub>3</sub>	user defined
LiCl	market for lithium chloride [GLO]
KCl	market for potassium chloride, as K <sub>2</sub> O [GLO]
<b>salt mixture, containing water</b>	<b>reference flow, user defined</b>

<b>2. Drying</b>	
salt mixture, in solution	reference flow, user defined
electricity	market for electricity, low voltage [DE]
<b>salt mixture, dry</b>	<b>reference flow, user defined</b>
<b>3. Electrolysis</b>	
salt mixture, dry	reference flow, user defined
cathode	market for cathode, for aluminium electrolysis [GLO]
anode	market for anode, for metal electrolysis [GLO]
electricity	market for electricity, low voltage [DE]
nitrogen	market for nitrogen, liquid [RER]
KCl-LiCl-electrolyte (waste)	waste for disposal
chlorine offgas	over system boundary
<b>Nd deposit (incl. Salt residues)</b>	<b>reference flow, user defined</b>

**Tab. 23: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess *Bioleaching*.**

Component	Dataset (ecoinvent v3.1) or Reference
<b>1. Cultivation</b>	
pre-culture of microorganisms	user defined
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	market for ammonium sulfate, as N [GLO]
MgCl <sub>2</sub> * 6H <sub>2</sub> O	market for magnesium sulfate [GLO]
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	sodium dihydrogen phosphate, modified process
KCl	market for potassium chloride, as K <sub>2</sub> O [GLO]
MnCl <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	market for manganese sulfate [GLO]
ZnCl <sub>2</sub>	market for zinc monosulfate [GLO]
CoCl <sub>2</sub> * 6H <sub>2</sub> O	not considered
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	market for boric acid, anhydrous, powder [GLO]
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	not considered
CuCl <sub>2</sub> * 2H <sub>2</sub> O	market for copper surfate [GLO]
FeSO <sub>4</sub> * 7H <sub>2</sub> O	market for iron sulfite [GLO]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	market for sulfuric acid [GLO]
ultrapure water, total	market for water, ultrapure [GLO]
Electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
<b>Culture of microorganism in medium</b>	<b>user defined, reference flow</b>
<b>2. Bioleaching</b>	
Culture of microorganism in medium	user defined
scrap magnet	user defined
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
<b>leached material in medium (+bacteria+ precipitation)</b>	<b>user defined, reference flow</b>
<b>3. Filtration</b>	
leached material in medium (+bacteria+ precipitation)	user defined
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
Waste: solid, untoxic	treatment of municipal solid waste, incineration [DE]
<b>leached elements in solution</b>	<b>user defined, reference flow</b>

#### 4. Element separation

leached elements in solution	user defined
oxalic acid (saturated)	market for chemical organic [GLO]
electricity, low voltage	market for electricity, low voltage [DE]
Waste: used filter papers	treatment of municipal solid waste, incineration [DE]
Waste: filtrate (not precipitated elements)	market for wastewater, unpolluted [GLO]
<b>REE concentrate</b>	<b>user defined, reference flow</b>

**Tab. 24: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess Carbochlorierung.**

Component	Dataset (ecoinvent v3.1) or Reference
<b>Reduction</b>	
oxidized magnet waste	burden-free input
carbon	market for charcoal [GLO]
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]
reduced magnet	<b>user defined</b>
<b>Chlorination</b>	
reduced magnet	reference flow, user defined
chlorine	market for chlorine, gaseous [RER]
heat	market for electricity, low voltage [DE]
<b>FeCl<sub>3</sub> + BCl<sub>3</sub> + chlorine</b>	<b>user defined</b>
<b>ReCl<sub>3</sub> + carbon</b>	<b>user defined</b>
<b>FeCl<sub>3</sub>-Removal</b>	
FeCl <sub>3</sub> + BCl <sub>3</sub> + chlorine	user defined
ReCl <sub>3</sub> + carbon	user defined
NaHSO <sub>3</sub> -lsg	market for sodium hydrogen sulfite [GLO]
NaOH-lsg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]
water	market for water, decarbonised, at user [GLO]
wastewater, average	market for wastewater, average [GLO]
BCl <sub>3</sub>	market for hazardous waste, for incineration [GLO]
FeCl <sub>3</sub> (solid)	not modelled
<b>ReCl<sub>3</sub> + carbon</b>	<b>user defined</b>
<b>RE-Oxide-Removal</b>	
ReCl <sub>3</sub> + carbon	user defined
NaOxalat-lsg 2%	market for chemical, organic [GLO]
water	market for water, decarbonised, at user [GLO]
heat	market for electricity, low voltage [DE]
NaCl, water	market for wastewater, average [GLO]
water	Water [air/unspecified]
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide, fossil [air{unspecified}]
CO	Carbon monoxide, fossil [air{unspecified}]
excess C	treatment of municipal solid waste, incineration [DE]
<b>RE-Oxides</b>	<b>reference flow, user defined</b>

## Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
Cu	Kupfer
Dy	Dysprosium
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EoL	End-of-Life
HD	Hydrogen Decrepitation
dHDDR	<i>dynamic</i> Hydrogen Disproportionation Desorption Recombination
LCA	Life Cycle Analysis (dt. Lebenszyklusanalyse)
LCC	Life Cycle Costing (dt. Lebenszykluskostenrechnung)
Nd	Neodym
Nd-Fe-B	Neodym-Eisen-Bor
Ni	Nickel
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RE	rare earth (dt. Seltene Erden)
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE	Seltene Erden
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Struktur des Projekts und Aufteilung in die Arbeitspakete. ....	3
Abb. 2: Eindrücke der Zerlegungskampagne - unsortierte Geräte der Sammelgruppe 3 (links); sortierte Desktops (Mitte); gesammelte Festplatten (rechts).....	6
Abb. 3: Ergebnisse der Zerlegungskampagnen (Sammelgruppe 3) - prozentuale Verteilung einzelner Gerätetypen. ....	7
Abb. 4: Darstellung der händischen Zerlegung von Festplatten. ....	8
Abb. 5: Herstellerabhängiges Gesamtgewicht von Festplatten aus Desktop-Computern (PC). ....	9
Abb. 6: Herstellerabhängiges Magnetgewicht bzw. -anteil bei Desktop-Computern. ....	10
Abb. 7: Herstellerabhängiges Gesamtgewicht von Festplatten bei Laptops. ....	10
Abb. 8: Herstellerabhängiges Magnetgewicht von Festplatten aus Laptops. ....	11
Abb. 9: Ergebnis Demontageversuch ( $v = 30$ m/s; 6 Prallaggregate am Rotor). ....	12
Abb. 10: Im Demontageversuch erzeugte Magnetbruchstücke. ....	12
Abb. 11: Ergebnis Demontageversuch ( $v = 30$ m/s; 3 Prallaggregate am Rotor). ....	13
Abb. 12: Im Demontageversuch erzeugte Magnetbruchstücke ( $v=15$ m/s; 3 Prallaggregate am Rotor). ....	13
Abb. 13: Darstellung einer vollzerlegten handelsüblichen Festplatte ....	15
Abb. 14: Ergebnis der Gewinn- und Verlustrechnung für das Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von der behandelten Prozessmenge. ....	16

Abb. 15: Ergebnis der Gewinn- und Verlustrechnung für das Recycling von Festplatten in Abhängigkeit von der behandelten Prozessmenge.....	16
Abb. 16: Vorgehen zur Bestimmung des Anteils an Magneten in Elektronikschrott (oben); Mengen an gesammelten Elektroaltgeräten in Deutschland und Europa sowie Anteil der Nd-Fe-B-Magneten enthaltenen Geräte).....	19
Abb. 17: Marktanteile der Nd-Fe-B-Magnete enthaltenden Geräte.....	19
Abb. 18: Mengen an Nd-Fe-B-Magneten in Deutschland und Europa spezifisch dargestellt für einzelne Gerätetypen.....	19
Abb. 19: Prozesskette Zerlegung eines Elektromotors vom Typ SMG180.....	21
Abb. 20: Auspressen / Herausziehen des Rotors bei einer SMG180.....	22
Abb. 21: Beschädigung der Magnete beim Auspressen aus dem wärmebehandelten Rotor bei überstehender Wuchtscheibe (links). Abgedrehte Wuchtscheibe zum schadfreien Bergen der Magnete (rechts).....	22
Abb. 22: Ausstoßen der Magnete aus dem wärmebehandelten Rotor (links) und geborgener Magnet (rechts).....	23
Abb. 23: REM-Aufnahmen des Oberflächenbereichs eines Neumagneten (links) und eines aus dem Rotor geborgenen, wärmebehandelten (400 °C, 4 h) Magneten (rechts).....	23
Abb. 24: Zerlegung Rasenmähermotor Rotak (a), Trennen des Rotors vom Stator (b), geborgener (c) und zur magnetischen Vermessung mechanisch bearbeiteter Magnet (d).....	24
Abb. 25: Verwendete SE-Preis-Szenarien für die Kostenabschätzungen.....	26
Abb. 26: Qualitative Kostenbilanz für das Niedrigpreis- (oben) und das Hochpreisszenario (unten) im Falle des direkten Reuse von Magneten.....	27
Abb. 27: Kostenbilanz im Falle des Remanufacturing einer kompletten E-Maschine (SMG180). Magnete enthalten 12 Gew.-% Dy / 21 Gew.-% Nd bzw. 0 Gew.-% Dy / 33 Gew.-% Nd.....	28
Abb. 28: Marktmechanismen von Altteilen nach Fahrzeuglebensende.....	29
Abb. 29: Querschliff durch das Schichtsystem Nr. 4.....	31
Abb. 30: Schichtdickenverlauf über Kanten.....	32
Abb. 31: Durchschnittliche Schichtdicken.....	32
Abb. 32: Gefügeanalyse der Kupferschichten.....	33
Abb. 33: Ergebnisse Schichtsystemanalyse.....	33
Abb. 34: Probe aus Schnittversuchen.....	33
Abb. 35: EDX-Ergebnisse.....	34
Abb. 36: Prozessabläufe zur Entfernung von störenden Rückständen.....	35
Abb. 37: Selektive Phasenauflösung.....	36
Abb. 38: Nd-Fe-B-Oberfläche vor (a) und nach (b) der Vorbehandlung mit Salpetersäure + Korrosionsinhibitor.....	36

Abb. 39: Querschliff durch eine vernickelte Probe.....	36
Abb. 40: links: Magnetoberfläche wie getrennt, rechts: Magnetoberfläche gebeizt.....	37
Abb. 41: Zinkphosphatierte Magnetoberfläche.....	38
Abb. 42: Magnetpulver aus Altmagneten (nach Wasserstoffverspödung).....	39
Abb. 43: Entmagnetisierungskurven der Sintermagnete mit variierendem Rezyklatanteil .	39
Abb. 44: Schematischer Ablauf des dHDDR-Prozesses.....	40
Abb. 45: REM Aufnahmen des Pulvers nach HD- und nach zusätzlicher dHDDR-Prozessierung	41
Abb. 46: Entmagnetisierungskurven (leichte und schwere Achse) von isotropem und anisotropem dHDDR-Pulver.....	41
Abb. 47: Remanenz $\mu_0 M_r$ (links) und Koerzitivfeldstärke $\mu_0 H_c$ (rechts) der in Wachs eingebetteten dHDDR prozessierten Pulver in Abhängigkeit von Prozessdruck und –Temperatur. ....	42
Abb. 48: Entmagnetisierungskurven kunststoffgebundener Magnete bestehend aus Epoxidharz und kommerziellem MQ-Magnetpulver bzw. HDDR prozessiertem Altmagnetmaterial .	42
Abb. 49: Schematische Darstellung der magnetischen Ausrichtung eines anisotropen/ isotropen Magnetpartikels. ....	43
Abb. 50: Versuchsreihe zum Einfluss der Partikelgröße auf die magnetischen Eigenschaften der Magnete.....	44
Abb. 51: Entmagnetisierungskurven der reinen Magnetlegierung A und der Mischlegierung. ...	45
Abb. 52: Entmagnetisierungskurven der Mischlegierung prozessiert bei unterschiedlichen Parametern. ....	45
Abb. 53: Zusammenstellung der Remanenzen $\mu_0 M_r$ und Koerzitivfeldstärken $\mu_0 H_c$ in Abhängigkeit von Prozessdruck- und Temperatur. ....	46
Abb. 54: Zellaufbau und Elektrodenanordnung .....	48
Abb. 55: Flussschema des Elektrolyseprozesses. ....	48
Abb. 56: Zykelvoltamogramm eines KCl-LiCl-NdCl <sub>3</sub> -Elektrolyten auf einer Wolfram-Elektrode bei 500 °C.....	49
Abb. 57: Elektrolyse bei konstantem Strom.....	50
Abb. 58: REM-Bild des Elektrolyseprodukts .....	51
Abb. 59: Abscheidungsmechanismus und dessen Veränderung im Verlauf der Elektrolyse.....	53
Abb. 60: Magnete mit einer Ni/Cu-Beschichtung vor (links) und nach dem HD-Prozess (rechts).	54
Abb. 61: Mikroskopische Aufnahme (100-fach im Phasenkontrast) der Batch-Ansätze mit Magnetpulver.....	57
Abb. 62: REM mit EDX Aufnahmen eines mit Eisen umlagerten Schwefelpartikels.....	57
Abb. 63: Parameterverlauf der Kultivierung und des Bioleachingprozesses.....	58
Abb. 64: Entwicklung eines möglichen nachgeschalteten Aufbereitungsprozess von Bioleachinglösungen von Magnetmaterial. ....	59

Abb. 65: links: Reaktionen der Chlorierung und der Carbochlorierung; rechts: Schematische Darstellung des Laboraufbaus. ....	60
Abb. 66: Laboraufbau zur (Carbo-)Chlorierung von Magnetproben. ....	61
Abb. 67: Untersuchte Magnetproben. ....	61
Abb. 68: Reaktionsgleichung Chlorierung von metallischen Magneten. ....	62
Abb. 69: Reaktionsgleichung Carbochlorierung von oxidiertem Magnetmaterial. ....	63
Abb. 70: Carbochlorierung von Kohlenstoff/Magnetmaterial. ....	64
Abb. 71: Ansatz zur ökonomischen Bewertung. ....	65
Abb. 72: Verwertungswege in Form einer Wertschöpfungskette. ....	69
Abb. 73: Input- und Outputmenge von Neodym in WEEE Sammelgruppe 3 für Deutschland ....	71
Abb. 74: Voraussichtliche Menge an Nd in der EU [eigene Berechnung]. ....	72
Abb. 75: Prognostizierte Rückflüsse an SE-Elementen aus Magnetmaterialien aus dem Automotive-Bereich. ....	73
Abb. 76: Neuinstallation und Rückbau der Leistung von Windenergieanlagen in Deutschland ..	75
Abb. 77: Prozessabfolge des Bosch-Reuse-Prozesses. ....	76
Abb. 78: Kostenverteilung des Bosch Reuse-Prozesses nach Schritten. ....	77
Abb. 79: Vereinfachte Prozessabfolge des HDDR-Prozesses. ....	78
Abb. 80: Kostenzusammensetzung des HDDR-Prozesses. ....	81
Abb. 81: Vereinfachte Prozessabfolge des Bioleaching-Prozesses. ....	81
Abb. 82: Kostenverteilung des Bioleaching-Prozesses. ....	82
Abb. 83: Vereinfachte Prozessabfolge des Carbochlorierung-Prozesses. ....	83
Abb. 84: Vereinfachte Prozessabfolge der Schmelzflusselektrolyse. ....	84
Abb. 85: Neodymoxid Preis und Bedarf ....	86
Abb. 86: Phasen einer Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040:2009. ....	87
Abb. 87: Schematisches Flussdiagramm eines Gesamtprozesses (a) in einzelnen Prozessschritten und (b) als Black Box. ....	88
Abb. 88: Schematisches Prozessschema <i>Dismantling and Reuse</i> . ....	92
Abb. 89: Beiträge der vier Prozessschritte des <i>Dismantling and Reuse</i> -Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien für das Szenario „oberes Limit“ ....	93
Abb. 90: Einfluss der für Prozessschritt 1 definierten drei Szenarien auf die betrachteten Wirkungskategorien ....	94
Abb. 91: Schematisches Prozessschema <i>dHDDR</i> . ....	95
Abb. 92: (a) Beiträge der vier Prozessschritte des <i>dHDDR</i> -Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien. (b) Ausschnitt, bei dem nur die Einzelprozesse Sandstrahlen, HD-Prozess und Einbetten in Kunststoff dargestellt sind. ....	96
Abb. 93: Einfluss der Ofenleistung im Prozessschritt 3 ( <i>dHDDR</i> ) auf die Wirkungskategorien. ....	97

Abb. 94: Einfluss der Zeit im Prozessschritt 3 (dHDDR) auf die Wirkungskategorien .....	97
Abb. 95: Schematisches Prozessschema <i>Schmelzflusselektrolyse</i> . .....	98
Abb. 96: Beiträge der vier Prozessschritte des <i>Schmelzflusselektrolyse</i> -Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien. ....	98
Abb. 97: Schematisches Prozessschema <i>Bioleaching</i> . .....	99
Abb. 98: Beiträge der vier Prozessschritte des <i>Bioleaching</i> -Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien. ....	100
Abb. 99: Schematisches Prozessschema <i>Carbochlorierung</i> . ....	101
Abb. 100: Beiträge der vier Prozessschritte des <i>Carbochlorierung</i> -Gesamtprozesses zu den betrachteten Wirkungskategorien. ....	101

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einteilung der Sortierfraktionen (Cluster) nach einzelnen Gerätetypen .....	6
Tab. 2: Zusammensetzung der bei der Zerlegung entnommenen Magnete .....	8
Tab. 3: Tabellarische Darstellung des Erlöspotentials einer demontierten Festplatte .....	14
Tab. 4: Vergleich der magnetischen Eigenschaften von Neu- und Altmagneten eines Rotak-Motors.....	24
Tab. 5: Bewertung einzelner Designelemente anhand der Zerlegung SMG180. ....	25
Tab. 6: Chemische Zusammensetzung der für die Mischreihe verwendeten Altmagnete.....	44
Tab. 7: Ergebnisse der REM-EDX Analyse: Neodymkristall (a) und Matrix (b) aus Abb. 58.....	51
Tab. 8: Zusammensetzung des Produkts direkt aus der Elektrolyse und nach verschiedenen Reinigungsverfahrenen .....	52
Tab. 9: Leachingeffizienzen eines Bioleaching-Prozesses von Magnetpulver mit einer Auswahl verschiedener Reinkulturen und abiotischen Kontrolle. ....	56
Tab. 10: Leachingeffizienzen eines Bioleaching-Prozesses von Magnetmaterial in verschiedenen Form mit einer Reinkultur. ....	58
Tab. 11: Elementaranalysen der untersuchten Magnetproben. ....	62
Tab. 12: Elementaranalyse der Produktfraktionen; Rohprodukte nach Chlorierung. ....	63
Tab. 13: Elementaranalyse des oxidierten Magnetmaterials. ....	64
Tab. 14: Elementaranalyse der Produktfraktionen; Rohprodukte nach Carbochlorierung. ....	65
Tab. 15: LCC Fragebogen in Anlehnung an die VDMA 34160). ....	67
Tab. 16: Spezifischer Anteil Neodym bei ausgewählten Produkten.....	72
Tab. 17: Datengrundlage für Produkte aus dem Windenergiemarkt.....	74
Tab. 18: Kostenart und -höhe Carbochlorierung-Prozesses.....	83
Tab. 19: Kostenart und -höhe der Schmelzflussanalyse.....	84

Tab. 20: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess <i>Dismantling and Reuse</i> .....	113
Tab. 21: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess <i>dHDDR</i> .....	114
Tab. 22: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess <i>Schmelzflusselektrolyse</i> .....	114
Tab. 23: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess <i>Bioleaching</i> .....	115
Tab. 24: Verwendete Sachbilanzdaten für den Prozess <i>Carbochlorierung</i> .....	116