

DIGITALES ARCHIV

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Schönfeldt, Mario; Diehl, Oliver; Gassmann, Jürgen

Book

Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland : Auftragsstudie

Provided in Cooperation with:

DERA - Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin

Reference: Schönfeldt, Mario/Diehl, Oliver et. al. (2024). Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland : Auftragsstudie. Datenstand: Juli 2024. Berlin : Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffinformationen-60.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
doi:10.25928/s7mb-e986.

This Version is available at:

<http://hdl.handle.net/11159/701126>

Kontakt/Contact

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft/Leibniz Information Centre for Economics
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel (Germany)
E-Mail: [rights\[at\]zbw.eu](mailto:rights[at]zbw.eu)
<https://www.zbw.eu/>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument darf zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen. Sofern für das Dokument eine Open-Content-Lizenz verwendet wurde, so gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

<https://savearchive.zbw.eu/termsfuse>

Terms of use:

This document may be saved and copied for your personal and scholarly purposes. You are not to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public. If the document is made available under a Creative Commons Licence you may exercise further usage rights as specified in the licence.

60 DERA Rohstoffinformationen

Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland

Auftragsstudie

 **Fraunhofer**
IWKS



Impressum

Editor:

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin

Autoren:

Mario Schönfeldt, Oliver Diehl, Jürgen Gassmann

Adresse:

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
Aschaffener Straße 121
63457 Hanau

Kontakt DERA:

Marius Kern (marus.kern@bgr.de)
Britta Bookhagen (britta.bookhagen@bgr.de)

Bildnachweise: © iStock ZU_09 (Titelbild)

Layout: deckermedia GbR, Graal-Müritz

Zitierhinweis: SCHÖNFELDT, M., DIEHL, O. & GASSMANN, J. (2024): Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland. – DERA Rohstoffinformationen 60: 45 S., Berlin.

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

Datenstand: Juli 2024

ISBN Druckversion: 978-3-948532-95-6

ISBN PDF: 978-3-948532-96-3

ISSN: 2193-5319

DOI: 10.25928/s7mb-e986

Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland

Im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin



Vorwort

Dauermagnete, insbesondere Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB), sind ein unverzichtbarer Bestandteil vieler moderner Technologien für die Energie- und Mobilitätswende. Aufgrund ihres herausragenden Stellenwerts für die europäische Wirtschaft wird das Recycling von NdFeB-Magneten auch im Critical Raw Materials Act (CRMA) der Europäischen Union thematisiert. Der Bedarf an Elementen für diese Dauermagnete wird in Europa in den kommenden Jahren aufgrund der vielfältigen Anwendungen weiter steigen. Daher wird auch das Recycling in Europa eine zunehmende Rolle spielen.

Mit Bezug auf die Rohstoffstrategie der Bundesregierung aus den Jahren 2010 und 2020 und den darin vereinbarten Maßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit für die deutsche Industrie führt die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) ein Monitoring von primären Rohstoffen und von Recyclingrohstoffen durch.

Die vorliegende Studie der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS ist Teil des DERA-Rohstoffmonitorings und wurde im Auftrag der DERA erstellt. Sie gibt einen umfassenden Einblick über den aktuellen Stand des Recyclings von NdFeB-Magneten in Deutschland, dem wichtigsten Typ von Dauermagneten. Dabei liegt der Fokus auf der Darstellung der technischen Prozesse des Recyclings am Ende ihres Lebenszyklus.

Die Inhalte der Studie ermöglichen es, die Herausforderungen und Chancen bei der Entwicklung der Recyclingprozesse von NdFeB-Magneten besser zu verstehen und Lösungsansätze für eine nachhaltige und effiziente Nutzung aufzuzeigen. Sollte es gelingen, NdFeB-Magnete in Zukunft effizient zu recyceln, wäre dies für Deutschland und die Europäische Union ein entscheidender – und dringend notwendiger – Schritt zur Diversifizierung der Versorgung mit Seltenen Erden.

Dr. Peter Buchholz,
Leiter der DERA

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1. Einleitung	8
2. Recycling und Reuse	11
2.1 Grundlagen des Recyclings und Erläuterung der gängigen Verfahren	11
2.2 Recyclingpotenziale	17
3. Wertschöpfung und Handel	20
3.1 Untersuchung des Handels	20
3.2 Logistische Herausforderungen	21
3.3 Rechtliche Voraussetzungen	23
4. Preise	25
5. Umsetzung von Recyclingverfahren	27
5.1 Industrielle Umsetzung	28
5.2 Forschungseinrichtungen	38
6. Fazit	40
7. Literaturverzeichnis	41

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Energiedichte $(BH)_{\max}$ in kJ/m^3 und MGOe unterschiedlicher Permanentmagnetwerkstoffe und ihre historische Entwicklung	8
Abb. 2:	Wertmäßige Verteilung der weltweiten Permanentmagnetproduktion im Jahre 2022 (Gesamtwert: 23 Milliarden US-Dollar)	9
Abb. 3:	Wertschöpfung, Produktionsschritte und unterschiedliche Recyclingmethoden bei der Herstellung von NdFeB-Sintermagneten	11
Abb. 4:	Schematische Darstellung der Funktionsweise der Wasserstoffversprödung	13
Abb. 5:	Prozessschema des HDDR-Verfahrens und resultierende polykristalline Mikrostruktur	13
Abb. 6:	Beispiel eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete	14
Abb. 7:	Beispiel eines pyrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete	15
Abb. 8:	Mögliche Verwertungsrouten von Altmagneten oder Produktionsabfällen mit den zur Anwendung kommenden Technologien	16
Abb. 9:	Kommerziell erhältliche NdFeB-Magnetklassen (engl. grades) mit Angabe typischer magnetischer Kenngrößen und Einsatztemperaturen	22
Abb. 10:	Preisentwicklung der Elemente Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) mit einer Reinheit von 99 % seit Januar 2004 (BGR).	25
Abb. 11:	Vergleich der Rohstoffkosten zur Herstellung eines exemplarischen NdFeB-Magneten aus Primärmaterial und Recyclingrohstoffen in den Jahren 2017 und 2022	26

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Typische Legierungsbestandteile von NdFeB-Magneten und ihre Wirkung	9
Tab. 2:	Hauptanwendungsgebiete und enthaltene Menge an NdFeB-Magnetwerkstoffen	10
Tab. 3:	Übersicht über die Vor- und Nachteile von Reuse und Recyclingverfahren	15
Tab. 4:	Recyclingpotenziale ausgewählter SE-Magnet-Materialströme mit Ausblick auf die zukünftige Entwicklung	18
Tab. 5:	Mögliche Warengruppen im Bereich Magnetrecycling	20
Tab. 6:	Informationen Heraeus REMLOY GmbH	28
Tab. 7:	Informationen HyProMag GmbH	29
Tab. 8:	Informationen RockLink GmbH	30
Tab. 9:	Informationen Lars Walch GmbH & Co. KG	31
Tab. 10:	Informationen Carester	32
Tab. 11:	Informationen MagREESource	33
Tab. 12:	Informationen Noveon Magnetics	34
Tab. 13:	Informationen REEcycle	35
Tab. 14:	Informationen Cyclic Materials	36
Tab. 15:	Informationen Geomega Resource Inc	37

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
AlNiCo	Aluminium-Nickel-Kobalt
(BH) _{max}	Maximale Energiedichte
Co	Kobalt
Dy	Dysprosium
EoL	End-of-Life (Ende des Lebenszyklus)
Gd	Gadolinium
HD	Hydrogen Decrepitation (Wasserstoffversprödung)
HDD	Hard Disk Drive (Festplatte)
HDDR	Hydrogenation Disproportionation Desorption and Recombination (die deutsche Übersetzung „Hydrierung Disproportionierung Desorption und Rekombination“ wird üblicherweise nicht verwendet)
kg/MW	Kilogramm pro Megawatt
kJ/m ³	Kilojoule pro Kubikmeter
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MGOe	Mega-Gauss-Oersted
MRT	Magnetresonanztomographie
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
Pr	Praseodym
SE	Seltene Erden
SE-Magnete	Seltenerd magnete, hier für Seltenerdpermanentmagnete auf der Basis von NdFeB und SmCo verwendet
SSD	Solid State Drive (Festplatte)
SmCo	Samarium-Kobalt
Tb	Terbium

Zusammenfassung

Unter den kommerziell erhältlichen Permanentmagnetwerkstoffen weisen Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) die höchste Energiedichte auf. Diese Eigenschaft macht sie zur mit Abstand bedeutendsten Magnetart. NdFeB-Magnete spielen eine wichtige Rolle in verschiedenen industriellen Anwendungen, darunter Elektromotoren, Windkraftanlagen und elektronische Geräte.

Recyclingprozesse für NdFeB-Magnete werden in werkstoffliches und rohstoffliches Recycling kategorisiert. Das werkstoffliche Recycling hat den Vorteil eines geringeren Energieverbrauchs im Vergleich zum rohstofflichen Recycling. Es eignet sich in besonderem Maße zur Herstellung von recycelten Magneten. Das rohstoffliche Recycling ist zwar prozessintensiver, ermöglicht jedoch die Rückgewinnung von Seltenen Erden und ist auf eine breitere Palette von magnethaltigen Abfallströmen anwendbar. Die direkte Wiederverwendung von Magneten ist zwar die nachhaltigste Option, allerdings ist diese in vielen Fällen nicht umsetzbar.

Unter Berücksichtigung verschiedener Quellen wie Elektronikschrott, Windkraftanlagen und Automobilanwendungen lässt sich das Recyclingpotenzial von NdFeB-Magneten in Deutschland und Europa abschätzen, wobei die erwarteten Tonnagen teilweise weit auseinanderliegen. Um die Recyclingquoten zu steigern, ist die Einrichtung effektiver Sammel- und Rücknahmesysteme für NdFeB-Magnete erforderlich. Derzeit ist in Deutschland kein nennenswerter Handel mit End-of-Life-NdFeB-Magneten zu verzeichnen. Zudem ist das Recycling von NdFeB-Magneten mit logistischen Herausforderungen verbunden. Dazu zählen die Heterogenität der Abfallströme, unterschiedliche Lebenszyklen von Produkten, die Magnete enthalten, sowie die Schwierigkeit, die Demontage kleiner Komponenten zu automatisieren. Der Preis für recycelte Magnete ist eng mit dem Preis für Primärmagnete verknüpft, der wiederum stark von den Preisen für Seltenerdelemente beeinflusst wird. Die Studie präsentiert eine Übersicht von Unternehmen und Start-ups in Deutschland und darüber hinaus, die sich mit dem Recycling von Magneten befassen.

1. Einleitung

Seltenerdpermanentmagnete (SE-Magnete) werden aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften in zahlreichen industriellen Anwendungen wie Elektromotoren, Generatoren von Windkraftanlagen oder diversen Elektronikgeräten eingesetzt. Aufgrund ihrer begrenzten Verfügbarkeit und der ökologischen Herausforderungen beim Abbau und der Gewinnung der Rohstoffe sind nachhaltige Recyclinglösungen von großer Bedeutung.

Die maximale Energiedichte $(BH)_{\max}$ ist ein wichtiger Indikator für die Stärke eines Dauermagnetwerkstoffes. Sie wird in kJ/m^3 (Kilojoule pro Kubikmeter) oder MGOe (Mega-Gauss-Oersted) angegeben. Die maximale Energiedichte von Dauermagneten hat sich im Laufe der Zeit stark verändert. Vor etwa 100 Jahren, waren Magnete nicht besonders leistungsstark. Zum Beispiel hatten Stahlmagnete nur eine maximale Energiedichte von ungefähr 8 kJ/m^3 . In der Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurden Ferrite (bis 24 kJ/m^3) und Aluminium-Nickel-Kobalt-Magnete (AlNiCo; bis 80 kJ/m^3) entwickelt. Seit den 1960er Jahren sind große Fortschritte durch die Entwicklung der SE-Magnete gemacht worden. Insbesondere Magnete auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor (NdFeB), weisen mit einer maximalen

Energiedichte von etwa 445 kJ/m^3 bei Raumtemperatur die höchsten Werte von allen Permanentmagnetwerkstoffen auf (Abbildung 1). Sie sind dadurch in vielen Anwendungen bei denen es auf Effizienz, Gewichtsreduktion oder geringe Baugröße ankommt nicht ohne Verluste substituierbar.

Im Jahr 2022 wurden weltweit Permanentmagnete mit einem Nettowert von 23 Milliarden US-Dollar hergestellt (ORMEROD et al. 2023). Dabei entfielen 58 % des erwirtschafteten Betrages auf NdFeB-Magnete, 33 % auf Ferrit-Werkstoffe und 6 % auf kunststoffgebundene NdFeB-Magnete, die in eine Matrix aus beispielsweise Epoxidharz (Pressverfahren) oder Polyamid (Spritzguss) eingebettet sind. Kunststoffgebundene NdFeB-Magnete bieten einige Vorteile gegenüber herkömmlichen gesinterten NdFeB-Magneten, darunter eine höhere Flexibilität in Bezug auf Design und Formgebung. Sie sind jedoch in der Regel weniger magnetisch stark und haben eine niedrigere maximale Einsatztemperatur im Vergleich zu gesinterten Magneten (ORMEROD & CONSTANTINIDES 1997, SCHÄFER et al. 2023). AlNiCo- oder Samarium-Kobalt (SmCo)-Magnete besitzen mit jeweils 1 % lediglich einen

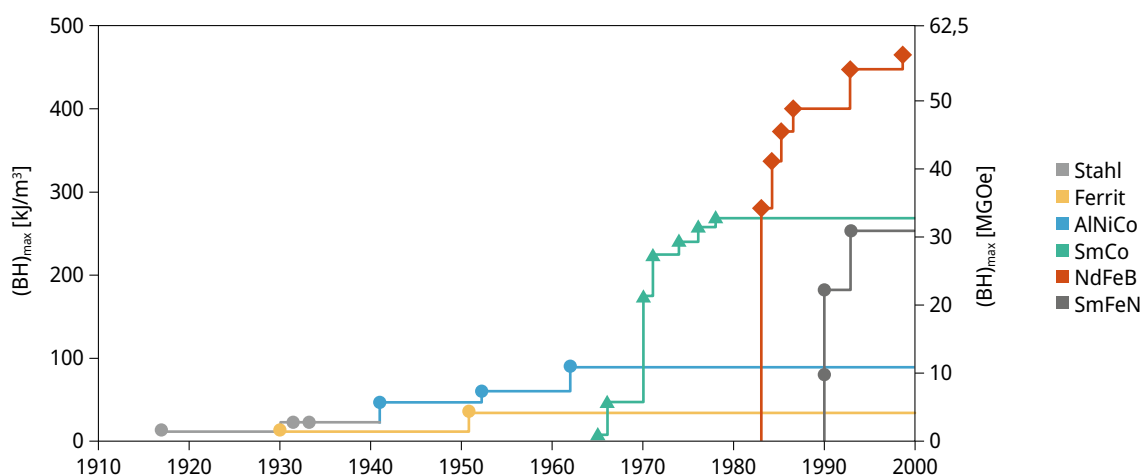


Abb. 1: Energiedichte $(BH)_{\max}$ in kJ/m^3 und MGOe unterschiedlicher Permanentmagnetwerkstoffe und ihre historische Entwicklung. Eigene Darstellung nach GUTFLEISCH et al. (2011)

sehr geringen Marktanteil (Abbildung 2). Wegen ihrer mengenmäßigen Verbreitung, den hohen Materialkosten und ihrer herausragenden Eigenschaften konzentrieren sich die industriellen Recyclingbestrebungen im Bereich Permanentmagnete auf NdFeB-Magnete.

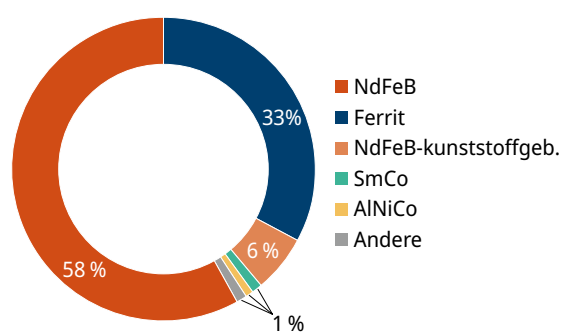


Abb. 2: Wertmäßige Verteilung der weltweiten Permanentmagnetproduktion im Jahre 2022 (Gesamtwert: 23 Milliarden US-Dollar). Eigene Darstellung nach BENECKI et al. (2021) in ORMEROD et al. (2023)

NdFeB-Magnete bestehen zu 60 – 70 % aus Eisen, 30 – 32 % Seltenen Erden (hauptsächlich Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium) und 1 % Bor mit Zusätzen an Gadolinium, Kobalt, Kupfer, Aluminium, Gallium und Niob um die magnetischen und physikalischen Eigenschaften zu verbessern. Einen Überblick über typische Zusammensetzungen von NdFeB-Magneten und die Wirkung der einzelnen Elemente gibt Tabelle 1.

Im Gegensatz dazu weisen $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -Magnete einen Samariumgehalt von ca. 25 – 28 % auf und bestehen zu 45 – 50 % aus Kobalt, 14 – 22 % Eisen, sowie 3 – 12 % Kupfer und 1 – 3 % Zirkonium. SmCo_5 -Magnete bestehen zu 36 % aus Samarium und 64 % Kobalt.

SE-Magnete, insbesondere NdFeB-Magnete, finden in zahlreichen Anwendungen von Smartphones bis hin zu Windkraftanlagen Verwendung. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und notwendigen Eigenschaften unterscheiden sich die enthaltenen Magnete hinsichtlich ihrer

Tab. 1: Typische Legierungsbestandteile von NdFeB-Magneten und ihre Wirkung (nach YANG et al. 2017, KUMARI & SAHU 2023). Die Summenformel für NdFeB-Magnete wird vereinfacht als $\text{SE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ dargestellt, da es sich hierbei um die hartmagnetische Phase des Magneten handelt

Element	Gehalt [Gew. %]	Wirkung
Fe	60–70	Bildung der hartmagnetischen $\text{SE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Phase
Nd	20–30	
Pr	0,5–7	
B	0,3–1	
Dy	0,2–6	Verbesserung Temperaturbeständigkeit, Erhöhung der Koerzitivfeldstärke
Tb	0,2–2	
Gd	0,1–3	Verbesserung des Temperaturkoeffizienten
Co	0,4–3	Erhöhung der Curie-Temperatur, Verbesserung des Korrosionsverhaltens
Cu	0,1–0,9	Verbesserung des Sinterverhaltens
Al	0,1–0,9	
Ga	0,1–0,3	Erhöhung der Koerzitivfeldstärke und Heißumformbarkeit der Legierung
Nb	0,1–0,3	Kornfeinung

Masse und chemischen Zusammensetzung teilweise erheblich. Als Hauptanwendungsgebiete sind Elektromobilität (24 %), Unterhaltungselektronik (21 %), Windturbinen (9 %), Klimatechnik (8 %), HDD-Festplatten (4 %), akustische Wandler (5 %) und Robotik (1 %) zu nennen. 28 % entfallen auf sonstige Anwendungen (ROSKILL 2020). Dabei reicht die Menge der enthaltenen Magnete von wenigen Gramm im Falle der HDD-Festplatte, bis hin zu mehreren Tonnen in den getriebelosen Offshore-Windkraftanlagen (vgl. Tabelle 2).

Ziel dieser Studie ist es, den aktuellen Stand des Recyclings von NdFeB-Magneten in Deutschland zu erfassen. Dabei sollen die grundlegenden technischen Prozesse des Recyclings dieser SE-Magneten am Ende ihres Lebenszyklus (engl. End-of-Life, kurz „EoL“), sowie die Wertschöpfung und Preisbildung beim Handel mit diesen SE-Magneten berücksichtigt werden. Darüber hinaus soll die Studie einen groben Ausblick auf die zukünftige Entwicklung bis 2030 geben.

Tab. 2: Hauptanwendungsgebiete und enthaltene Menge an NdFeB-Magnetwerkstoffen (REIMER et al. 2018). Getriebelose Windkraftanlagen werden auch als direkt angetrieben bezeichnet (direct drive). Hybride Anlagen sind Windkraftanlagen mit einem niedrig übersetzenden Getriebe ohne störanfällige Kupplung (MARSCHEIDER-WEIDEMANN et al. 2021)

Anwendung	Mittlere Magnetmasse
Windkraft (Getriebelos)	650 kg/MW
Windkraft (Hybrid)	160 kg/MW
MRT	2,5 t
Elektrofahrzeug	2,5 kg
Hybridfahrzeug	1,5 kg
E-Bike	270 g
HDD	6 g

2. Recycling und Reuse

2.1 Grundlagen des Recyclings und Erläuterung der gängigen Verfahren

In Folge der SE-Krise im Jahre 2011 wurden weltweit die Forschungsaktivitäten zum Recycling von leistungsstarken SE-Magneten verstärkt. Heutzutage lassen sich die unterschiedlichen Recyclingverfahren in zwei Gruppen einteilen: das werkstoffliche Recycling (auch funktionales

Recycling, direktes Recycling oder short loop Recycling genannt) und rohstoffliches Recycling (auch elementares Recycling, indirektes Recycling oder long loop Recycling genannt). Die Verfahren beider Gruppen (Abbildung 3) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Prozesse, der damit einhergehenden notwendigen Anlagentechnik, der notwendigen Chemikalien und ihres Endproduktes (GAUß et al. 2015, SCHÖNFELDT et al. 2018). Auch lassen sich nicht alle Magnete oder magnethaltigen Wertstoffströme mit je-

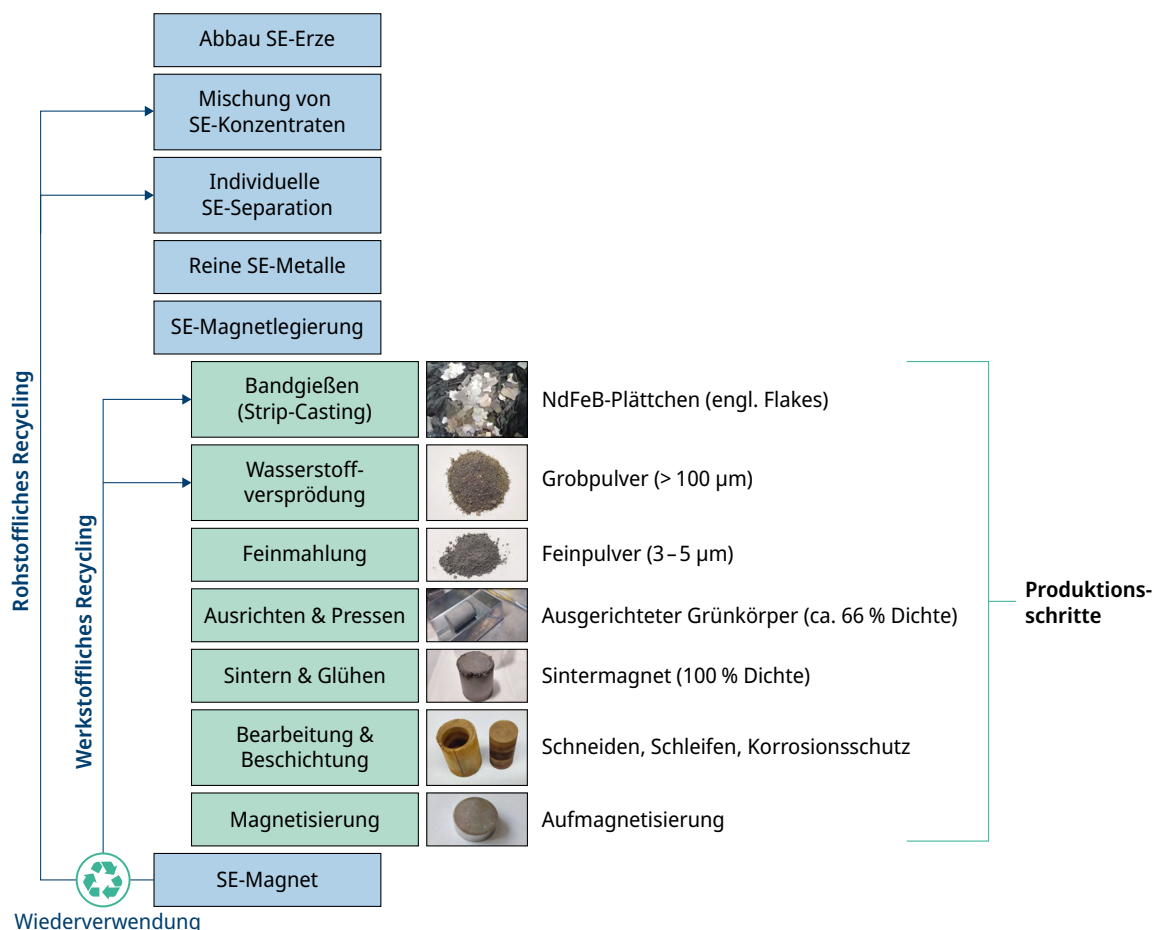


Abb. 3: Wertschöpfung, Produktionsschritte und unterschiedliche Recyclingmethoden bei der Herstellung von NdFeB-Sintermagneten. Eigene Darstellung, teilweise basierend auf GAUß & GUTFLEISCH (2016). Aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität der Seltenen Erden finden die Prozessschritte von Bandgießen bis Sintern & Glühen unter Schutzgas-Atmosphäre oder Vakuum statt

dem Verfahren recyceln. Verglichen mit dem Recycling ist eine Wiederverwendung (engl. Reuse) der EoL-Magneten in neuen Anwendungen eine noch nachhaltigere Lösung. Im Folgenden werden die jeweiligen Vor- und Nachteile der Verfahren sowie die dazugehörigen Prozesse und Materialien näher beschrieben.

Reuse (Wiederverwendung)

Beim Reuse werden die Magnete nicht zerstört um im Anschluss recycelt zu werden, sondern lediglich entmagnetisiert, gereinigt und eventuell in eine neue Form oder Geometrie geschnitten. Bei der direkten Wiederverwendung können die Magnete nach dem Aufbringen einer neuen Korrosionsschutzschicht in neue Anwendungen eingesetzt und magnetisiert werden. Voraussetzung für eine solche Wiederverwendung ist die Sammlung einer ausreichend großen Menge an Altmagneten und die Identifizierung passender neuwertiger Anwendungen mit passenden Anforderungen an die Materialeigenschaften.

Werkstoffliches Recycling

Kennzeichen aller Verfahren, die zu den werkstofflichen Recyclingmethoden gehören, ist das Ziel aus Altmagneten oder Produktionsabfällen recycelte Magnetmaterialien herzustellen. Im Gegensatz zur Wiederverwendung werden die Altmagnete aufbereitet und deren physikalischen Eigenschaften verändert, um anschließend in gleichartigen Produktionsprozessen für den ursprünglichen oder einen anderen Zweck verwendet zu werden. Dabei wird die gesamte Magnetlegierung verwendet, wobei die chemische Zusammensetzung nur geringfügig durch die Zugabe von Additiven verändert wird. Die resultierenden magnetischen Eigenschaften sind daher zum Teil abhängig von der Mikrostruktur und der chemischen Zusammensetzung der Altmagnete. Die Verfahren und Prozessschritte des werkstofflichen Magnetrecyclings sind weiterhin ähnlich der bei der Primärproduktion zur Anwendung kommenden Prozesse (vgl. Ab-

bildung 3), wodurch diese Verfahren einfacher in die bestehenden Produktionslinien integrierbar sind. Anwenden lassen sich diese Verfahren auf saubere, nicht oxidierte Magnetstoffströme, sind jedoch wegen der enthaltenen Verunreinigungen nicht für geschredderte Materialien geeignet. Als Ausgangsmaterialien für das werkstoffliche Recycling eignen sich Sintermagnete oder heißumgeformte Magnete. Kunststoffgebundene Magnete eignen sich hingegen nicht für diese Verfahren. Der Grund ist die schwierige Trennung des Kunststoffs vom Magnetmaterial. Diese ist bei den gepressten kunststoffgebundenen Magneten (Epoxidharz) noch nicht effektiv möglich. Gespritzte kunststoffgebundene Magnete werden während der Produktion in geringen Mengen teilweise direkt wieder eingeschmolzen und recycelt. Aber in der Regel müssen beide Arten von Magneten rohstofflich bzw. nasschemisch recycelt werden.

Zu den Verfahren des werkstofflichen Recyclings gehören (1) die Wasserstoffversprödung (engl. Hydrogen Decrepitation, HD), (2) das HDDR-Verfahren (engl. Hydrogenation Disproportionation Desorption and Recombination), (3) das Umschmelzen und (4) das Melt-Spinning-Verfahren (YANG et al. 2017).

Bei der **Wasserstoffversprödung** von Altmagneten werden die SE-Permanentmagnete in einer Wasserstoffatmosphäre zu einem groben Pulver versprödet. Dieser Prozess ist ähnlich der Versprödung von Strip-Cast-Flakes oder Legierungen bei der Primärproduktion (McGUINNESS & HARRIS 1988). Um Verunreinigungen auszugleichen wird dem Grobpulver in der Regel ein kleiner Prozentsatz an Seltenen Erden z. B. als Hydrid hinzugegeben. Anschließend erfolgt die gemeinsame Vermahlung auf Sinterfeinheit (ca. 3–5 µm), die Ausrichtung der Pulverpartikel in einem externen Magnetfeld, das Pressen zu einem Grünkörper und das Sintern und Glühen zum vollverdichteten Sintermagneten. All diese Prozessschritte sind sehr ähnlich zur Herstellung von Primärmagneten (JIN et al. 2016, JIN et al. 2018), wodurch sich dieses Recyclingverfahren gut in die Primärproduktion einfügen lässt. Die Versprödung des Altmagneten unter Wasser-

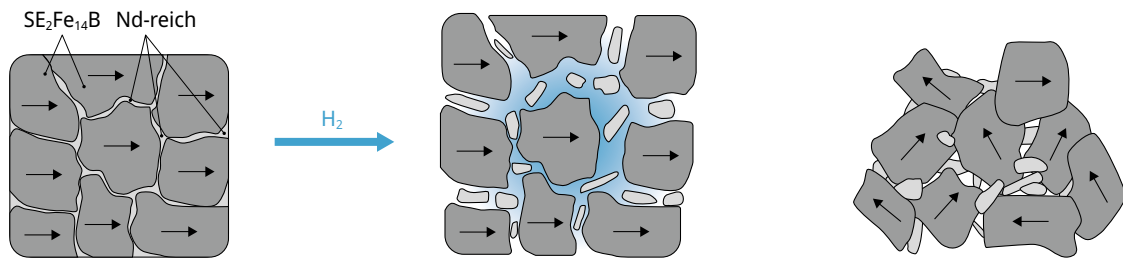


Abb. 4: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Wasserstoffversprödung.
Eigene Darstellung nach GAUß et al. (2015)

stoffeinfluss beruht auf einer Reaktion der SE-reichen Phasen mit dem H_2 -Gas. Das Gefüge eines NdFeB-Magneten besteht aus der ferromagnetischen $SE_2Fe_{14}B$ -Phase, welche von SE-reichen Zwischenkorn- und Korngrenzphasen umgeben ist. Diese SE-reichen Phasen reagieren mit dem in den Magnetwerkstoff diffundierenden Wasserstoff zu einem SE-Hydrid. Die damit einhergehende Volumenexpansion führt zu Rissen entlang der Korngrenzen und schließlich zur Versprödung des Magneten zu einem groben Pulver (vgl. Abbildung 4). Da nur der SE-Magnet mit dem Wasserstoff reagiert, kann dieses Verfahren auch dazu verwendet werden um Magnet- von Stahl- oder Kupferschrott zu trennen (WALTON et al. 2015). Sind die Magnete verklebt oder vergraben, werden sie in der Regel vor der

Wasserstoffversprödung vom restlichen Material demontiert, entschichtet, gereinigt und zu einem groben Pulver prozessiert.

Beim **HDDR-Verfahren** wird der Altmagnet ebenfalls unter einer Wasserstoffatmosphäre prozessiert, jedoch unterscheidet sich dieses Verfahren zur reinen Wasserstoffversprödung (HD) durch andere Prozessdrücke und höhere Temperaturen im Bereich von $750-950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (HABIBZADEH et al. 2023). Auch die resultierende Mikrostruktur des Magnetpulvers ist im Vergleich zum HD-Prozess deutlich feiner und weist polykristalline Körner mit mehreren magnetischen Momenten auf (vgl. Abb. 5). Diese Pulver werden daher zur Herstellung von isotropen (un- ausgerichtete) oder anisotropen (ausgerichtete)

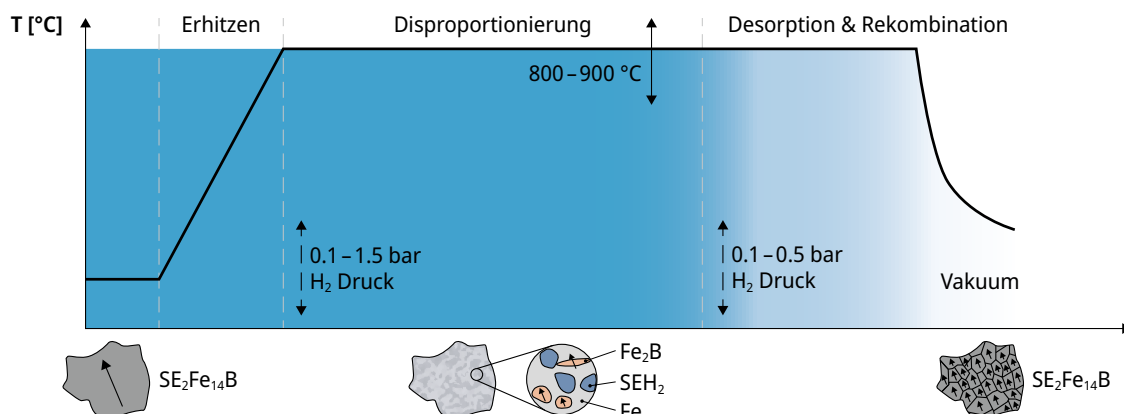


Abb. 5: Prozessschema des HDDR-Verfahrens und resultierende polykristalline Mikrostruktur. Eigene Darstellung nach GAUß et al. (2015). Bei der Disproportionierung wird die $SE_2Fe_{14}B$ -Phase zerlegt und nach der Desorption (Ausgasen von H_2) wieder zusammengefügt (Rekombination). Dadurch wird das Gefüge von einkristallinen Körnern zu einem feineren polykristallinen Gefüge transformiert

kunststoffgebundenen Magneten mittels Spritzgusses oder Kaltpressverfahren eingesetzt.

Beim **Umschmelzen** werden EoL-Magnete oder Produktionsabfälle induktiv aufgeschmolzen. Dieses Verfahren wird bereits industriell bei der Herstellung von Sintermagneten eingesetzt. Die so hergestellten Bandguss-Flocken (engl. Strip-Cast Flakes) können mit den nachfolgenden Primärprozessen zu Sintermagneten weiterverarbeitet werden. Durch gezielte Schlackenführung kann der Sauerstoffgehalt des Magnetmaterials von 0,2–0,5 % auf unter 0,1 % gesenkt werden, wobei jedoch mit Materialverlusten von bis zu 30 % zu rechnen ist (YANG et al. 2017).

Mittels **Schmelzspinn-Verfahren** (engl. Melt-Spinning) werden Sintermagnete zu nanokristallinen oder amorphen Bändern umgeschmolzen, die zu Pulvern gemahlen und zu kunststoffgebundenen Magneten verarbeitet werden können. Ähnlich wie beim Bandgussverfahren mittels Strip Caster, werden die Magnete hier induktiv aufgeschmolzen. Die flüssige Schmelze wird anschließend über ein rotierendes Metallrad abgekühlt. Beim Schmelzspinn-Verfahren ist die Rotationsgeschwindigkeit des Metallrades jedoch um ein Vielfaches höher, was einen Einfluss auf die Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze hat. Aufgrund der höheren Abkühlgeschwindigkeiten, kann eine nanokristalline Mikrostruktur erzeugt werden, die sich vorteilhaft auf die Koerzitivfeldstärke der Magnete auswirkt. Aufgrund der Schlackenbildung ist auch hier mit höheren Materialverlusten im Vergleich zu wasserstoffbasierten Verfahren zu rechnen.

Rohstoffliches Recycling

Das rohstoffliche Recycling verfolgt nicht den unmittelbaren Zweck der Herstellung von Recyclingmagneten, sondern hat vielmehr die Herstellung von SE-Elementen oder SE-Oxiden als Vorprodukte zum Ziel, die wiederum zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet werden können. Im Gegensatz zu den werkstofflichen Recyclingmethoden eignen sich die rohstofflichen Verfahren besser für kleinere Anwendungen und Stoff-

ströme mit unterschiedlichen Magnet-Grades (als „Grade“ wird eine Magnetklasse innerhalb der NdFeB-Legierungsfamilie bezeichnet, siehe Abbildung 9) und magnetischen Eigenschaften, sowie für geschredderte Stoffströme. Für ein wirtschaftliches Recycling ist jedoch auch hier eine gewisse Vorsortierung, Trennung und Aufkonzentrierung notwendig. Zu den rohstofflichen Recyclingverfahren gehören: (1) Hydrometallurgische Verfahren und (2) Pyrometallurgische Verfahren. Bei beiden Verfahren können für eine bessere Separation und Trennung der SE, elektrochemische Prozesse zur Anwendung kommen. Für das rohstoffliche Recycling sind neben Sintermagneten und heißumgeformten Magneten auch kunststoffgebundene Magnete verwendbar (Hydrometallurgische Verfahren).

Beim **hydrometallurgischen** Recycling werden die SE-Magnete chemisch ausgewaschen (engl. leaching) (Abbildung 6). Dabei werden die Magnete in Salzsäure (HCl) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) aufgelöst und mittels Lösemittelextraktion, Ionenaustausch oder ionischen Flüssigkeiten in die individuellen Seltenen Erden (z. B. Nd, Pr, Dy, Tb) getrennt. Nach dem Abtrennen von Verunreinigungen werden die individuellen Seltenen Erden in SE-Fluoride oder SE-Oxide überführt. Ein Nachteil dieser Verfahren sind die oft-

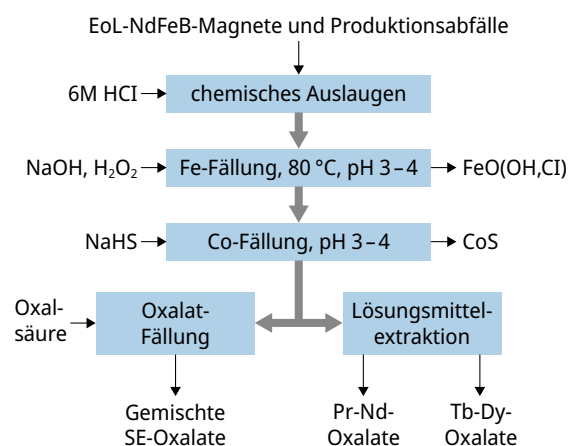


Abb. 6: Beispiel eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete. Eigene Darstellung nach ELWERT et al. (2017)

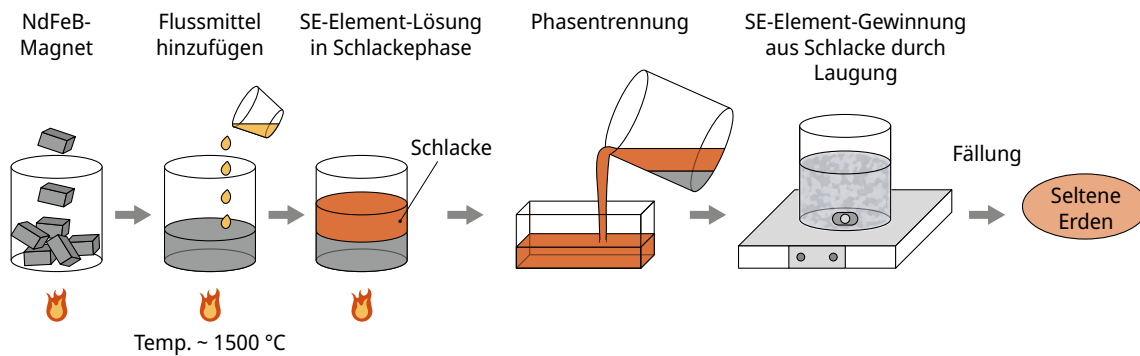


Abb. 7: Beispiel eines pyrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete.
Eigene Darstellung nach KUMARI & SAHU (2023)

mals benötigten hohen Temperaturen, um die Selektivität der SE-Elemente gegenüber Eisen (Fe) und anderen Übergangsmetallen zu erhöhen, sowie die hohen Kosten für die Extraktionsmittel.

Ziel der **pyrometallurgischen** Verfahren ist die Umwandlung der Seltenen Erden in eine Phase, die eine selektive Abtrennung vom restlichen Material erlaubt. Im Vergleich zu den hydrometallurgischen Verfahren müssen hinreichend große SE-Konzentrationen im Stoffstrom vorliegen. Es werden jedoch geringere Mengen an Wasser und Säuren benötigt, dafür höhere Temperaturen. Mittels Salzsäure-Elektrolyse oder metallothermischer Reduktion können die enthaltenen SE-Metalle hergestellt werden.

Eine anschließende SE-Extraktion kann durch Röstung, Flüssig-Metall-Extraktion, Salzsäure-Extraktion, Flüssig-Schlacken-Extraktion oder elektrochemische Prozesse erfolgen. Nach der SE-Extraktion vom restlichen Material sind jedoch weitere hydrometallurgische Verfahren wie chemisches Auslaugen (engl. leaching) notwendig (YANG et al. 2017). Ein Beispiel eines pyrometallurgischen Recyclingverfahrens ist in Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 8 gibt zusammenfassend einen Überblick über die unterschiedlichen Recyclingmethoden und ihre Prozesse. Eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Recyclingmethoden ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tab. 3: Übersicht über die Vor- und Nachteile von Reuse und Recyclingverfahren
nach BINNEMANS et al. (2013) und JIN et al. (2020)

Reuse und Recyclingverfahren	Vorteile	Nachteile
Reuse	– Ökonomischstes Verfahren, geringer Energieverbrauch – Geringer Chemikalienverbrauch – Keine Produktion von Abfall	– Nur für große und leicht zugängliche Magnete geeignet (Windturbinen, große Motoren) – Aktuell noch geringe Materialströme – Anforderungen von Altmagnet und Neuanwendung müssen passen

Reuse und Recyclingverfahren	Vorteile	Nachteile
Werkstoffliches Recycling	– Geringerer Energieverbrauch als rohstoffliche Recyclingmethoden – (Geringe bis) keine Produktion von Abfällen – Ähnliche Prozesse wie in der Primärproduktion und daher integrierbar – Höhere Nachhaltigkeit als bei rohstofflichen Recyclingmethoden erzielbar	– Demontage- und Sortierprozesse notwendig – Magnetische Eigenschaften abhängig von Qualität der Altmagnete (Oxidation) – Durch Zugabe von SE Reduktion der Remanenz um 2 bis 10 % – Nicht anwendbar bei geschredderten oder inhomogenen Stoffströmen
Rohstoffliches Recycling	– Kontaminationen und Verunreinigungen sind weniger kritisch – Mehr Freiheitsgrade im Hinblick auf Zusammensetzung und Eigenschaften – Theoretisch beste magnetischen Eigenschaften erzielbar – Anwendbar bei geschredderten Stoffströmen oder kleinen Anwendungen – Anwendbar auf alle Magnet-Zusammensetzungen (teilweise auch oxidierte Magnete)	– Im Vergleich zu werkstofflichem Recycling mehr Prozessschritte und größere Mengen an Energie (0,7 bis 1,0 kg CO₂-Äquivalent mehr), Wasser und Chemikalien notwendig, allerdings weniger als bei Produktion von Magneten aus Primärmaterial

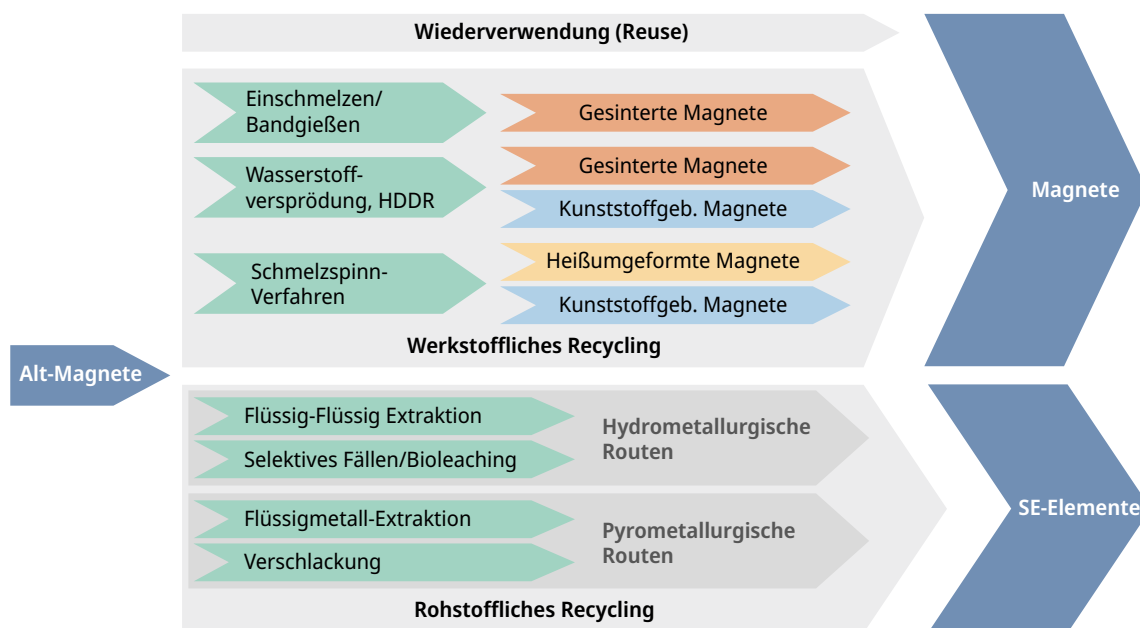


Abb. 8: Mögliche Verwertungsrouten von Altmagneten oder Produktionsabfällen mit den zur Anwendung kommenden Technologien. Eigene Darstellung nach GAUß et al. (2015)

In Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Material- oder Abfallstoffstromes, der Kosten und der gewünschten Eigenschaften der wiederverwendeten oder recycelten Magneten ist das geeignetste Verfahren auszuwählen. Mit den rohstofflichen Recyclingverfahren lassen sich zwar die besten magnetischen Eigenschaften erzielen (äquivalent zur Produktion aus primären Rohstoffen), jedoch sind die Kosten relativ hoch und prozess-, wasser- und energieintensiv. Im Gegensatz dazu lassen sich mit den werkstofflichen Recyclingverfahren Magnete bei moderaten Kosten herstellen, wobei die magnetischen Eigenschaften jedoch von den EoL-Magneten abhängig sind.

Trotz der teilweise bereits seit einigen Jahren vorhandenen Recyclingtechnologien ist ein industrielles Magnetrecycling in Deutschland und Europa erst im Entstehungsprozess. Gründe hierfür sind u. a. die zum Teil immer noch sehr geringen Preise von chinesischen Primärmagneten. Weiterhin sind für reproduzierbare Eigenschaften konstante Altmagnet-Stoffströme notwendig. Hier gilt es gerade im Bereich der Sammlung und Demontage von Altmagneten und der automatisierten und damit wirtschaftlichen Sortierung von kleineren Anwendungen und Bauteilen noch Herausforderungen zu lösen. Auch die stark unterschiedlichen Lebensdauern von 2–3 Jahren im Bereich der Unterhaltungselektronik bis hin zu 20–30 Jahren bei Windturbinen haben einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der SE-haltigen Stoffströme. Weiterhin machen Fehlwürfe und Mischungen verschiedener Magnetwerkstoffe (Ferrite, AlNiCo, SmCo, NdFeB), sowie Mischungen unterschiedlicher Magnet-Grades die Entwicklung effizienter Demontage- und Sortierprozesse notwendig (YUE et al. 2019). Die zentrale Herausforderung für ein industrielles Magnetrecycling bleibt jedoch die stabile und planbare Versorgung mit einer ausreichenden Menge an Altmagneten.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Generierung sortenreiner Stoffströme wäre die Kennzeichnung von Bauteilen und Stoffströmen für eine bessere Sortierung und ein effektiveres Recycling. Eine solche Kennzeichnung kann u. a. mittels digitalem Produktpass, Strichcodes, QR-Co-

des oder Radio Frequency Identification (RFID) Technologie erfolgen (CUTEC Institut 2016). Neben dem Magnet-Typ können weitere prozessrelevante Kenngrößen wie die Art der Korrosionsschutzschicht, der Anteil an schweren Seltenen Erden, der Magnet-Grade und der Magnetproduzent in einer solchen Beschriftung codiert werden (BURKHARDT et al. 2020).

2.2 Recyclingpotenziale

Das Recyclingpotenzial der unterschiedlichen Wertstoffströme wurde in den vergangenen Jahren in einigen wissenschaftlichen Studien untersucht. Einen Überblick gibt Tabelle 4. Die Autoren kommen aufgrund unterschiedlicher Annahmen und Berechnungsmethoden zu teilweise stark voneinander abweichenden Ergebnissen. Beeinflusst werden die für ein Recycling zur Verfügung stehenden Mengen u. a. von der Höhe der Rückläuferquote, die je nach Stoffstrom und Anwendung unterschiedlich hoch ausfallen kann. So ist im Fall von Traktionsmotoren (28–36 %) und Windturbinen (10–18 %) von einer relativ hohen Rückläuferquote auszugehen, wohingegen sie bei E-Bikes, Industriemotoren oder HDD-Festplatten (jeweils 1 %) deutlich geringer ausfallen könnte (REIMER et al. 2018). Andere Studien gehen von einer zukünftigen Sammelquote von 60 % bei HDD-Festplatten oder 90 % im Falle von Traktionsmotoren oder Windturbinen aus (SCHULZE & BUCHERT 2016). Die tatsächliche EoL-Recyclingrate der Seltenen Erden Nd, Pr, Dy und Tb betrug im Jahre 2019 weniger als 1 %. Gründe für die geringen Recyclingraten sind u. a. nicht vorhandene Sammel- und Rückführungssysteme und fehlende wirtschaftliche Anreize. So gehen die Magnetwerkstoffe bei geschredderten Materialfraktionen in der Eisenfraktion verloren oder werden beim Stahl- oder Elektroschrottrecycling mit aufgeschmolzen und finden sich im Anschluss in der Schlacke wieder. Lediglich beim Rückbau der ersten Windkraftanlagen werden die enthaltenen Magnete gezielt gesammelt, um sie jedoch im Anschluss zum Reuse und Recycling nach Asien zu exportieren, wodurch sie einem deutschen oder europäischen Recycling oder Reuse nicht mehr zur Verfügung stehen (UBA 2019).

Tab. 4: Recyclingpotenziale ausgewählter SE-Magnet-Materialströme mit Ausblick auf die zukünftige Entwicklung

Studie	Materialstrom	Region	Zeitraum	Menge
ELWERT et al. (2018)	NdFeB allgemein	Europa	2015	150 t (davon 60–70 t Produktionsabfall)
			2016–2040	10.300 t–183.000 t
REIMER et al. (2018)	NdFeB allgemein	Europa	2018–2040	25.700 t–233.000 t
UBA (2019)	NdFeB allgemein	Deutschland	2015	800 t
			2030	1.700 t
			2040	4.800 t
GWEC (2023)	NdFeB Windkraft	Welt	2027	15.000 t
SCHULZE & BUCHERT (2016)	NdFeB allgemein	Welt	2020	15.000 t–22.000 t
			2030	27.000 t–52.000 t
	Produktionsabfälle für rohstoffliches Recycling	Welt	2020	28.000 t–45.000 t
			2030	60.000 t–158.000 t
IEA (2022)	SE-Elemente (Nd, Pr, Dy, Tb)	Welt	2030	11.000 t
			2040	12.000 t

Technologische Entwicklungen wie die Substitution der seit Jahrzehnten im Einsatz befindlichen magnethaltigen Hard Disk Drive (HDD)-Festplatten durch die schnelleren und magnetfreien Solid State Drives (SSD)-Festplatten haben einen direkten Einfluss auf die zukünftige Zusammensetzung und das Volumen der magnethaltigen Stoffströme. So ist damit zu rechnen, dass bis 2032 85 % der HDD-Festplatten durch SSD-Festplatten ersetzt werden (PEETERS et al. 2018).

In Generatoren von Windkraftanlagen kommen Seltene Erden und daraus hergestellte Permanentmagnete überwiegend in Offshore-Anlagen zur Anwendung (je nach Turbinen-Typ bis zu 650 kg NdFeB-Magnete/MW). In Deutschland wurden 2022 Offshore-Anlagen mit einer Kapazität von 980 MW installiert. Bis 2030 ist in Deutschland mit dem Ausbau der Windenergie auf über 15 GW zu rechnen. Die Global Offshore Wind Alliance (GOWA), ein Zusammenschluss aus 14 Mitgliedsstaaten (darunter auch Deutschland) beabsichtigt die globale Offshore-Wind-Kapazität von mindestens 380 GW im Jahr

re 2030 auf 2.000 GW im Jahre 2050 zu erhöhen (GWEC 2022; GWEC 2023). Die Internationale Energieagentur rechnet bis 2040 mit einer Verdreifachung der installierten Windenergie und einem 25-fachen Anstieg an Elektrofahrzeugen (IEA 2022). Im Jahre 2022 wurden weltweit 77,6 GW neue Windkraftanlagen installiert (davon 8,8 GW Offshore und 68,8 GW Onshore). Global wird bis 2027 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 15 % erwartet (GWEC 2022; GWEC 2023).

Nach ELWERT et al. (2018) ist bis 2030 mit folgenden Trends und Entwicklungen zu rechnen:

1. Elektronikprodukte: Abnahme des theoretischen Recyclingpotenzials wegen Ablösung der NdFeB-haltigen HDD durch magnetfreie SSD
2. Elektromobilitätssektor: Voraussichtlich bis 2030 leichte Zunahme und nach 2030 stärkerer Anstieg
3. Industriemotoren: Konstanter Anstieg

4. Windkraft: Wegen langer Lebensdauer und später Markteinführung von NdFeB-Generatoren Rücklauf von Anlagen erst ab 2030
5. MRT: Rückgang des Recyclingpotenzials durch Substitution von NdFeB-Geräten durch elektromagnetbasierte Geräte

Es lässt sich festhalten, dass das theoretische Recyclingpotenzial bis zum Jahr 2025 weitgehend konstant bleibt, insbesondere im Hinblick auf Abfälle aus den Bereichen Elektronikprodukte, Elektromobilität und Industriemotoren. Jedoch wird prognostiziert, dass ab dem Jahr 2025 eine deutliche Zunahme der Abfallmengen aus dem Bereich Elektromobilität zu erwarten ist (ELWERT et al. 2018). Des Weiteren wird erwartet, dass ab 2030 zunehmend Generatoren aus Windkraftanlagen zum Recycling zur Verfügung stehen werden. Die zunehmende Verfügbarkeit von EoL-NdFeB-Magneten könnte das Recycling potenziell fördern, aber es ist fraglich, ob die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dafür attraktiv genug sind.

3. Wertschöpfung und Handel

3.1 Untersuchung des Handels

Im Gegensatz zu anderen Altmaterialien, wie Stahl- oder Kupferschrott, konnte für EoL-NdFeB-Magnete kein relevanter Handel in Deutschland festgestellt werden. Bekannt ist, dass es bilaterale Absprachen zum Magnethandel zwischen Recyclingunternehmen und Verwertern von EoL-NdFeB-Magneten gibt, allerdings bewegen sich die Mengen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Ursächlich für einen ausbleibenden großflächigen Handel ist eine Kombination aus technologischen, logistischen und rechtlichen Voraussetzungen, die in der Summe das Geschäftsmodell Magnetrecycling finanziell unattraktiv macht und eine entsprechende Markt- und Preisbildung verhindert. Bevor auf diese Ursachen genauer eingegangen wird, ist es hilfreich einen Blick auf die potenziell auftretenden Recyclingprodukte zu werfen. Tabelle 5 zeigt die Warengruppen, die abhängig von den unterschiedlichen Recyclingprozessen auftreten könnten.

Tab. 5: Mögliche Warengruppen im Bereich Magnetrecycling.

Warengruppe	Kategorie	Einordnung Gefahrstoff	Kommentar
Magnethaltige Bauteile/Systeme	Abfall	Kein Gefahrstoff	
Altmagnet(reste)	Abfall	 Eventuell magnetisiert, abgesehen davon kein Gefahrstoff	
Flakes/Grobpulver (nach Rascherstarrung)	Vorprodukt (Legierung)	  	Absatzmarkt vorhanden, da auch Primärprodukt in dieser Form angeboten wird
Grobpulver (nach Wasserstoffversprödung)	Vorprodukt (Legierung)	   	
Verpresste Grobpulver	Vorprodukt (Legierung)	   	
Feinpulver (nach Mahlung)	Vorprodukt (Legierung)	   	Wird aufgrund aufgrund des Gefährdungspotenzials nicht gehandelt
Recycelte SE-Oxide	Vorprodukt (Oxid)	Kein Gefahrstoff	Wenige potenzielle Abnehmer, da Reduzierung zu Elementen ein komplexer Prozess
Recycelte SE-Elemente	Vorprodukt (Element)	Kein Gefahrstoff (in Bulkform)	Aufwendiger Prozess, aber Endprodukte können flexibel eingesetzt werden
Recycelte Magnete	Produkt	Kein Gefahrstoff	

3.2 Logistische Herausforderungen

Die aktuellen Preise für Primärmagnete sind aus rein ökonomischer Perspektive eher niedrig und reichen nicht aus, um das Recycling als unmittelbar finanziell attraktive Alternative zu fördern. Dies könnte zum Teil auf staatliche Maßnahmen des führenden Weltmarktanbieters China zurückzuführen sein. Ein gemeinsames Merkmal der im Bericht vorgestellten Recyclingverfahren ist, dass das EoL-Magnetmaterial, je nach zur Anwendung kommenden Verfahren, in einer gewissen Reinheit vorliegen muss. Dadurch ergeben sich im Hinblick auf die unterschiedlichen Anwendungen von NdFeB-Magneten im Speziellen und Permanentmagneten im Allgemeinen technische und logistische Herausforderungen der Trennung und Sortierung des EoL-Magnetmaterials, die für die erfolgreiche wirtschaftliche Umsetzung unerlässlich sind und durch folgende Faktoren beeinflusst werden.

Heterogene Materialströme

Als wesentliche logistische Herausforderung erweisen sich die unterschiedlichen Abfallströme mit unterschiedlichsten NdFeB-Magnetanteilen. NdFeB-Magnete sind in verschiedensten elektrischen Bauteilen enthalten. Um eine wirtschaftliche relevante Menge an EoL-Magnetmaterial zu erschließen, ist es nötig möglichst viele Quellen für NdFeB-Magnete zu nutzen. Die Folge ist jedoch ein in der Summe stark variierender Abfallstrom mit unterschiedlichsten Bauteilen, Magnetformen und Magnetanteilen. Dies steht im Widerspruch zu den vorhandenen technologischen Verfahren, die eine Spezialisierung auf konkrete Magnettypen voraussetzen. Heterogene Materialströme sind besonders bei den werkstofflichen Recyclingverfahren im Hinblick auf die Herstellung reproduzierbarer Eigenschaften zu vermeiden.

Unterschiedliche Lebenszyklen

Zusätzlich zu den Abfallströmen ergeben sich je nach Produkt unterschiedliche Lebenszyklen der darin enthaltenen Magnete. Anfallende Abfallströme enthalten somit nicht nur unterschiedliche Magnete, sondern auch Magnete aus unterschiedlichsten Herstellungszeiträumen, angefangen von nur wenige Jahre alten Konsumgütern bis zu Anwendungen über mehrere Jahrzehnte. Da sich alle Produkte und auch die enthaltenen Komponenten im Laufe der Zeit verändert haben, erhöht sich die Variantenvielfalt der Abfallströme um einen weiteren zeitlichen Faktor. Auch spielt der technologische Fortschritt bei der Nutzung von EoL-Magneten mit unterschiedlichen Lebenszyklen eine Rolle. Durch eine stete Optimierung der Zusammensetzung und Mikrostruktur, unterscheiden sich beispielsweise ältere Magnete von neueren Magneten durch einen höheren Selten-Erd-Gehalt. Die trifft in besonderem Maße auf die besonders kritischen schweren Seltenen Erden wie Dysprosium oder Terbium zu.

Keine automatisierten Demontageprozesse für kleine Produkte

Sowohl im Bereich Konsumgüter als auch in der Motorentechnik wurden die Bauteile über die Jahre kleiner und leichter. Während für größere Bauteile (Motoren, Festplattenmagnete) automatisierte Demontageprozesse durchaus denkbar sind, wird dies mit zunehmender Miniaturisierung schwieriger. Neben der reinen Größe spielt auch die Bauweise eine Rolle: Die Art und Weise wie verschiedene Komponenten auf kleinstem Raum miteinander verbunden sind (verklebt, verschränkt, ummantelt), stellt eine zusätzliche Herausforderung für eine sortenreine Trennung dar. Zusammen mit der Variantenvielfalt führt dies dazu, dass es für solche kleinen Produkte keine wirtschaftlichen automatisierten Demontageprozesse gibt. Geschredderte Materialströme sind nur für die rohstofflichen Recyclingverfahren nutzbar.

Trennung von unterschiedlichen Magneten

Zusätzlich zur Trennung von Magneten und nichtmagnetischem Material gibt es weitere Unterscheidungen innerhalb der Magnete zu beachten. Insbesondere eine Vermischung der vier eingesetzten Magnetmaterialien (Ferrote, AlNiCo, SmCo, NdFeB) im Rahmen des Recyclingprozesses gilt es zu vermeiden, da es sich um grundsätzlich verschiedene Materialien handelt. Aus der Primärproduktion ist beispielsweise bekannt, dass bereits geringfügigste Querkontaminationen zwischen NdFeB und SmCo zu extremen Verschlechterungen der makroskopischen magnetischen Eigenschaften führen und in Konsequenz das Material unbrauchbar machen.

Auch innerhalb der einzelnen Materialien ergeben sich weitere Unterschiede in chemischer Zusammensetzung, Eigenschaften und Anwendung. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen NdFeB-Magnetklassen. Die Diversifizierung dieses Materials resultiert vor allem aus der Anwendungstemperatur, da erst die Zulegierung schwerer Seltener Erden (Dy, Tb) den Einsatz in Anwendungen $> 80^\circ\text{C}$ ermöglicht. Somit staffeln sich die Varianten (Magnet-Grade) nach unterschiedlichen Einsatztemperaturen (N, M, H, SH, UH, EH, AH, VH), wobei mit zunehmender Temperatur ein zunehmender Anteil schwerer Seltener Erden und eine Reduktion der Energiedichte $(BH)_{\text{max}}$ einhergeht. Durch optimierte Prozesse in der Magnetproduktion (Sauerstoffreduktion, Korngrenzendiffusion, Kornfeinung) ist es gelungen

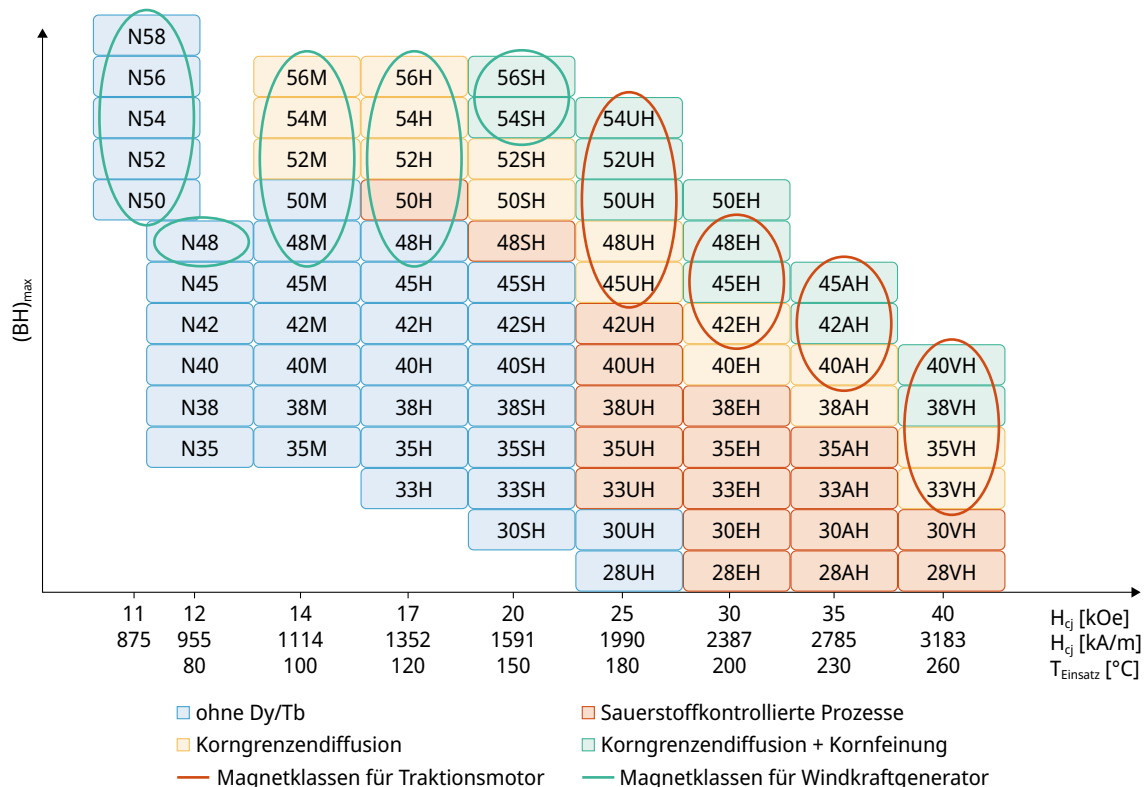


Abb. 9: Kommerziell erhältliche NdFeB-Magnetklassen (engl. grades) mit Angabe typischer magnetischer Kenngrößen und Einsatztemperaturen. Eigene Darstellung nach FURGERI (2020), basierend auf dem chinesischen Standard GB/T 13560-2017 (2018). Die farbliche Unterteilung stellt die technische Entwicklung der NdFeB-Magnete dar, mit dem Ziel, immer bessere bzw. höhere Koerzitivfeldstärken zu erreichen und damit Anwendungen mit höheren Temperaturen, wie z.B. Traktionsmotoren, zu erschließen

gen, den notwendigen Anteil schwerer Seltener Erden zu reduzieren (von bis zu 10 Gew. % auf < 4 Gew. %) und auch $(BH)_{\max}$ über alle Magnetklassen zu steigern.

Für das Magnetrecycling bedeutet dies, dass es innerhalb der NdFeB-Magnete eine große Legierungsvarianz gibt, die von der Anwendung und dem Zeitpunkt der Herstellung, bzw. den angewandten Produktionstechniken abhängt. Unter dem Aspekt der Kritikalität und auch der Rohstoffkosten dürften insbesondere die Magnete mit den höchsten Anteilen an schweren Seltenen Erden von erhöhtem Interesse sein. Dies setzt entsprechende Kenntnisse der Materialien (idealerweise Zusammensetzung, mindestens Magnetklasse oder Zielanwendung) voraus.

3.3 Rechtliche Voraussetzungen

Der grundsätzliche Umgang mit Abfällen und Reststoffen ist in der europäischen Union durch die *„Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien“*, kurz *„Abfallrahmenrichtlinie“* (AbfRRL 2008), und deren jüngste Novellierung *„Richtlinie (EU) 2018/851 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle“* (AbfRRL 2018) geregelt. Die nationale Umsetzung in Deutschland erfolgte 2012 durch das *„Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG)“* (KrWG 2012). Die Umsetzung der Änderungsrichtlinie von 2018 erfolgt im Wesentlichen durch Artikel 1 des *„Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union“ (Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes – KrWG)“* (KrWG 2020). Die neben der AbfRRL geänderten Richtlinien werden teilweise bereits in gesonderten Artikeln des *„Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union“*, teilweise in gesonderten Gesetzgebungs- und Verordnungsverfahren umgesetzt (AbfRRL 2008).

Rechtlich betrachtet handelt es sich bei den EoL-Produkten, in denen SE-Magnete verbaut sind, ab dem Zeitpunkt der Entledigung um Abfall (§3 KrWG: „Abfälle (im Sinne dieses Gesetzes) sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“). Sobald ein Produkt rechtlich als Abfall gilt, kann es nicht mehr wie eine gewöhnliche Ware frei gehandelt werden, sondern nur noch als Abfall, was besondere Anforderungen und Nachweispflichten an alle potentiellen Händler stellt.

Um dann nicht mehr als Abfall, sondern als (recycltes) Handelsgut zu gelten, muss für einen Stoff das Ende der Abfalleigenschaft behördlich beantragt und genehmigt werden. §5 KrWG (Ende der Abfalleigenschaft) regelt, ob und unter welchen Bedingungen für einen Stoff diese Einstufung als Abfall beendet werden kann: Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Der Nachweis für das Ende der Abfalleigenschaft erfolgt auf allen vier Ebenen. Während die drei erstgenannten Kriterien per Definition, einer Betrachtung des Marktes oder über bestehende DIN/ISO-Normen erfüllt werden können, steht beim letztgenannten Kriterium eine Betrachtung der im Recyclingprozess ausgelösten Emissionen auf Basis des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG 2023) im Vordergrund. Die Gemeinverträglichkeit des Recyclingverfahrens kann beispielsweise mittels Ökobilanzierung (LCA) gegenüber Primärprozess oder Deponie-

rung nachgewiesen werden. Voraussetzung für den Nachweis ist somit jedoch auch eine im Großen und Ganzen stabile, homogene Lieferkette für das EoL-Material.

Eine Möglichkeit, um die gesammelten Mengen von EoL-Magneten zu erhöhen liegt in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). Stand heute sind EoL-NdFeB-Magnete kein separater und damit getrennt zu sammelnder Stoffstrom. Das bedeutet die Magnete müssen nicht demontiert und getrennt werden und gehen somit oft in der Fraktion „Stahlschrott“ verloren. Ein Anreiz für Firmen zur getrennten Sammlung von EoL-Magneten könnte ein eigener Abfallschlüssel für Magnete sein.

4. Preise

Zwar gibt es keinen öffentlich zugänglichen Markt für EoL-Magnete und eine Preisfindung findet somit im Rahmen bilateraler Absprachen statt (siehe Kapitel 3), allerdings zeigt sich für diese Preisfindung bei langfristiger Betrachtung (über mehrere Jahre) ein eindeutiger Einflussfaktor. So folgt die Preisentwicklung für EoL-Magnete offensichtlich der Preisentwicklung von Primärmagneten, welche wiederum der Entwicklung der Rohstoffpreise folgt. Somit ist für EoL-Magnete, ähnlich wie für Primärmagnete, der Selten-Erd-Gehalt und deren Preisentwicklung als wesentlicher Faktor für die Preisbildung anzusehen. Aufgrund der höheren Rohstoffkosten kommt hierbei den schweren Seltenen Erden (Dysprosium, Terbium) eine besondere Bedeutung zu. Abbildung 10 zeigt die Preisentwicklung von leichten und schweren

Seltenen Erden in den vergangenen 20 Jahren exemplarisch anhand von Neodym und Dysprosium. Die Preisspitze im Jahr 2011 wurde durch Exportbeschränkungen des weltweit größten Produzenten China ausgelöst. Es gab Befürchtungen, dass es außerhalb Chinas zu einer Angebotsverknappung kommt.

Wie sich die Preise für EoL-Magnete im Vergleich zu den Rohstoffen der Primärmagnete im gleichen Zeitraum entwickelt haben zeigt Abbildung 11 am Beispiel einer typischen Magnetlegierung. Wenngleich sich die Kosten für Primär- oder Recyclingrohstoff-Material auf deutlich unterschiedlichem Niveau bewegen, zeigt sich in beiden Fällen der gleiche Trend bezüglich der prozentualen Preisentwicklung.

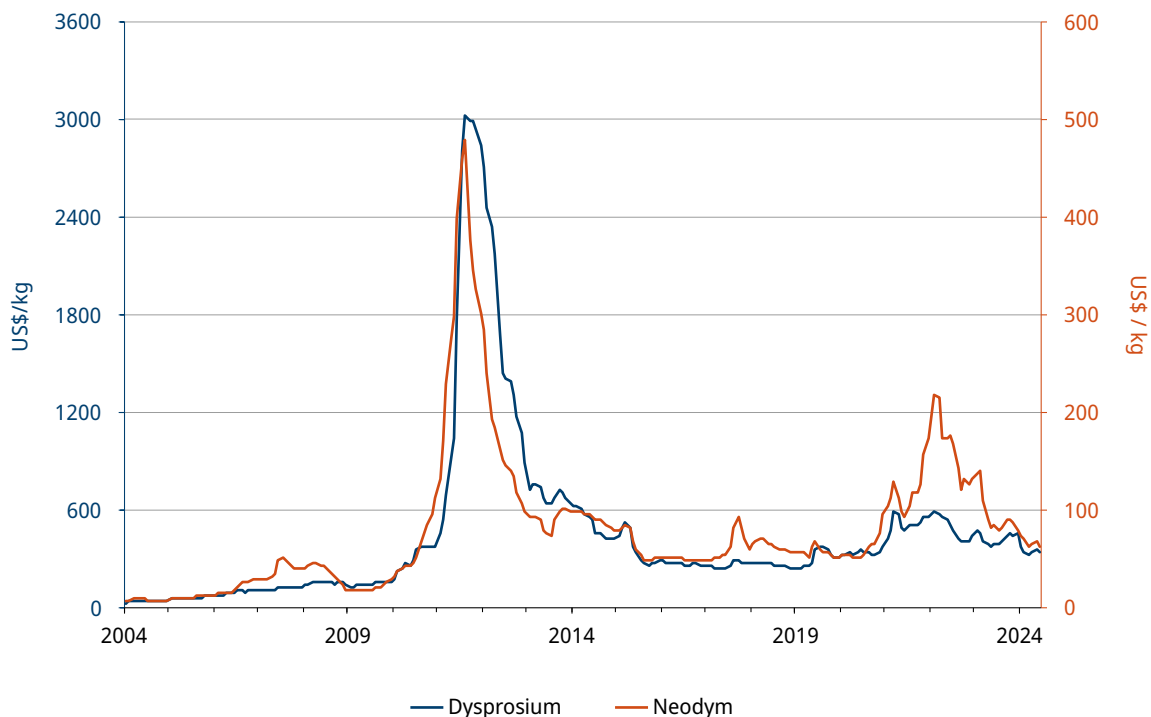


Abb. 10: Preisentwicklung der Elemente Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) mit einer Reinheit von 99 % seit Januar 2004 (BGR 2024)

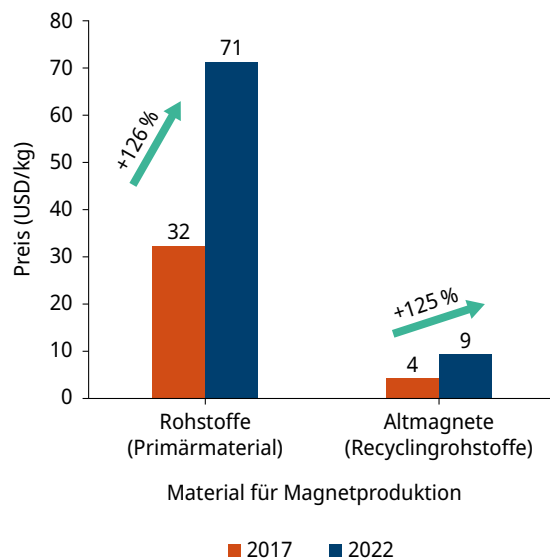


Abb. 11: Vergleich der Rohstoffkosten zur Herstellung eines exemplarischen NdFeB-Magneten aus Primärmaterial und Recyclingrohstoffen in den Jahren 2017 und 2022.
Eigene Darstellung nach SCHÖNFELDT et al. (2023)

Für eine zukünftige Preisentwicklung im Bereich von EoL-Magneten ist folglich davon auszugehen, dass sich dieser Preis am Primärpreis der jeweiligen Legierung (mit dem Anteil der Seltenen Erden als wesentlichem Faktor) orientieren wird.

5. Umsetzung von Recyclingverfahren

Im Folgenden werden bekannte Projekte zum NdFeB-Magnetrecycling in Deutschland vorgestellt. Ergänzend werden einige europäische und nordamerikanische Projekte aufgeführt, die internationale Bekanntheit erlangt haben. Trotz sorgfältiger und systematischer Recherche, kann kein Anspruch auf Vollständigkeit, insbesondere im europäischen und internationalen Markt, erhoben werden. Die Studie gibt vielmehr einen ersten Überblick in das komplexe Themengebiet und stellt die gängigsten Prozesse, sowie die wichtigsten Akteure vor.

Die wirtschaftliche Umsetzung des Magnetrecyclings erfordert vielfältige Aktivitäten und die Zusammenarbeit unterschiedlicher Stakeholder. Zunächst müssen in der Forschung Recyclingmethoden entwickelt werden, welche das Potential haben, unter wirtschaftlich sinnvollen Bedingungen umgesetzt zu werden. Ziele dieser wissenschaftlich untersuchten Recyclingmethoden sind: a) die Herstellung sehr reiner SE-Oxide bzw. Elemente, b) die Herstellung von Vorprodukten zur Magnetherstellung oder c) die Herstellung von Recyclingmagneten. Für eine wirtschaftliche Umsetzung des Recyclingprozesses an sich, bedarf es auch der Verfügbarkeit von ausreichend Recyclingmaterial. Die Logistik zur Sammlung relativ sortenreiner Stoffströme ist für NdFeB-Magnetwerkstoffe noch nicht etabliert und muss in Zukunft aufgebaut werden. Hierzu gehört auch die Freilegung von Magneten, welche am Ende ihres Lebenszyklus üblicherweise in Komponenten wie Motoren, Generatoren, Lautsprechern, medizinischen Geräten oder Elektronikbauteilen verbaut sind. Eine weitere Hürde, die es zu überwinden gilt, ist die Tatsache, dass Permanentmagnete auch am Ende ihrer Lebensdauer noch magnetisiert sind, was beispielsweise die Handhabung beim Sortieren erschwert. Unabhängig davon hat sich in jüngster Zeit in Deutschland, Europa und weltweit eine Industrie zum Magnetrecycling entwickelt, die durch den Bedarf an Seltenen Erden und

die Nachhaltigkeitsvorteile bei der Verwendung von Rezyklaten getrieben wird. Hierzu gehören Sammler, Recycler sowie Magnethersteller.

Die Kategorien in denen die betrachteten Marktteilnehmer beschrieben werden umfassen: *Firma, Standort, Wirtschaftszweig, Gründung, Produktionszeitraum, Quelle, Tätigkeit, Produkt, Kapazität* und *Info*. Bei den Firmen auf dem Gebiet des Magnetrecyclings handelt es sich größtenteils um Start-Ups, die in unterschiedlicher Form aus Projekten bzw. wissenschaftlichen Einrichtungen in den letzten zehn Jahren hervorgegangen sind. Eine Vielzahl von Technologien für das Recycling von Magneten wird auf dem Markt entwickelt und in naher Zukunft industriell umgesetzt. Bereits heute wird in den USA von der Firma Noveon Magnetics Inc. ein recycelter Magnet mit der Bezeichnung EcoFlux vermarktet. In Europa ist dies derzeit noch nicht der Fall, da die Firmen noch nicht die notwendige Produktionskapazität erreicht haben oder sich noch im Aufbau befinden. Durch gesetzliche Vorgaben wie zum Beispiel den EU Critical Raw Materials Act werden zukünftig auch die legislative Rahmenbedingung für die Umsetzung des Recyclings von kritischen Rohstoffen, zu denen auch Seltene Erden gehören, gegeben sein (CRMA 2023). Hierdurch wird die alternative Nutzung kritischer Materialien gefördert, die durch nationale Rohstoffvorkommen, nationale Rohstoffaufarbeitung und Recycling (Einsatz von mindestens 25 % kritischer Elementen aus dem Recycling) umgesetzt werden kann.

Zuletzt werden universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen beleuchtet, die sich mit dem Themenfeld Magnetrecycling auseinandersetzen. Der Fokus liegt auf Einrichtungen, die ihren Hauptsitz in Deutschland haben. Die betrachteten Aktivitäten umfassen sowohl Arbeiten zur Demontage von Komponenten als auch zum werkstofflichen und rohstofflichen Recycling von Magneten.

5.1 Industrielle Umsetzung

Die Heraeus Gruppe ist ein weltweit führendes Technologie- und Familienunternehmen mit Sitz in Hanau. Neben der Aufbereitung von Edelmetallen stehen auch Technologiemetalle im Fokus des Unternehmens. Hier ist die **Heraeus REMLOY GmbH** als Start-Up zum Recycling seltenerdhaltiger Magnetwerkstoffe innerhalb der Heraeus Gruppe eingegliedert. Zum Recycling wird die Route der Rascherstarrung ein-

gesetzt, bei der eine Metallschmelze auf einem wassergekühlten Metallrad mit Erstarrungsgeschwindigkeiten größer 1000 °C pro Sekunde in Festkörper (Flakes) überführt wird. Nach einer Aufbereitung werden die Flakes für die Magnetherstellung angeboten, welche nicht von Heraeus durchgeführt wird. Prinzipiell eignen sich die Produkte von Heraeus REMLOY für die Herstellung von kunststoffgebundenen oder heißumgeformten Magneten.

Tab. 6: Informationen Heraeus REMLOY GmbH

Kategorie	Beschreibung
Firma	Heraeus REMLOY GmbH
Standort	Deutschland, Bitterfeld-Wolfen
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler
Gründung	2021
Produktionszeitraum	ab 2024
Quelle	https://www.heraeus.com/de/landingspages/hrm/home_hrm/hrm_home.html
Tätigkeit	– Ankauf von EoL-Magneten – Recycling von EoL-Magneten mittels der Route der Rascherstarrung (Melt-Spinning)
Produkt	– Recyceltes NdFeB-Magnetpulver zur Herstellung von Permanentmagneten – Pulver für die Herstellung isotroper kunststoffgebundener Magnete – Pulver für Herstellung anisotroper heißumgeformter Magnete (Ziel für die Zukunft)
Kapazität	600 t pro Jahr in Ausbaustufe 1, 1200 t pro Jahr in Ausbaustufe 2

Die **HyProMag GmbH** ist ein Technologie-Start-Up mit Sitz in Deutschland, welches eng mit dem Unternehmen HyProMag Limited in England zusammenarbeitet. Beide nutzen eine patentierte Technologie der University of Birmingham (HPMS, engl. Hydrogen Processing of Magnetic Scrap) als Recyclingverfahren. HPMS beschreibt eine Technologie zum Recycling von NdFeB-Magneten mittels Wasserstoffversprödung, welches simultan eine Pulverisierung von

Magneten und die Trennung von nicht-magnetischem Material ermöglicht. Gemeinsam wollen die zwei Unternehmen jeweils Recyclingaktivitäten in Deutschland, England und den USA aufbauen. Parallel dazu hat die Muttergesellschaft Maginito Limited mit Mkango Rare Earths UK Limited vor kurzem eine Pilotanlage für das elementare Recycling von NdFeB Magneten in Betrieb genommen.

Tab. 7: Informationen HyProMag GmbH

Kategorie	Beschreibung
Firma	HyProMag GmbH
Standort	Deutschland, Pforzheim
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler, Magnethersteller
Gründung	2021 als GmbH in Deutschland und 2018 als Ltd. in Birmingham England
Produktionszeitraum	Q1 2025
Quelle	https://www.hypromag.de/Start.html https://mkango.ca/ https://direct.argusmedia.com/newsandanalysis/article/2590758
Tätigkeit	– Ankauf von EoL-Magneten – Recycling von EoL-Magneten mittels der Route der Wasserstoffversprödung
Produkt	– Rezyklatmagnetpulver – Herstellung von gesinterten Magneten – Herstellung von kunststoffgebundenen Magneten
Kapazität	Die Anlage in Tyseley (UK) wird zu Beginn jährlich 25–30 t NdFeB-Magnete produzieren und plant die Kapazitäten auf 100 bis 330 t pro Jahr zu steigern. Eine Anlage mit ähnlichen Kapazitäten wird derzeit in Deutschland geplant.
Info	Kollaboration mit HyProMag Ltd. in England, Nutzung der patentierten HPMS Technologie der University of Birmingham (HPMS: Hydrogen Processing of Magnetic Scrap)

Die **RockLink GmbH** ist ein weltweit operierendes Handels- und Recyclingunternehmen für Verbindungen und Metalle wie Seltene Erden, Nickel, Kobalt, Lithium und Wolfram. Im Bereich SE-Magnete wurde eine Rücknahmebox

für geringe Magnetmengen entwickelt (Magcycle). Die gesammelten EoL-Magnete werden zu Pulvern überführt und oxidiert, welche dann in Asien chemisch getrennt und zu SE-Metallen verarbeitet werden.

Tab. 8: Informationen RockLink GmbH

Kategorie	Beschreibung
Firma	RockLink GmbH
Standort	Deutschland, Düsseldorf
Wirtschaftszweig	Händler, Sortierer, Aufbereiter, Recycler
Gründung	Magnetsammlung seit ca. 2004
Produktionszeitraum	in Betrieb
Quelle	https://www.rocklink.de/
Tätigkeit	– Ankauf von EoL-Magneten: NdFeB (gesintert und kunststoffgebunden), SmCo, AlNiCo – Alle Magnete werden in Form von Schrotten, Stäuben, Schlacken, Schleifschlämmen aufgekauft – Überführung der EoL-Magnete in Oxide und Metalle (wird in Asien durchgeführt)
Produkt	– SE-Metalle (werden in Asien hergestellt, keine Magnetherstellung)
Kapazität	unbekannt
Info	Rücknahmesystem von Altmagneten in Magnetbox „Magcycle“ seit 2018 für geringe Mengen (https://www.magnetrecycling.de/)

Die **Lars Walch GmbH & Co. KG** ist ein kleines familiengeführtes Unternehmen zum Recycling von Metallen. Neben dem Ankauf von Edelmetallen werden auch SE-Magnetwerkstoffe

gehandelt. Hierbei werden Altmagnete aus Anwendungen wie Elektronikschrotten, Windkraftanlagen und Medizingeräten demontiert und dem Recycling zur Verfügung gestellt.

Tab. 9: Informationen Lars Walch GmbH & Co. KG

Kategorie	Beschreibung
Firma	Lars Walch GmbH & Co. KG
Standort	Deutschland, Baudenbach
Wirtschaftszweig	Händler, Sortierer
Gründung	1996
Produktionszeitraum	in Betrieb
Quelle	https://walch-recycling.de/
Tätigkeit	– Ankauf von EoL-Magneten und Komponenten
Produkt	– Sortenreine EoL-Magnete zum Recycling
Kapazität	unbekannt

Carester ist ein französisches Start-Up zum Recycling von Seltenen Erden. Hierbei werden die Magnete oxidiert und über ein nasschemisches Verfahren in Lösung gebracht. Daraufhin werden die einzelnen SE-Elemente über eine Flüssig-Flüssig-Extraktion getrennt, so dass SE-Oxide mit hoher Reinheit dem Markt zur Weiterverarbeitung in der Metallherstellung bereitgestellt werden können. Die entwickelten Prozesse eignen sich prinzipiell auch für die Aufarbeitung Seltener Erden aus dem primären Bergbau.

Tab. 10: Informationen Carester

Kategorie	Beschreibung
Firma	Carester
Standort	Frankreich, Lyon
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler
Gründung	2019
Produktionszeitraum	Baubeginn: Q3 2024 Inbetriebnahme der Pilotanlage: Q1 2026
Quelle	https://www.carester.fr/en
Tätigkeit	– Sammlung von EoL-Magneten – Nasschemisches Recycling von EoL-Magneten – Trennung von SE-Oxiden
Produkt	– Aufbereitete SE-Oxide (Elemente) – NdPr, Nd, Pr (als Mischung und getrennte Elemente)
Kapazität	Recycling von 2.000 t EoL SE-Magnete im Jahr 2027

MagREESource ist eine französische Ausgründung des CNRS (centre national de la recherche scientifique) zum Recycling von Magnetwerkstoffen mittels der Technologie der Wasserstoffversprödung. Hierbei sollen in Zukunft Recyclingpulver für Sintermagnete als auch für

kunststoffgebundene Magnete angeboten werden. Neben diesen konventionellen Anwendungen sollen ebenfalls Recyclingpulver für die additive Fertigung hergestellt und vertrieben werden.

Tab. 11: Informationen MagREESource

Kategorie	Beschreibung
Firma	MagREESource
Standort	Frankreich, Grenoble
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler, Magnethersteller
Gründung	2020
Produktionszeitraum	ab 2025 Bezug eines 1000 m ³ Werks in 2023
Quelle	https://www.magreesource.org/
Tätigkeit	– Sammlung von EoL-Magneten – Recycling von EoL-Magneten mittels der Route der Wasserstoffversprödung
Produkt	– Recycelte Pulver für die Herstellung von isotropen und anisotropen Magneten – Recycelte Pulver für die additive Fertigung – Herstellung von Recyclingmagneten
Kapazität	Recycling von 500 t EoL SE-Magnete pro Jahr

Noveon Magnetics wurde 2012 als Urban Mining Company in der USA zum Recycling von Magnetwerkstoffen gegründet. Als Technologie wird ein patentierter Magnet-to-Magnet Recycling Prozess in Kombination mit einem Korn-

grenzprozess eingesetzt. Hierbei ist Noveon derzeit die einzige Firma die aktiv einen recycelten Magneten mit der Bezeichnung EcoFlux vermarktet.

Tab. 12: Informationen Noveon Magnetics

Kategorie	Beschreibung
Firma	Noveon Magnetics Inc.
Standort	USA, San Marcos
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler, Magnethersteller
Gründung	2022 (von 2012 bis 2022 Urban Mining Company)
Produktionszeitraum	in Betrieb
Quelle	https://noveon.co/
Tätigkeit	– Sammlung von EoL-Magneten – Recycling von EoL-Magneten mittels der Route der Wasserstoffversprödung
Produkt	– Herstellung von gesinterten Recyclingmagneten mit der Bezeichnung EcoFlux
Kapazität	2000 t pro Jahr
Info	patentiertes Verfahren Magnet-to-Magnet Recycling (M2M®) und Grain-Boundary-Engineering (GBE®) Prozess

REEcycle wurde als ein Spin-Off der University of Houston zum Magnetrecycling gegründet. Der Prozess basiert auf unterschiedlichen Schritten zur chemischen Entschichtung der Altmagnete, der mechanischen Zerkleinerung, der

chemischen Lösung und Filtration. Als Produkt wird eine Lösung einer SE-Mischung für den Markt angeboten mit ca. 87 % Neodym und 6 % Praseodym.

Tab. 13: Informationen REEcycle

Kategorie	Beschreibung
Firma	REEcycle (REEGENERATE PTY Ltd.)
Standort	USA, Houston
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler
Gründung	2012
Produktionszeitraum	seit dem Jahr 2020 im Pilotmaßstab
Quelle	https://www.reecycleinc.com/
Tätigkeit	– Sammlung von EoL-Magneten (Elektronikrecycling, in Zukunft auch andere) – Entfernung der Beschichtung, Magnetzerkleinerung, Lösung der Magnete in Säuren – Recycling von EoL-Magneten mittels der Route der Wasserstoffversprödung
Produkt	– SE-Oxidmischung in Lösung (Trennung der Seltenen Erden und Metallisierung wird nicht von REEcycle durchgeführt)
Kapazität	unbekannt
Info	patentierter Prozess

Cyclic Materials ist ein Start-Up zum SE-Recycling mit kanadischem Sitz, welches ebenfalls in den USA operiert. Zum Recycling wird ein chemischer Weg eingesetzt bei dem getrennte SE-Oxide dem Markt angeboten werden können.

Derzeit wird eine Anlage im Pilotmaßstab betrieben. Es bestehen Pläne die Technologie in Kanada und den USA über mehrere Stufen zu skalieren, mit einer Kapazität von bis zu 3000 t getrennte SE-Oxide pro Jahr.

Tab. 14: Informationen Cyclic Materials

Kategorie	Beschreibung
Firma	Cyclic Materials Inc.
Standort	Kanada, Toronto
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler
Gründung	2022
Produktionszeitraum	600 t pro Jahr in 2026, 3000 t pro Jahr in 2030
Quelle	https://www.cyclicmaterials.earth/
Tätigkeit	– Sammlung von EoL-Magneten – Entfernung der Beschichtung, Magnetzerkleinerung, Lösung der Magnete in Säuren – Fällung der Seltenen Erden als Mischoxide
Produkt	– SE-Oxidmischung
Kapazität	derzeit 10 t pro Jahr

Geomega Resource Inc. ist ein kanadisches Unternehmen zur Separation von Seltenen Erden. Die Technologie kann für den primären Bergbau oder das SE-Recycling eingesetzt werden. Bei dem Recycling werden Altmagnete chemisch in

Lösung gebracht und dann über eine patentierte elektrophoretische Trennung separiert. Das angebotene Produkt werden getrennte SE-Oxide sein.

Tab. 15: Informationen Geomega Resource Inc

Kategorie	Beschreibung
Firma	Geomega Resource Inc.
Standort	Kanada, Boucherville
Wirtschaftszweig	Aufbereiter, Recycler
Gründung	2009
Produktionszeitraum	nicht bekannt
Quelle	https://geomega.ca/
Tätigkeit	– Technologischer Hintergrund bezüglich Prozesse aus dem Bergbau – Lösen von EoL-Magneten in Säuren und Trennen von SE mittels Elektrophorese
Produkt	– Getrennte SE-Oxide
Kapazität	im Pilotmaßstab 1,5 t pro Tag, ausbaubar auf größer 1000 t pro Jahr

Neben den hier im Detail dargestellten Unternehmen zum Magnetrecycling gibt es weitere international tätige Firmen, die ihr Geschäftsfeld in dem Bereich Seltener Erden erweitern wollen. In Frankreich plant die Firma **Solvay** ein SE-Hub zu installieren, um Seltene Erden für die Magnetfertigung chemisch aufzuarbeiten (Solvay 2024). Die Firmen **GKN Powder Metallurgy** und **Neo Performance Materials** erweitern ihr Produktportfolio durch den Aufbau einer Fertigung von SE basierten Permanentmagneten in Europa (GKN POWDER METALLURGY 2024; neo materials 2020). Ein Nutzen von Seltenen Erden aus EoL-Applikationen und Rezyklaten ist in allen drei Fällen ebenfalls angedacht, steht aber nicht im Fokus der Unternehmungen.

5.2 Forschungseinrichtungen

In Deutschland wird das Recycling von Magnetwerkstoffen an unterschiedlichen universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen untersucht. In Folgendem sind einige der Arbeiten zu diesem Themengebiet aufgeführt.

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.: Unter der Schirmherrschaft der Fraunhofer-Gesellschaft arbeiten mehrere Institute zum Themengebiet Magnetrecycling. Dies wurde seitens Fraunhofer unter anderem durch die Finanzierung des Fraunhofer-internen Leitprojekts „Kritikalität Seltener Erden“ im Jahr 2014 initiiert. Hier arbeiteten sieben Institute gemeinsam an verschiedenen Fragestellungen im Bereich der Seltenen Erden, die neben dem Recycling auch die Suche nach alternativen Magnetwerkstoffen oder neuen Herstellungsverfahren umfasste. Die Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie **IWKS** arbeitet seit der Gründung in den Jahren 2012 (Alzenau) und 2013 (Hanau) am Themengebiet Magnetwerkstoffe und hat in dieser Zeit eine Produktionslinie zur Herstellung und dem Recycling von Permanentmagneten im Technikumsmaßstab (50 kg) aufgebaut. Hier wird vor allem an Methoden zum werkstofflichen Recycling über

Schmelzverfahren und die Pulvermetallurgie geforscht. Dies wurde in diversen öffentlich geförderten Projekten durchgeführt (FhG-LP-KSE, EU-EREAN, BMBF-RECVAl-HPM, BMBF-Supply-PBM, BMWK-Recycle-TEAM, FhG-RecyPer, Hessen-FunMag, Hessen-ZDR-EMIL) und wissenschaftlich veröffentlicht (DIEHL et al. 2018, SCHÖNFELDT et al. 2023). Neben werkstofflichen Methoden wird am Fraunhofer IWKS auch an Verfahren zum rohstofflichen Recycling im Labormaßstab geforscht (AUERBACH et al. 2019). Am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung **IFAM** wird an SE-Recyclingverfahren auf hydrometallurgischer Basis gearbeitet. Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik **IGB** wird an der elektrophoretischen Trennung von SE-Elementen geforscht.

Technische Universität Darmstadt: Im Fachgebiet Funktionale Materialien (Prof. Oliver Gutfleisch) des Fachbereichs Materialwissenschaften werden Verfahren zum Recycling von Magnetwerkstoffen über wasserstoffbasierte Routen erarbeitet. Diese Routen lassen sich auf die Herstellung von anisotropen Sintermagneten oder anisotropen kunststoffgebundenen Magneten (mittels HDDR-Prozess) anwenden. Die Methoden wurden in mehreren öffentlich geförderten Projekten eingesetzt (EU-EREAN, BMBF-RECVAl-HPM, BMWK-Recycle-TEAM, EU-MAGELLAN), wobei eine enge Zusammenarbeit zwischen TU Darmstadt und Fraunhofer IWKS besteht. Die Ergebnisse der Projekte wurden unter anderem in folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht: (GUTFLEISCH et al. 2013, LIXANDRU et al. 2017, YANG et al. 2017, DIEHL et al. 2018, BENKE et al. 2020, SCHÖNFELDT et al. 2023).

Hochschule Pforzheim: An der Hochschule Pforzheim wird das Magnetrecycling am Institut für strategische Technologie- und Edelmetalle (STI) unter Leitung von Prof. Carlo Burkhardt untersucht. Hierbei wird an dem Magnetrecycling über die Methode der Wasserstoffversprödung für die Herstellung von Sintermagneten gearbeitet. Die Technologie wird für die automatisierte Separation von Magnetpulver von

nicht-magnetischem Material weiterentwickelt. Dies geschieht in Kooperation mit der University of Birmingham und wird in dem Start-Up HyProMag wirtschaftlich verwertet. In folgenden öffentlich geförderten Projekten wird das Recycling aber auch die Demontage und die Nomenklatur von magnethaltigen Produkten erarbeitet (EU-SUSMAGPRO, EU-REEsilience, EU-ReProMag, BMBF-MaXycle). Die Ergebnisse der Projekte wurden unter anderem in folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht: BURKHARDT et al. (2020), BURKHARDT et al. (2023), MISHRA et al. (2023).

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: Das IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling – Institut und Lehrstuhl der RWTH Aachen unter Leitung von Prof. Bernd Friedrich befasst sich mit pyro- und hydrometallurgischen Recyclingverfahren von Legierungen, wie zum Beispiel SE-haltige Magnetwerkstoffe. Ergebnisse hierzu wurden in folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht: KRUSE et al. (2015), KAYA et al. (2021), EMIL-KAYA et al. (2022).

Technische Universität Clausthal: An der TU Clausthal wurde unter Leitung von Prof. Tobias Elwert (bis 2018) in dem öffentlich geförderten Projekt SemaRec an dem pyrometallurgischen Recycling von Magneten aus Elektromotoren gearbeitet. Ergebnisse zu den Recyclingansätzen wurden in folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht: ELWERT et al. (2017), REIMER et al. (2018).

Technische Universität Bergakademie Freiberg: An der TU Freiberg wurde unter der Leitung von Prof. Martin Bertau in dem öffentlich geförderten Projekt MagnetoRec an dem chemischen Recycling von Seltenen Erden mittels Feststoffchlorierung gearbeitet. Ergebnisse hierzu wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht: LORENZ & BERTAU (2018), LORENZ & BERTAU (2019).

An der **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg** wurde im Rahmen des EU-Projekts REPRODUCE an der Demontage von Elektromotoren zur Freisetzung von Permanentmagneten gearbeitet. Des Weiteren wird vom **Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien in Düsseldorf**, dem **Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden** und von der **Hochschule Aalen** an Permanentmagneten geforscht. Hier wird die Kritikalität von Seltenen Erden durch die Substitution mit als nicht kritisch eingestuften Elementen untersucht.

6. Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen magnetischen Materialströmen und Anwendungen die Wahl des geeigneten Recycling-Verfahrens vom Stoffstrom, den Kosten und den gewünschten Eigenschaften abhängt. Werkstoffliche Recyclingverfahren zeichnen sich gegenüber rohstofflichen Verfahren durch den geringeren Energieeinsatz aus, während rohstoffliche Verfahren eine größere Anzahl an Materialströmen recyceln und bessere magnetische Eigenschaften erzielen können. Beide Verfahrensgruppen haben entscheidende Vor- und Nachteile, weshalb sie den Weg in die industrielle Umsetzung gefunden haben. Unternehmen und Start-Ups bieten auf nationaler und internationaler Ebene beide Recyclingverfahren an. Universitäten und Forschungseinrichtungen arbeiten an der Weiterentwicklung und Optimierung beider Verfahren. Die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung wird eine zentrale Rolle bei der Entwicklung nachhaltiger Recyclinglösungen spielen.

Das werkstoffliche Recycling wird in Deutschland in den nächsten Jahren durch bisher zwei ansässige Magnetrecyclingunternehmen und zusätzliche Start-Ups weiter ausgebaut werden. Auch in Deutschland ansässige Magnetproduzenten werden bei Umsetzung der Pläne der Europäischen Union (Critical Raw Materials Act und Ökodesign-Richtlinie) einen Teil ihrer primären Rohstoffe durch Recyclingrohstoffe ersetzen müssen. Um die Recyclingpotenziale verschiedener Materialströme, sowie die Rückläuferquoten von SE-Magneten zu erhöhen, gilt es effektivere Sammel- und Rücknahmesysteme unter Einbeziehung aller Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette und der Forschung zu implementieren. Ein eigener Abfallschlüssel für EoL-Magnete (NdFeB) nach Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) könnte die Recyclingraten erhöhen und finanzielle Anreize sowie politische Regularien die Nutzung von Recyclingrohstoffen fördern. Damit würden SE-Magnete als

höherwertiges Material eingestuft werden, was für Unternehmen einen Anreiz zur getrennten Sammlung schafft. Die Überwindung der technischen, logistischen und rechtlichen Herausforderungen des Handels wird ebenfalls entscheidend für den Aufbau und die Etablierung einer robusten Recyclingindustrie sein.

7. Literaturverzeichnis

ABFRRL (2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Europäisches Parlament und Rat. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705>.

ABFRRL (2018): Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle. Europäisches Parlament und Rat. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32018L0851> (Stand: 27.05.2024).

AUERBACH, R., BOKELMANN, K., STAUBER, R., GUTFLEISCH, O., SCHNELL, S. & RATERING, S. (2019): Critical raw materials – advanced recycling technologies and processes: recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy. – Minerals Engineering. Heftnr. 134.

BENECKI, W. T., CONSTANTINIDES, S., ORMEROD, J. & TROUT, S. R. (2021): The Global Permanent Magnet Industry: 2020 - 2030. – URL: <https://www.magnetreport.com/> (Stand: 23.07.2024).

BENKE, D., FRIES, M., SPECHT, M., WORTMANN, J., PABST, M., GOTTSCHALL, T., RADULOV, I., SKOKOV, K., BEVAN, A. I., PROSPERI, D., TUDOR, C. O., AFIUNY, P., ZAKOTNIK, M. & GUTFLEISCH, O. (2020): Magnetic Refrigeration with Recycled Permanent Magnets and Free Rare-Earth Magnetocaloric La-Fe-Si. – Energy technology (Weinheim, Germany). Heftnr. 7. doi: 10.1002/ente.201901025.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2024): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover.

BIMSchG (2023). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). – URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf> (Stand: 31.05.2024).

BINNEMANS, K., JONES, P. T., BLANPAIN, B., VAN GERVEN, T., YANG, Y., WALTON, A. BUCHERT, M. (2013): Recycling of rare earths: a critical review. – Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037.

BURKHARDT, C., LEHMANN, A., PODMILJŠAK, B. & KOBE, S. (2020): A Systematic Classification and Labelling Approach to Support a Circular Economy Ecosystem for NdFeB-Type Magnet. – Journal of Materials Science and Engineering B. Heftnr. 4. doi: 10.17265/2161-6221/2020.7-8.001.

BURKHARDT, C., VAN NIELEN, S., AWAI, M., BARTOLOZZI, F., BLOMGREN, J., ORTIZ, P., XICOTENCATL, M. B., DEGRI, M., NAYEBOSADRI, S. & WALTON, A. (2023): An overview of Hydrogen assisted (Direct) recycling of Rare earth permanent magnets. – Journal of Magnetism and Magnetic Materials. doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171475.

CLAUSTHALER UMWELTECHNIK-INSTITUT GMBH (2016): Abschlussbericht Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung. – URL: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Abschlussbericht_Demontagefabrik_II.pdf (Stand: 19.04.2024).

CRMA (2023): Critical Raw Materials Act. Europäische Kommission. – URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252 (Stand: 19.04.2024).

DIEHL, O., SCHÖNFELDT, M., BROUWER, E., DIRKS, A., RACHUT, K., GASSMANN, J., GÜTH, K., BUCKOW, A., GAUß, R., STAUBER, R. & GUTFLEISCH, O. (2018): Towards an Alloy Recycling of Nd-Fe-B Permanent Magnets in a Circular Economy. – Journal of Sustainable Metallurgy. Heftnr. 2. doi: 10.1007/s40831-018-0171-7.

ELWERT, T., GOLDMANN, D., ROEMER, F. & SCHWARZ, S. (2017): Recycling of NdFeB Magnets from Electric Drive Motors of (Hybrid) Electric Vehicles. – Journal of Sustainable Metallurgy. Heftnr. 1. doi: 10.1007/s40831-016-0085-1.

ELWERT, T., SCHWARZ, S., BERGAMOS, M. & KAMMER, U. (2018): Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologiekette für NdFeB-Magnete – SEMAREC.

EMIL-KAYA, E., STOPIC, S., GÜRMEN, S. & FRIEDRICH, B. (2022): Production of rare earth element oxide powders by solution combustion: a new approach for recycling of NdFeB magnets. – RSC advances. Heftnr. 48. doi: 10.1039/d2ra05876f.

FURGERI, A. (01.10.2020): Sustainable Design for Recycling – REIA Webinar on Rare Earth Elements in Sustainable Circular Economy.

GAUß, R., DIEHL, O., BROUWER, E., BUCKOW, A., GÜTH, K. & GUTFLEISCH, O. (2015): Verfahren zum Recycling von seltenerdhaltigen Permanentmagneten. – Chemie Ingenieur Technik. Heftnr. 11. doi: 10.1002/cite.201500061.

GAUß, R.; GUTFLEISCH, O. (2016): Magnetische Materialien — Schlüsselkomponenten für neue Energietechnologien. – Kausch, P.; Matschullat, J.; Bertau, M.; Mischo, H. Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. S. 99–118.

GB/T 13560-2017 (2018): Sintered neodymium iron boron permanent magnets. – General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of PRC & Standardization Administration of PRC ICS 77.150.99 (Stand: 01.07.2024).

GKN POWDER METALLURGY (2024): GKN powder metallurgy enters permanent magnets for electric vehicles market. – URL: <https://www.gknpm.com/en/news-and-media/news-releases/2022/gkn-powder-metallurgy-enters-permanent-magnets-for-electric-vehicles-market/> (Stand: 31.05.2024).

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2022): GWEC GLOBAL WIND REPORT 2022.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2023): GWEC GLOBAL WIND REPORT 2023.

GUTFLEISCH, O., GÜTH, K., WOODCOCK, T. G. & SCHULTZ, L. (2013): Recycling Used Nd-Fe-B Sintered Magnets via a Hydrogen-Based Route to Produce Anisotropic, Resin Bonded Magnets. – Advanced Energy Materials. Heftnr. 2. doi: 10.1002/aenm.201200337.

GUTFLEISCH, O., WILLARD, M. A., BRÜCK, E., CHEN, C. H., SANKAR, S. G. & LIU, J. P. (2011): Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. – Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.). Heftnr. 7. doi: 10.1002/adma.201002180.

HABIBZADEH, A., KUCUKER, M. A. & GÖKELMA, M. (2023): Review on the Parameters of Recycling NdFeB Magnets via a Hydrogenation Process. – ACS omega. Heftnr. 20. doi: 10.1021/acsomega.3c00299.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2022): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

JIN, H., AFIUNY, P., DOVE, S., FURLAN, G., ZAKOTNIK, M., YIH, Y. & SUTHERLAND, J. W. (2018): Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors. – Environmental science & technology. Heftnr. 6. doi: 10.1021/acs.est.7b05442.

JIN, H., AFIUNY, P., MCINTYRE, T., YIH, Y. & SUTHERLAND, J. W. (2016): Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. – Procedia CIRP. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.013.

JIN, H., FROST, K., SOUSA, I., GHADERI, H., BEVAN, A., ZAKOTNIK, M. & HANDWERKER, C. (2020): Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives. – Resources, Conservation and Recycling. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104781.

KAYA, E. E., KAYA, O., STOPIC, S., GÜRMEN, S. & FRIEDRICH, B. (2021): NdFeB Magnets Recycling Process: An Alternative Method to Produce Mixed Rare Earth Oxide from Scrap NdFeB Magnets. – Metals. Heftnr. 5. doi: 10.3390/met11050716.

KRUSE, S., RAULF, K., TRENTMANN, A., PRETZ, T. & FRIEDRICH, B. (2015): Processing of Grinding Slurries Arising from NdFeB Magnet Production. – Chemie Ingenieur Technik. Heftnr. 11. doi: 10.1002/cite.201500070.

KRWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)“. Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz. – URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/> (Stand: 27.05.2024).

KRWG (2020). Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union“ (NOVELLE DES KREISLAUFWIRTSCHAFTSGESETZES – KrWG). – URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s2232.pdf%27%5D__1716814630897 (Stand: 27.05.2024).

KUMARI, A. & SAHU, S. K. (2023): A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet. – Separation and Purification Technology. doi: 10.1016/j.seppur.2023.123527.

LIXANDRU, A., VENKATESAN, P., JÖNSSON, C., POENARU, I., HALL, B., YANG, Y., WALTON, A., GÜTH, K., GAUB, R. & GUTFLEISCH, O. (2017): Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment. – Waste management (New York, N.Y.). doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.028.

LORENZ, T. & BERTAU, M. (2018): Innovatives Recycling Seltener Erden durch Feststoffchlorierung. – Chemie in unserer Zeit. Heftnr. 5. doi: 10.1002/ciuz.201800841.

LORENZ, T. & BERTAU, M. (2019): Recycling of rare earth elements from FeNdB-Magnets via solid-state chlorination. – Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.051.

MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., LANGKAU, S., BAUR, S.-J., BILLAUD, M., DEUBZER, O., EBERLING, E., ERDMANN, L., HAENDEL, M., KRAIL, M., LOIBL, A., MAISEL, F., MARWEDE, M., NEEF, C., NEUWIRTH, M., ROSTEK, L., RÜCKSCHLOSS, J., SHIRINZADEH, S., STIJEPIĆ, D., TERCERO ESPINOZA, L. & TIPPNER, M. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen 50.

MCGUINNESS, P. J. & HARRIS, I. R. (1988): The use of hydrogen in the production and characterization of NdFeB magnets. – Journal of Applied Physics. Heftnr. 10. doi: 10.1063/1.342401.

MISHRA, A., KHOSHIMA, S., TOMŠE, T., PODMILJŠAK, B., ŠTURM, S., BURKHARDT, C. & ŽUŽEK, K. (2023): Short-Loop Recycling of Nd-Fe-B Permanent Magnets: A Sustainable Solution for the RE₂Fe₁₄B Matrix Phase Recovery. – Materials (Basel, Switzerland). Heftnr. 19. doi: 10.3390/ma16196565.

NEO MATERIALS (2020): Europe's First Mine-to-Magnets Supply Chain. – URL: <https://www.neomaterials.com/neo-launches-construction-of-re-magnet-manufacturing-plant/> (Stand: 31.05.2024).

ORMEROD, J. & CONSTANTINIDES, S. (1997): Bonded permanent magnets: Current status and future opportunities. – Journal of Applied Physics. Heftnr. 8. doi: 10.1063/1.365471.

ORMEROD, J., KARATI, A., BAGHEL, A. P. S., PRODIUS, D. & NLEBEDIM, I. C. (2023): Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. – Sustainability. Heftnr. 20. doi: 10.3390/su152014901.

PEETERS, J. R., BRACQUENE, E., NELEN, D., UEBERSCHAAR, M., VAN ACKER, K. & DUFLOU, J. R. (2018): Forecasting the recycling potential based on waste analysis: A case study for recycling Nd-Fe-B magnets from hard disk drives. – Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.080.

REIMER, M., SCHENK-MATHES, H., HOFFMANN, M. & ELWERT, T. (2018): Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040—When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU-Metals. Heftnr. 11. doi: 10.3390/met8110867.

ROSKILL (2020): Rare-Earth Report 2020.

SCHÄFER, K., BRAUN, T., RIEGG, S., MUSEKAMP, J. & GUTFLEISCH, O. (2023): Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. – Materials Research Bulletin. doi: 10.1016/j.materresbull.2022.112051.

SCHÖNFELDT, M., DIEHL, O., BROUWER, E., OPELT, K., GASSMANN, J. & GUTFLEISCH, O. (2018): Recycling of rare earth permanent magnets for advanced electric drives – Overcoming the criticality and supply risk.

SCHÖNFELDT, M., ROHRMANN, U., SCHREYER, P., HASAN, M., OPELT, K., GASSMANN, J., WEIDENKAFF, A. & GUTFLEISCH, O. (2023): Magnetic and structural properties of multiple recycled and sustainable sintered Nd-Fe-B magnets. – Journal of Alloys and Compounds. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.168709.

SCHULZE, R. & BUCHERT, M. (2016): Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. – Resources, Conservation and Recycling. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.05.004.

SOLVAY (2024): Solvay to develop major hub for rare earth magnets in Europe. – URL: <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-develop-major-hub-rare-earth-magnets-europe> (Stand: 10.06.2024).

UMWELTBUNDESAMT (2019): Seltene Erden in Permanentmagneten. – URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet-magnetmaterialien_fi_barrierefrei.pdf (Stand: 13.05.2024).

WALTON, A., YI, H., ROWSON, N. A., SPEIGHT, J. D., MANN, V., 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. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.033.

YANG, Y., WALTON, A., SHERIDAN, R., GÜTH, K., GAUß, R., GUTFLEISCH, O., BUCHERT, M., STEENARI, B.-M., VAN GERVEN, T., JONES, P. T. & BINNEMANS, K. (2017): REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. - Journal of Sustainable Metallurgy. Heftnr. 1. doi: 10.1007/s40831-016-0090-4. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-016-0090-4>.

YUE, M., YIN, X., LIU, W. & LU, Q. (2019): Progress in recycling of Nd-Fe-B sintered magnet wastes. – Chinese Physics B. Heftnr. 7. doi: 10.1088/1674-1056/28/7/077506.

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin

dera@bgr.de

