

Seltene Erden in Permanentmagneten

Factsheet

**Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III –
Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von
Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des
Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“**

(FKZ 3716 35 3230)

Das Projekt wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt und über den Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit mit Bundesmitteln finanziert

1 Übersicht

Permanentmagnete sind ein wesentliches Anwendungsfeld von Seltenen Erden, insbesondere von Samarium, Neodym, Praseodym, Terbium und Dysprosium.

Die technologische und geschichtliche Entwicklung von Seltenen-Erden Magneten (kurz SE-Magnete) beginnt Mitte der 1960er Jahre mit der Erfindung von Samarium-Kobalt Magneten (SmCo), die ab 1970 deutliche Steigerungen der Energiedichte gegenüber den herkömmlichen Ferriten und Aluminium-Nickel-Kobalt Magneten (AlNiCo) ermöglichten.¹ Eine weitere deutliche Steigerung wurde Anfang der 1980er Jahre mit der Erfindung der Neodym-Eisen-Bor Magnete (NdFeB) möglich, die bis heute die stärksten erhältlichen Permanentmagnete darstellen.

Da Neodym-Eisen-Bor Magnete (NdFeB) gegenüber den Samarium-Kobalt Magneten (SmCo) eine erhebliche größere Bedeutung nach Mengen² und Wertschöpfung³ aufweisen, werden hier nur NdFeB-Magnete betrachtet.

NdFeB-Magnete bestehen zu rund 67 Gew.-% aus Eisen, zu rund 1 Gew.-% aus Bor und zu 31-32 Gew.-% aus Seltenerdelementen⁴. Je nach Anwendungsbereich handelt es sich bei Niedertemperaturmagneten dabei um Neodym und Praseodym im Verhältnis von rund 4:1⁵. Je nach Temperaturbeanspruchung sind bis zu 8 Gew.-% Dysprosium in der Legierung enthalten. Bei Beimischung von Dysprosium⁶ ist der Neodym-/Praseodymanteil entsprechend niedriger in der Magnetlegierung. Der Anteil des Schweren Seltenerdelements Dysprosium, das für die Temperaturbeständigkeit der Permanentmagnete wichtig ist, ist nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen relevant, da es zu deutlich höheren Preisen gehandelt wird, als die Leichten Seltenerdelemente Neodym und Praseodym⁷. Weiterhin wird bei den NdFeB-Magneten zwischen polymergebundenen NdFeB-Magneten und gesinterten NdFeB-Magneten unterschieden. Letztere werden für besonders hochwertige Anwendungen eingesetzt. Da gesinterte NdFeB-Magnete sehr korrosionsanfällig sind, werden sie für viele Anwendungen mit einem Korrosionsschutz (z. B. Nickelüberzug) beschichtet⁸.

1 Gutfleisch, O.; Willard, M.A.; Brück, E.; Chen, C.H.; Sankar, S.G.; Liu, P. (2011): Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. In: Advanced Materials, Volume 23, 821-842, 2011.

2 Europäische Kommission (Hrsg.) (2015): Strengthening the European Rare Earth Supply-Chain - A Report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON), Brussels 2015.

3 Nach (Buchert et al. 2013) beträgt das Wertschöpfungsverhältnis zwischen NdFeB und SmCo > 20 :1

4 Hoffmann, M. F. (2016): Kann ein Recycling von NdFeB-Magneten in Europa vor 2030 erwartet werden? Masterarbeit, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Lehrstuhl für Rohstoffaufbereitung und Recycling, TU Clausthal 2016.

5 Dieses Verhältnis entspricht im globalen Mittel dem Verhältnis von Neodym und Praseodym in natürlichen Lagerstätten.

6 Gelegentlich ersetzen auch wenige Gew.-% Terbium teilweise den erforderlichen Dysprosiumanteil.

7 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2018): Volatilitätsmonitor Juni 2018, BGR/DERA Juli 2018. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Volatilitaetsmonitor/vm_18_06.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

8 Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J. (2013): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Öko-Institut e.V. gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Dezember 2013.

2 Mengenströme und Anwendungen

Die Weltproduktion an NdFeB-Magneten betrug im Jahr 2014 127.000 Tonnen, davon entfielen auf die VR China 112.000 Tonnen bzw. 88 % der globalen Produktion⁹. Der zweitgrößte Hersteller ist Japan mit rund 10% Anteil an der Weltproduktion.

2.1 Produktion

In Deutschland produziert der einzige Hersteller von NdFeB-Magneten zwischen 1000 bis 2000 Tonnen NdFeB-Magnete pro Jahr¹⁰; dies entspricht rund 1-2 % der Weltproduktion⁸. Die Anzahl der Betriebe in Deutschland, welche Magnete einsetzt, lässt sich kaum beziffern, da die Einsatzgebiete vielfältig sind.

In Deutschland existieren verschiedene Wirtschaftsverbände, welche auf Grund ihres Portfolios zu einem kleinen Teil auch die Magnetwerkstoffe abdecken. Beispiele hierfür sind der ZVEI¹¹ und der Fachverband Pulvermetallurgie¹².

2.2 Im-/Export

Nach UN-Comtrade importierte Deutschland im Jahr 2015 9.371 Tonnen Permanentmagnete (bzw. Legierungsmaterial zur Herstellung von Permanentmagneten)¹³. In Abbildung 1 sind die wichtigsten Herkunftsländer aufgeführt.

Die Statistik differenziert nicht nach den unterschiedlichen Arten von Permanentmagneten. Da UN-ComTrade auch monetäre Warenwerte ausweist, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den über 9.000 Tonnen nach Deutschland importiertem Material ganz überwiegend um NdFeB-Magnete handelt. Es kann geschätzt werden, dass rund 8.000 Tonnen NdFeB-Magnetmaterial nach Deutschland importiert wurden – und zwar ganz maßgeblich von dem Hauptproduzenten – der VR China. Es muss berücksichtigt werden, dass von den nach Deutschland importierten NdFeB-Magneten ein beträchtlicher Teil über den Export von Fertigwaren (insbesondere sind PKW relevant) nicht in der Nutzungsphase in Deutschland verbleibt und später der Kreislaufwirtschaft hierzulande nicht unmittelbar zur Verfügung steht.

9 ReportLinker (2018): Global and China NdFeB Industry Report, 2015-2018 – market research report. URL: <http://www.reportlinker.com/p02371211-summary/Global-andChina-NdfeB-Industry-Report.html> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

10 Exakte Zahlen hierzu sind aus Wettbewerbsgründen nicht bekannt.

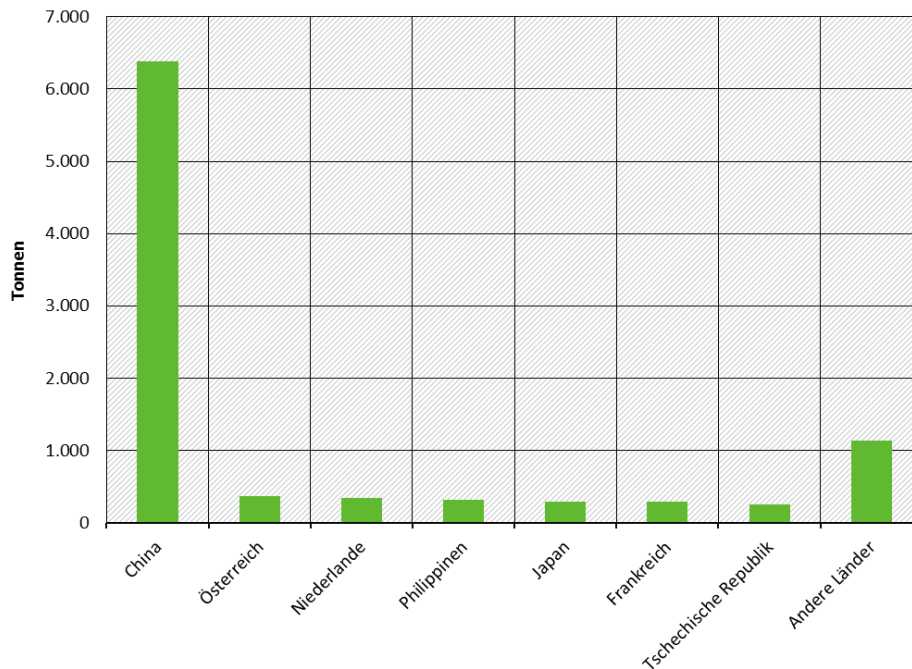
11 <https://www.zvei.org/>

12 <http://www.pulvermetallurgie.com/>

13 Nach dem HS Code 850511: Magnets, permanent magnets and articles intended to become permanent magnets after magnetisation, of metal

Abbildung 1: Import von Permanentmagneten nach Deutschland 2015

HS Code 850511: Magnets; permanent magnets and articles intended to become permanent magnets after magnetisation,



Quelle: Öko-Institut e.V. nach UN Comtrade Database ¹⁴

2.3 Anwendung

In Abbildung 2 sind die Hauptverwendungsgebiete für Magnetmaterialien 2012 dargestellt.

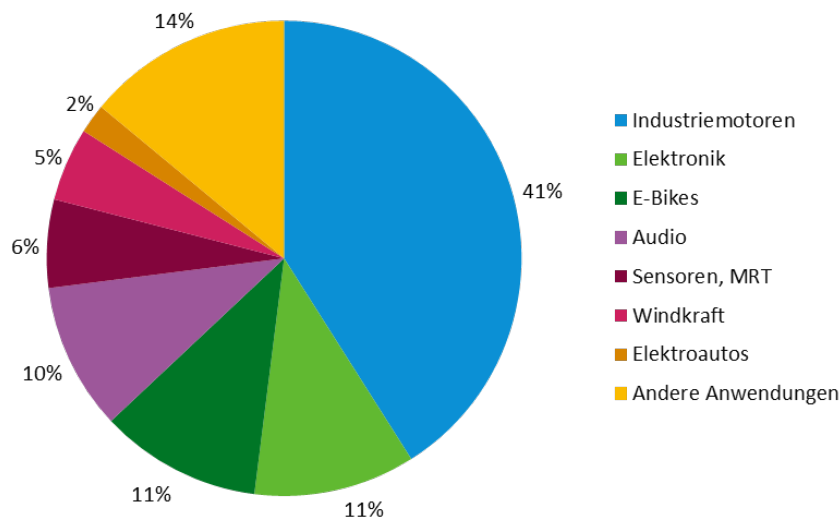
Das Haupteinsatzgebiet mit über 40 % sind Industriemotoren. Es folgen mit etwa gleichen Anteilen von rund 10 % Elektronik, E-Bikes und Audioanwendungen. Die übrigen Anwendungen, unter denen sich auch Windkraft und Elektroautos finden, machen die übrigen fast 30 % aus.

Der Import und Export von Permanentmagneten nach der UN-Comtrade Statistik allein liefert keine direkten Informationen über den aktuellen Lagerbestand (Stock) an NdFeB-Magneten in Deutschland bzw. die jährlichen Veränderungen dieses Lagerbestandes. Wesentliche Import- und Exportströme, die den Lagerbestand in Deutschland beeinflussen, kommen über diverse Produkte zustande, die NdFeB-Magnete enthalten. Wichtige Beispiele hierfür sind:

- Hybrid- und vollelektrische PKW mit permanent erregten Synchronmotoren,
- Pedelecs
- Industriemotoren wie Servomotoren (z.T. als Bestandteil von kompletten Maschinen) mit permanent erregten Synchronmotoren,
- Elektronische Geräte (Laptops, Mobiltelefone, Lautsprecher, Kopfhörer usw.),
- Generatoren für Windkraftanlagen (Direct-Drive bzw. Hybridsysteme)
- Magnetresonanztomographen.

¹⁴ United Nations (2018): UN Comtrade Database. URL: <https://comtrade.un.org/data> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

Abbildung 2: Hauptverwendungsgebiete der Magnetmaterialien



Quelle: Öko-Institut e.V. nach⁴

Bei der Aufteilung der NdFeB-Magnete nach Anwendungsfeldern muss berücksichtigt werden, dass hier sehr dynamische und z.T. gegenläufige Entwicklungen stattfinden. So nehmen „neue“ Anwendungen wie Windkraft und Elektroautos in den letzten Jahren ständig zu, während „alte“ Anwendungen wie Bereiche der Elektronik (vor allem Ersatz von hard disc drives – HDD Festplatten- durch solid state discs) an Bedeutung verlieren.

In den letzten Jahren sind eine Reihe von Materialflussanalysen bzgl. Seltenerdelementen für Europa bzw. für einzelne Mitgliedstaaten publiziert worden^{15 4 16 17}. Aus einer sehr aktuellen Arbeit aus dem Jahr 2018 zur Situation und den zukünftigen Entwicklungen von NdFeB-Magneten in Europa, die alle Anwendungsbereiche erfasst¹⁸, lässt sich für Deutschland eine Einsatzmenge von rund 1.570 Tonnen (reiner Verbleib in Deutschland, d.h. ohne Exporte von Magneten in Gütern wie PKW, Maschinen usw.) und ein Lagerbestand an NdFeB-Magneten im Jahr 2015 von insgesamt rund 10.500 Tonnen ermitteln.

Trends: In der Zukunft werden die Elektromobilität sowie die Energiewende zu einer vermehrten Nachfrage von Seltenen Erden führen, da daraus hergestellten Magnete in Elektrofahrzeugen und Windkraftanlagen eingesetzt werden.

3 Relevante rechtliche Regelungen

Luft: Nach der vierten Bundesimmissionsschutzverordnung (4. BImSchV) ist für Anlagen zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen aus Erzen, Konzentraten oder sekundären Rohstoffen durch metallurgische, chemische oder elektrolytische Verfahren (Anhang 1 Nr. 3.3), für Anlagen zum Schmelzen, zum Legieren und zur Raffination von Nichteisenmetallen mit einer Schmelzkapazität von mehr als 20 t sonstigen Nichteisenmetallen pro Tag (Anhang 1 Nr. 3.4.1), für Nichteisenmetallgießereien mit einer Verarbeitungskapazität an Flüssigmetall (sonstige Nichteisenmetalle) von mehr als 20 t pro Tag (Anhang Nr. 3.8.1) sowie Anlagen zur Behandlung

¹⁵ Guyonnet, D.; Planchon, M.; Rollat, A.; Escalon, V.; Tuduri, J.; Charles, N.; Vaxelaire, S.; Dubois, D.; Fargierd, H. (2015): Material flow analysis applied to rare earths elements in Europe. J. Clean Prod. 2015, 107, 215-228.

¹⁶ Crock, W.D. (2016): Mapping stocks and flows of neodymium, Assessment of neodymium production and consumption in the Netherlands in 2010 and 2030, TU Delft 2016.

¹⁷ Habib, K.; Schibye, P.K.; Vestbø, A.P.; Dall, O.; Wenzel, H. (2014): Material Flow Analysis of NdFeB-Magnets for Denmark: A Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach, Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 12229 – 12237.

¹⁸ Reimer, M.V. et al (2018) Recycling Decisions in 2020, 2030 and 2040 – When can substantial NdFeB Extraction be expected in the EU?, Metals 2018, 8, 867.

von Schrotten in Shredderanlagen mit einer Durchsatzkapazität von 50 t und mehr am Tag (Anhang 1 Nr. 3.22.1 und 8.9.1.1) ein Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung) vorgeschrieben. Für Anlagen mit 2 t bis weniger als 20 t Durchsatz am Tag (Anhang 1 Nr. 3.4.2, 3.8.2), bzw. 10 t bis weniger als 50 t (Anhang 1 Nr. 3.22.2 und 8.9.1.2) sowie Anlagen zur Herstellung von Metallpulvern und Pasten ist ein vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) vorgeschrieben. Die 4. BImSchV weist einige Ausnahmen hiervon aus.

Nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist für Errichtung und Betrieb einer Anlage zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen aus Erzen, Konzentraten oder sekundären Rohstoffen durch metallische, chemische oder elektrolytische Verfahren (Anlage 1 Nr. 3.4) und für die Errichtung und Betrieb einer Anlage zum Schmelzen, zum Legieren oder zur Raffination von Nichteisenmetallen mit einer Schmelzkapazität von 100.000 t oder mehr pro Jahr (Anlage 1 Nr. 3.5.1) eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen. Für eine Kapazität von 20 t und mehr pro Tag, aber weniger als 100.000 t pro Jahr (Anlage 1 Nr. 3.5.2) muss eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls durchgeführt werden. Bei 2 t bis weniger als 20 t pro Tag (Anlage 1 Nr. 3.5.3) genügt eine standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls. Hierbei gelten einige Ausnahmen.

Die Kapitel 5.4.3.3 und 5.4.3.4 der TA Luft befassen sich mit den spezifischen Anforderungen an Anlagen zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen und zum Schmelzen, zum Legieren und zur Raffination von Nichteisenmetallen. Diese Anforderungen umfassen sowohl die baulichen und betrieblichen Anforderungen als auch die zulässigen Emissionswerte, zum Beispiel für Staub, Schwermetalle und organische Verbindungen sowie an die eingesetzten Brennstoffe.

Abwasser: Die Nutzung von Gewässern, wie zum Beispiel die Entnahme von Wasser aus Gewässern oder das Einleiten von Stoffen in Gewässer, sind im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt. Die Abwasserverordnung (AbwV) beinhaltet Vorschriften für die Vermeidung, die Messung und die Einleitung von Abwasser in Gewässer. In Anhang 39 der AbwV sind spezielle Anforderungen für Abwasser aus der Herstellung von Nichteisenmetallen festgelegt.

Abfall: Die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen wird im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt. Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) regelt die Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten. Zahlreiche Verordnungen regeln die Sammlung und Verwertung bestimmter Abfallströme (z.B. Altfahrzeuge). Die Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) regelt, ob gewisse Abfälle als Gefahrgut transportiert werden müssen.¹⁹

4 Recyclingsituation

Das Maß für funktionierendes Recycling sind Recyclingraten. Diese lassen sich anhand unterschiedlicher Indikatoren messen. Eine Möglichkeit besteht darin, bei der Metallherstellung die Anteile sekundärer, also recycelter Bestandteile mit dem Gesamtgewicht der Produkte ins Verhältnis zu setzen (Recycled Content = RC). Dieser Indikator lässt allerdings keine Rückschlüsse über die Effizienz bei der Sammlung und Verwertung von Metallschrott zu. Hierzu muss die Phase mitbetrachtet werden, in der ein Produkt aus der Nutzung ausscheidet (End-of-Life; EoL). Die EoL-Recyclingrate bezeichnet die Menge eines rückgewonnenen Materials im Verhältnis zu der Menge des aus der Nutzung ausgeschiedenen Materials.

Im Jahr 2011 veröffentlichte die UNEP Abschätzungen zu den globalen Recyclingraten von Seltenen Erden (siehe Tabelle 1).

¹⁹ Umweltbundesamt (2013): Nichteisenmetallindustrie. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestrukturen/herstellung-verarbeitung-von-metallen/nichteisenmetallindustrie#textpart-1> (zuletzt abgerufen 25.07.2018).

Tabelle 1: Recyclingraten der für Magneten relevanten Seltenen Erden

Metall	RC	EoL
Neodym	1 - 10 %	< 1 %
Praseodym	1 - 10 %	< 1 %
Terbium	< 1 %	< 1 %
Dysprosium	1 - 10 %	< 1 %

Quelle: Öko-Institut e.V. nach ²⁰

Ein End-of-Life-Recycling fand praktisch weltweit nicht statt; die etwas höheren Werte für den Recycled Content lassen sich durch teilweise Verwertung von Produktionsrückständen (Magnet-Schleifschlämme usw.) erklären.

Für Deutschland wurde u.a. in Arbeiten für das Umweltbundesamt das Aufkommen von NdFeB-Magneten als Post-Consumer-Material aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen untersucht^{21,22}. Durch Umrechnung der dort erhobenen Nd-Potenziale (mit Faktor vier auf NdFeB-Magnetmaterial umgerechnet) lässt sich aus diesen Quellen auf ein NdFeB-Magnetaufkommen von rund 600 Tonnen in Deutschland im Jahr 2020 schließen. Allerdings wurden in diesen Arbeiten aufgrund der Projektzuschnitte nicht alle Anwendungen für NdFeB-Magnete untersucht. Wichtige Anwendungsgebiete wie z.B. die zahlreichen Elektromotoren in PKW (hier sind Elektromotoren für Servolenkungen, Fensterheber, Gurtstraffer usw. gemeint) blieben ausgeklammert.

Aus einer 2018 veröffentlichten Arbeit²³, die alle Anwendungsgebiete für NdFeB-Magnete abdeckt, lassen sich für Deutschland im Jahr 2015 rund 800 Tonnen NdFeB-Magnete als Post-Consumer-Material abschätzen. Die wichtigsten Anwendungsgebiete, die NdFeB-Magnete in die Nachgebrauchsphase 2015 abgaben, sind Elektromotoren in PKW (Servolenkungen etc.) mit rund 370 Tonnen sowie aus diversen Elektronikprodukten mit rund 220 Tonnen. Allerdings muss hier betont werden, dass ein beträchtlicher Teil, der in Deutschland stillgelegten PKW und auch der ausgemusterten Elektronikprodukte nicht im Inland verbleiben und damit der hiesigen Kreislaufwirtschaft entzogen sind.

Nach Recherchen von (Hoffmann 2016)⁴ wurden 2015 in Deutschland rund 70 Tonnen NdFeB-Magnete aus Anwendungen entnommen. Nach Angaben von (Elwert 2018)²⁴ handelt es sich hier ganz überwiegend um die manuelle Demontage von Magneten aus Desktops oder Laptops, die in staatlich geförderten Einrichtungen (Eingliederungsmaßnahmen für Langzeitarbeitslose, Menschen mit Behinderungen etc.) separiert werden. Umgekehrt bedeutet dies, dass von dem aktuellen theoretischen Recyclingpotenzial an NdFeB-Magneten rund 730 Tonnen (91 %) als Verluste durch Exporte oder den Verbleib als fein verteilte Stäube in der konventionellen Stahlschrottschiene zu verbuchen sind. Die Ursache ist in erster Linie in der mangelnden Wirtschaftlichkeit der manuellen und mechanischen Separierungsoptionen der NdFeB-Magneten zu sehen wie (Elwert et al. 2018) im Detail anhand aktueller Schrottpreise für NdFeB-Magnete berechnet haben.

20 UNEP (2011): Recycling of Metals - A Status Report. United Nations Environmental Programme. ISBN: 978-92-807-3161-3.

21 Sander, K. et al (2017): Recyclingpotential strategischer Metalle (ReStra), UBA-Texte 68, 2017, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2017.

22 Sander K. et al. (2018): Behandlung von Elektroaltgeräten (EAG) unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten, UBA-Texte 31/2018, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2018.

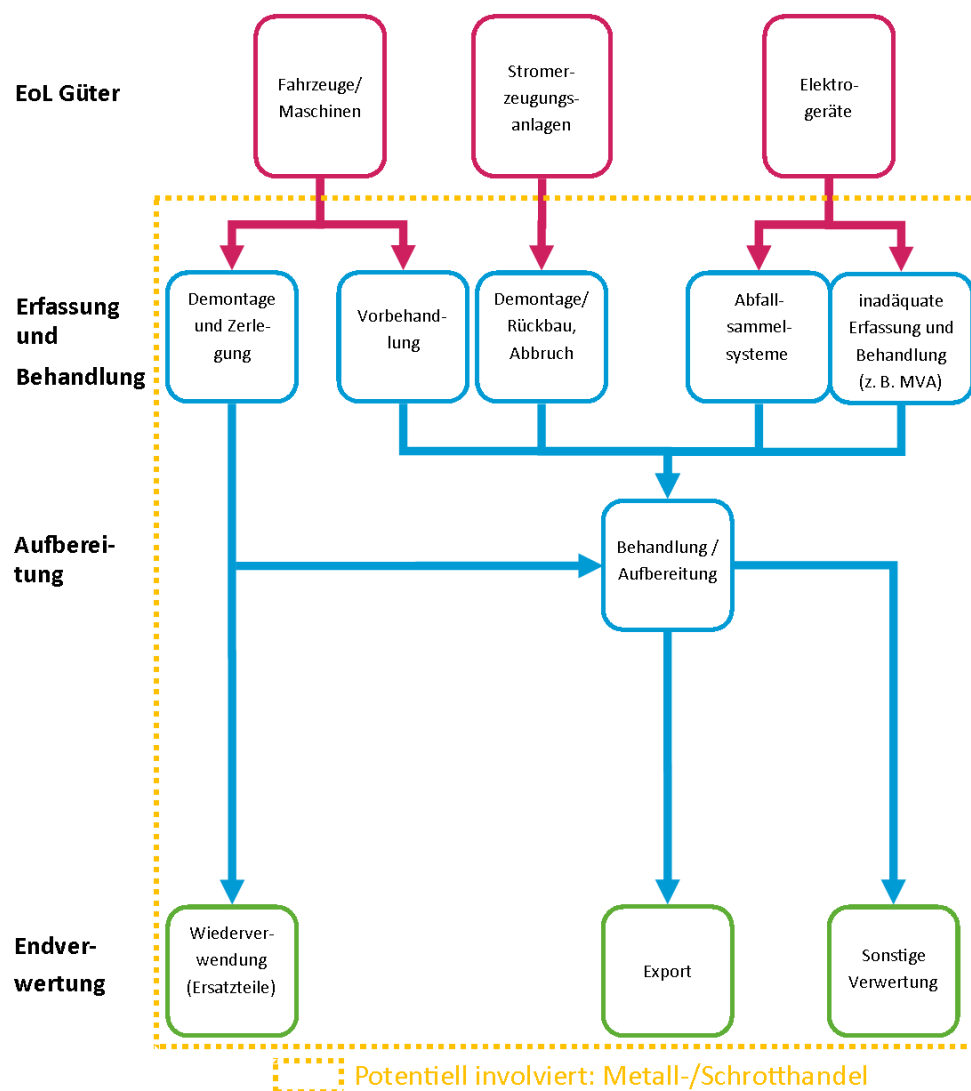
23 Berechnet nach Daten aus Reimer, M.V. et al (2018), Fußnote 18

24 Mündliche Mitteilung Prof. T. Elwert (TU Clausthal) vom 29.06.2018.

Die identifizierten rund 70 Tonnen EoL-NdFeB-Magnete, die in Deutschland separiert werden, werden ebenso wie rund 100 Tonnen NdFeB-haltige Schleifschlämme und sonstige NdFeB-Produktionsreste⁴ nach Japan oder China (entweder direkter Einsatz für Magnetproduktion oder Zugabe zu Seltenerdkonzentrat für die Auftrennung und Aufreinigung der diversen Seltenerdmetalle) exportiert. In Deutschland sowie in Europa insgesamt findet kein Recycling von NdFeB-Magneten statt, da keinerlei Recyclinginfrastruktur im industriellen Maßstab hierfür existiert. Eine wesentliche Ursache liegt darin, dass in Deutschland und Europa keine Primärförderung und Aufbereitung von Seltenen Erden existiert. Auch die weiteren Schritte der Wertschöpfungskette – vor allem die Produktion von NdFeB-Magneten – findet global gesehen nur zu einem sehr kleinen Anteil in Deutschland (rund 1-2%, vgl. ⁸) statt.

Für die dargelegten Gütergruppen sind in Abbildung 3 die identifizierten Verwertungswege zusammengefasst.

Abbildung 3: Verwertungswege der Magnetwerkstoffe



Quelle: Öko-Institut e.V.

Fahrzeuge und Maschinen werden demontiert und zerlegt bzw. vorbehandelt (z. B. mittels eines Shredders). Hierbei kommt es zum Totalverlust der Magnete, welche im Shredder meist

pulverisiert werden und so in die Eisenfraktion gelangen. Im Zuge des Stahlrecyclings gehen die Seltenen Erden in die Schlacke. Beim Elektroschrott ist dies ähnlich, weshalb eine manuelle Entnahme notwendig ist. Energieerzeugungsanlagen (Windkraftanlagen) werden rückgebaut. Die dort enthaltenen großen Magneten können gut separiert werden. Die separierten Magnetmaterialschrötte werden dann exportiert.

Im gesamten System sind Händler entweder als separate Akteure oder als Teil des jeweiligen Recyclingunternehmens beteiligt (gelber Rahmen).

5 Recyclingperspektiven

In Deutschland findet derzeit (2018) kein Recycling von NdFeB-Magneten statt. Ungeachtet dessen könnten sich die Recyclingperspektiven für NdFeB-Magneten mittel- und langfristig zumindest moderat verbessern. Folgende Entwicklungen sind relevant:

- Das Aufkommen an EoL-NdFeB-Magneten in Deutschland wird von rund 800 t 2015 über rund 1.700 t im Jahr 2030 auf rund 4.800 t im Jahr 2040 steigen²⁵,
- Der Anteil von EoL-Produkten mit erheblich größeren Magnetgewichten pro Einheit (Pedelec-Motoren, Antriebsmotoren von vollelektrischen und Hybridfahrzeugen, Windkraftanlagen) nimmt signifikant über 2030 bis 2040 zu^{26 4 27}. Dies kommt der Wirtschaftlichkeit der Separierung der NdFeB-Magnete aus den EoL-Gütern stark zu Gute.

Die technischen Möglichkeiten der Wiederverwertung von NdFeB-Magneten bzw. den darin enthaltenen Seltenerdmetallen wurden in umfassenden Forschungsprojekten wie MORE²⁸ und SEMAREC²⁹ eingehend untersucht.

Es besteht grundsätzlich nach Ausbau und Separierung der NdFeB-Magnete die Möglichkeit des Legierungsrecyclings. EoL-Magnetmaterial kann zur Herstellung neuer NdFeB-Magnete eingesetzt - oder zur Gewinnung von gereinigtem Neodym-/Praseodymoxid sowie Dysprosium-/Terbiumoxid^{30 31} durch hydrometallurgische Aufbereitung und Isolierung genutzt werden. Die Seltenerdoxide könnten in geeigneten Anlagen in die metallische Form überführt und anschließend mit Eisen und Bor wieder zu NdFeB-Material legiert werden. Für diesen Schritt haben in Europa derzeit nur die britische LCM³¹ (Less Common Metals) sowie die Silmet³² in Estland überschaubare Fertigungskapazitäten.

Für das Magnet-zu-Magnet-Recycling stünde in Deutschland ein Anlagenstandort für gesinterte NdFeB-Magnete prinzipiell zur Verfügung. Für die hydrometallurgische Aufbereitung und die nachfolgenden Schritte existieren in Deutschland zurzeit lediglich Einrichtungen im Labormaßstab. Angesichts der beschriebenen Limitierungen der industriellen Struktur für NdFeB-Magnete bzw. Seltene Erden in Deutschland/Europa ist es denkbar, dass zukünftig in Deutschland größere Mengen an NdFeB-Magneten ausgebaut und separiert, aber diese wie

25 Berechnet nach Daten aus Fußnote 18

26 NdFeB-Magnete je Pedelec im Durchschnitt: 318 g je Fahrzeug, E-PKW und Hybrid-PKW 1,5 – 2,5 kg je Fahrzeug (Hoffmann 2016), Windkraftanlagen mit PM-Synchrogeneratoren („Direct-Drive“) 650 kg/MW (Glöser-Chahoud (2016)).

27 Glöser-Chahoud, S. et al. (2016): Dynamische Materialflussanalyse der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium in Deutschland. 4. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Tutzing 16./17. Februar 2016.

28 Bast, U. et al. (2014): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Antrieben – MORE, Abschlussbericht gefördert durch BMBF, 2014.

29 Elwert, T. et al. (2018): Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologieketten für NdFeB-Magnete – SEMAREC, in Recycling und Rohstoffe, Band 11, TK-Verlag 2018.

30 Die Details der genannten Verfahren sind in (Bast et al. 2014) und (Elwert et al. 2018) eingehend ausführlich beschrieben.

31 <http://www.lesscommonmetals.com/>

32 <https://mmta.co.uk/members-directory/npm-silmet-as/>

bisher in Asien verwertet werden. Dies wird nicht zuletzt von der Entwicklung der Rohstoffpreise für Seltenerdmetalle abhängen.