

Studie

Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg

Matthias Buchert, Andreas Manhart, Jürgen Sutter

Öko-Institut e. V., Freiburg

Förderkennzeichen: ZO3R 12002

Laufzeit: 01.11.2012 - 31.12.2013

Die Arbeiten der Projekte der Zukunftsoffensive III werden mit Mitteln des Landes
Baden-Württemberg gefördert.

Januar 2014



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Impressum:

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg, Deutschland
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Tel. +49 (0) 761 – 4 52 95-0
Fax +49 (0) 761 – 4 52 95-288

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Deutschland
Tel. +49 (0) 6151 – 81 91-0
Fax +49 (0) 6151 – 81 91-133

Büro Berlin
Schicklerstr. 5-7
10179 Berlin, Deutschland
Tel. +49 (0) 30 – 40 50 85-0
Fax +49 (0) 30 – 40 50 85-388

Fachliche Begleitung

Dr. Christian Kühne
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Referat Umwelttechnik, Forschung, Ökologie
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
Telefon 0711 126-0
Telefax 0711 126-2881

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	1
1 Einleitung	2
2 Seltene Erden und Permanentmagnete	5
2.1 Klassifizierung von Seltenen Erden Magneten	8
2.1.1 Samarium-Kobalt Magnete	9
2.1.2 Neodym-Eisen-Bor Magnete	10
2.2 Einsatzbereiche von Seltenen Erden Magneten	11
2.2.1 Kommunikations- und Unterhaltungselektronik	11
2.2.2 Fahrzeugbereich	12
2.2.3 Windkraftanlagen	13
2.2.4 Industrieanlagen	14
2.2.5 Sonstige Anwendungen	14
3 Seltene Erden Magneten im industriellen Einsatz	14
3.1 Seltene Erden Magnete in Elektromotoren	14
3.1.1 Klassifikation von Elektromotoren	14
3.1.2 Aufbau permanenterregte Synchronmaschinen	17
3.1.3 Marktentwicklung	17
3.1.4 Effizienzstandards und rechtliche Anforderungen	18
3.1.5 Lebensdauern und Entsorgungswege	23
3.2 Seltene Erden Magnete in Sortieranlagen	26
3.2.1 Überbandabscheider	26
3.2.2 Magnetische Sortierrollen	27
3.2.3 Andere Sortiervorrichtungen	28
3.3 Seltene Erden Magnete in Hebwerkzeugen	29
4 Abschätzung der eingesetzten Magnetmengen im industriellen Einsatz in Deutschland und Baden-Württemberg	31
4.1 Methodik	31
4.1.1 Bottom-Up-Analyse	31
4.1.2 Top Down Analyse	31
4.2 Jährliche Produktion synchroner Servomotoren für Industrieanwendungen	32
4.3 Jährlicher Verbrauch an NdFeB-Magneten in Industrieanwendungen	33

5	Ausweichstrategien während der Hochpreisphase	34
6	Recyclingpotenziale	35
7	Anforderungen an eine Kreislaufwirtschaft	38
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	39
9	Literatur	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Stellung der Seltenen Erden im Periodensystem der Elemente (Schüler et al. 2011)	2
Abbildung 2	Globale Nachfrage nach Seltenen Erden (in Tonnen Seltene Erden Oxid) nach Anwendungsgebieten zwischen 2006-2008 (Kingsnorth 2010)	3
Abbildung 3	Zeitliche Entwicklung der Energiedichte (BH) _{max} von verschiedenen Arten von Permanentmagneten	5
Abbildung 4	Weltweite Produktion an NdFeB-Magneten (2005 bis 2020) in kt	6
Abbildung 5	Marktanteile unterschiedlicher Arten von Permanentmagneten (Quelle: US Magnetic Materials Association 2010, zitiert nach Gutfleisch et al. 2011)	7
Abbildung 6	Weltweite Produktion an Permanentmagneten (2005 bis 2020) in kt und Mio. USD	7
Abbildung 7	Klassifizierung von Seltener Erden Magneten (eigene Darstellung Öko-Institut)	9
Abbildung 8	Polymergebundene NdFeB-Magnete von Gleichstrommotoren in optischen Laufwerken (links) und Festplatten (rechts).	12
Abbildung 9	Verschiedene mögliche Anordnung von Dauermagneten am Läufer von permanenterregten Synchronmotoren.	17
Abbildung 10	Mindesteffizienzen von 4-poligen 50Hz Elektromotoren der Klassen IE1, IE2 und IE3 nach IEC 60034-30 sowie der vorgeschlagenen IE4-Klasse nach IEC 60034-31.	19
Abbildung 11	Anteile der verschiedenen Motor-Effizienzklassen in der industriellen Nutzung in der EU (Prognose ohne Motorenverordnung 640/2009).	21
Abbildung 12	Anteile der verschiedenen Motor-Effizienzklassen in der industriellen Nutzung in der EU (Prognose mit Motorenverordnung 640/2009).	22
Abbildung 13	Beobachtete Abweichungen der realen Lebensdauern von der technisch erwarteten Lebensdauer von Elektromotoren.	24
Abbildung 14	Funktionsschema eines Überbandabscheiders im Abfall- und Recyclingbereich	27
Abbildung 15	Funktionsschema einer magnetischen Sortierrolle.	28
Abbildung 16	Funktionsschema einer Kaskadensortieranlage.	29
Abbildung 17	Hebemagnet der Firma Hebezone	30
Abbildung 18	Funktionsweise von Hebemagneten	30
Abbildung 19	Produktion synchroner Servomotoren in Deutschland seit Anfang der 1980er Jahre	33

Abbildung 20	Entwicklung des Stocks an NdFeB-Magneten in Industrieanwendungen in Deutschland	37
Abbildung 21	Entwicklung der potenziell anfallenden Mengen an NdFeB-Magneten pro Jahr aus ausgemusterten Motoren aus Industrieanwendungen in Deutschland	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Motorenklassifizierung nach Stromart und Wirkungsweise (Quelle: Fischer 2011)	16
Tabelle 2	Vergleich der IE- und EFF-Klassifizierung von Elektromotoren.	20
Tabelle 3	Durchschnittliche Lebensdauern von Elektromotoren im industriellen Einsatz	24

Verzeichnis der Abkürzungen

AlNiCo	Aluminium-Nickel-Kobalt
CEMEP	Comité Européen de Constructeurs de Machines Electriques et d'Electronique de Puissance
EFF	Effizienzklassen nach CEMEP
ERECON	European Rare Earths Competency Network
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
HREE	heavy rare earths elements
IE	Effizienzklassen nach IEC
IEC	International Electrotechnical Commission
LREE	light rare earths elements
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
REE	rare earth elements
SE	Seltene Erden
SEE	Seltenerdelemente
SmCo	Samarium-Kobalt
USD	US-Dollar

1 Einleitung

Die chemischen Elemente, die unter der Bezeichnung „Seltene Erden“ zusammengefasst werden, sind vor allem seit den Jahren 2010/2011 in den Fokus der Medien, der Forschung, der Politik und der Wirtschaft gerückt. Der „Hype“ um die Seltenen Erden, die für viele Zukunftstechnologien unverzichtbar sind, wurde durch extreme Preisanstiege dieser Elemente bzw. ihrer Verbindungen, verbunden mit großer Besorgnis vor Verknappungen, ausgelöst. Vor allem in den westlichen Industriestaaten wurde man sich der Tatsache bewusst, dass zu dieser Zeit rund 97 % der Primärförderung und -herstellung der Seltenen Erden auf die Volksrepublik China fielen – verbunden mit entsprechenden Möglichkeiten der Preisbildung und Versorgung von Unternehmen in Drittstaaten (Schüler et al 2011).

In der nachfolgenden Abbildung sind die Seltenen Erden im Periodensystem der chemischen Elemente aufgeführt. Es handelt sich um die 17 Elemente Scandium (Sc), Yttrium (Y), Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium¹ (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb) und Lutetium (Lu).

Abbildung 1 Stellung der Seltenen Erden² im Periodensystem der Elemente (Schüler et al. 2011)

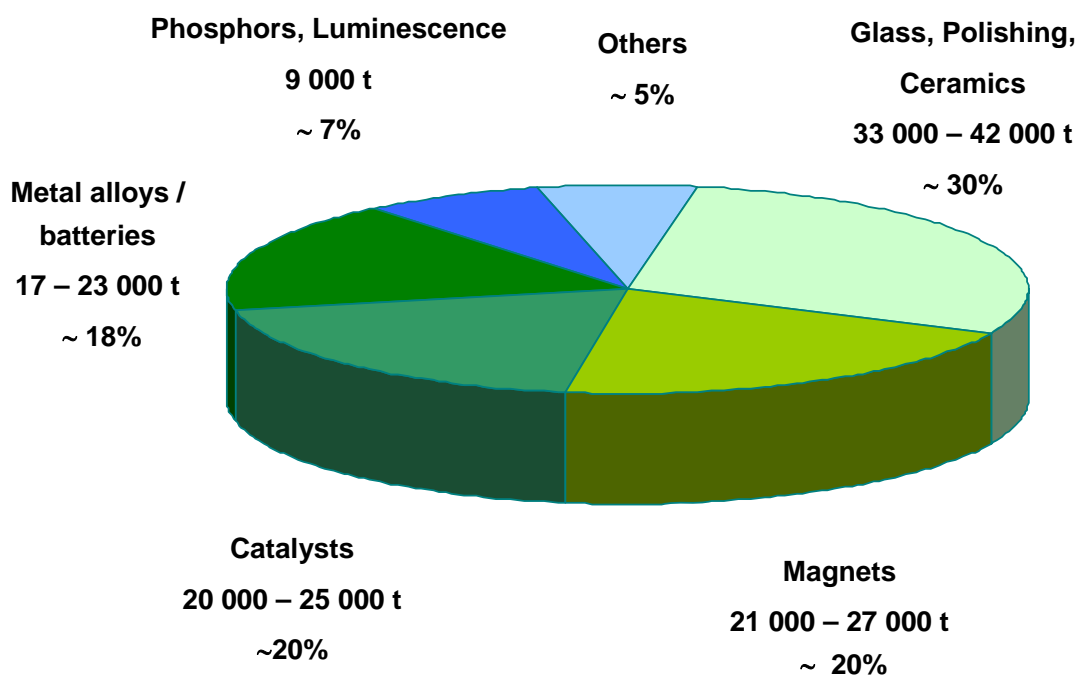
1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.003																												
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182	<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px;">REE</div> <div style="background-color: yellow; padding: 5px;">LREE</div> <div style="background-color: blue; padding: 5px;">HREE</div> </div>										5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797																												
11 Na Natrium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.3050	13 Al Aluminium 26.9815386	14 Si Silicium 28.0855	15 P Phosphor 30.973761	16 S Schwefel 32.066	17 Cl Chlor 35.4527	18 Ar Argon 39.948																																						
19 K Kalium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chrom 51.9961	25 Mn Mangan 54.938044	26 Fe Eisen 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Kupfer 63.546	30 Zn Zink 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsen 74.92160	34 Se Selen 78.96	35 Br Brom 79.904	36 Kr Krypton 83.80																												
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirkon 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdän 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silber 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Zinn 118.710	51 Sb Antimon 121.760	52 Te Tellur 127.60	53 I Jod 126.90447	54 Xe Xenon 131.29																												
55 Cs Cäsium 132.90545	56 Ba Baryum 137.327	57 La Lanthan 138.905	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Wolfram 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.227	78 Pt Platin 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Quecksilber 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Blei 207.2	83 Bi Bismut 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatin (210)	86 Rn Radon (222)																												
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actin (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 (269)	111 (272)	112 (277)	113	114																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>58 Ce Cerium 140.12</td> <td>59 Pr Praseodym 140.90768</td> <td>60 Nd Neodym 144.24</td> <td>61 Pm Promethium (145)</td> <td>62 Sm Samarium 150.36</td> <td>63 Eu Europium 151.964</td> <td>64 Gd Gadolinium 157.25</td> <td>65 Tb Terbium 158.92534</td> <td>66 Dy Dysprosium 162.50</td> <td>67 Ho Holmium 164.93033</td> <td>68 Er Erbium 167.26</td> <td>69 Tm Thulium 168.93403</td> <td>70 Yb Ytterbium 173.0547</td> <td>71 Lu Lutetium 174.967</td> </tr> <tr> <td>90 Th Thorium 232.0377</td> <td>91 Pa Protactinium 231.03688</td> <td>92 U Uranium 238.02891</td> <td>93 Np Neptunium (237)</td> <td>94 Pu Plutonium (244)</td> <td>95 Am Americium (243)</td> <td>96 Cm Curium (247)</td> <td>97 Bk Berkelium (247)</td> <td>98 Cf Californium (251)</td> <td>99 Es Einsteinium (252)</td> <td>100 Fm Fermium (257)</td> <td>101 Md Mendelevium (258)</td> <td>102 No Nobelium (259)</td> <td>103 Lr Lawrencium (262)</td> </tr> </table>																		58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodym 140.90768	60 Nd Neodym 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93403	70 Yb Ytterbium 173.0547	71 Lu Lutetium 174.967	90 Th Thorium 232.0377	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)
58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodym 140.90768	60 Nd Neodym 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93403	70 Yb Ytterbium 173.0547	71 Lu Lutetium 174.967																																
90 Th Thorium 232.0377	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)																																

¹ Promethium (Pm) kommt als einziges Element aus der Gruppe der Seltenen Erden nicht natürlich vor.

² Seltene Erden ist eine historische Bezeichnung und meint eigentlich die Oxide dieser Elemente, die häufigste Form des natürlichen Vorkommens. Fachleute sprechen häufig von Seltenerdelementen (SEE) – engl. REE. In diesem Bericht verwenden wir dennoch den populären Terminus „Seltene Erden“.

Die Seltenen Erden werden oft in die Untergruppe der „Leichten Seltenen Erden“ (engl. LREE = light rare earths elements) und die Untergruppe der „Schweren Seltenen Erden“ (engl. HREE = heavy rare earths elements) unterteilt (siehe obige Abbildung). Die einzelnen Seltenen Erden haben unterschiedliche Relevanz für diverse Technologien. Die nächste Abbildung gibt einen Überblick über die wesentlichen Anwendungsbereiche der Seltenen Erden.

Abbildung 2 Globale Nachfrage nach Seltenen Erden (in Tonnen Seltene Erden Oxid) nach Anwendungsgebieten zwischen 2006-2008 (Kingsnorth 2010)



Aus der Graphik ist erkennbar, dass auf Magnetanwendungen für den genannten Zeitraum rund 20 % der globalen Anwendungen fielen. Dieser Anteil wird weiter steigen, da vor allem die Neodym-Eisen-Bor Magnete (NdFeB) starke Wachstumsraten aufweisen, die in Zukunft noch steigen könnten (Grieb 2013).

Das Öko-Institut hat im Jahr 2011 eine umfassende und viel beachtete Studie zu Seltenen Erden im Auftrag der Fraktion „The Greens/European Free Alliance“ im Europäischen Parlament erstellt, die nicht zuletzt das Augenmerk auf die z.T. extremen Umweltbelastungen der Primärförderung an Seltenen Erden vor allem in der VR China (Belastungen durch radioaktive Rückstände, Grundwasserbelastungen, Schadstoffemissionen usw.) gerückt hat (Schüler et al. 2011).

Recycling von Seltenen Erden aus Post-Consumer Material tendierte im globalen Rahmen bei Erstellung der Studie im Jahr 2011 gegen null (Schüler et al. 2011, UNEP 2011). Die Ursache lag in der Vergangenheit an fehlenden Preisanreizen (bis ca. 2008 lagen die Preise

für Seltene Erden vergleichsweise niedrig), fehlenden Materialmengen zum Recycling (viele Anwendungen sind erst in den letzten Jahren mengenrelevant geworden) und nicht zuletzt einer fehlenden Recyclinglogistik und fehlenden Recyclingtechnologien. Da inzwischen das Preisniveau für Seltene Erden deutlich höher liegt und die Einsatzmengen in vielen Bereichen steigen (und damit zeitversetzt ein größeres Mengenpotenzial für Recycling aus Post-Consumer Material entsteht) hat das Öko-Institut den Einstieg in das Recycling von Seltenen Erden in Europa für die nächsten Jahre vorgeschlagen (Schüler et al. 2011). Ziel ist die Abhängigkeit von der Primärförderung mittel- und langfristig zu verringern und über die Bereitstellung von Seltenen Erden aus Recyclingprozessen insgesamt die Umweltbelastung bei der Bereitstellung dieser für viele Zukunftstechnologien wichtigen Metalle zu verringern. Eine der vorgeschlagenen Maßnahmen in diese Richtung, welche die EU Kommission inzwischen aufgegriffen hat, ist die Einrichtung und Arbeit des Netzwerkes European Rare Earths Competency Network (ERECON), welches zum Ziel, hat die diversen europäischen Aktivitäten zu Seltenen Erden (Recycling, Substitution, umweltfreundliche Primärförderung) zu koordinieren und Forschungsprogramme sowie politische und legislative Aktivitäten zu initiieren.³

Inzwischen sind eine Reihe von wichtigen Forschungsprojekten im In- und Ausland zum Recycling von Seltenen Erden angelaufen; für Deutschland ist hier insbesondere das laufende Projekt Motor Recycling (MORE) unter der Leitung von Siemens (Bast et al. 2014) zu nennen, welches intensiv Grundlagen sowohl für die mögliche Wiederverwendung von NdFeB-Magneten als auch für das werkstoffliche (Recycling von Magnetlegierung) sowie rohstoffliche Recycling (Rückgewinnung von reinem Neodym- und Dysprosiumoxid) von SE aus NdFeB-Magneten aus Antriebsmotoren der Elektromobilität (Hybrid,- Plug-in-Hybrid und vollelektrische Fahrzeuge) erforscht und entwickelt. Einen Überblick zum internationalen Stand der Forschung und Entwicklung zum Recycling von Seltenen Erden findet sich in einem aktuellen ausführlichen Review (Binnemans et al. 2013).

Die Initiierung und Etablierung einer Kreislaufwirtschaft von Permanentmagneten mit Seltenen Erden – hat große umweltpolitische Bedeutung, da Permanentmagnete einer der wichtigsten Anwendungen von Seltenen Erden mit den größten Wachstumsraten darstellen und eine Kreislaufwirtschaft für entsprechendes post-consumer Material noch völlig fehlt.

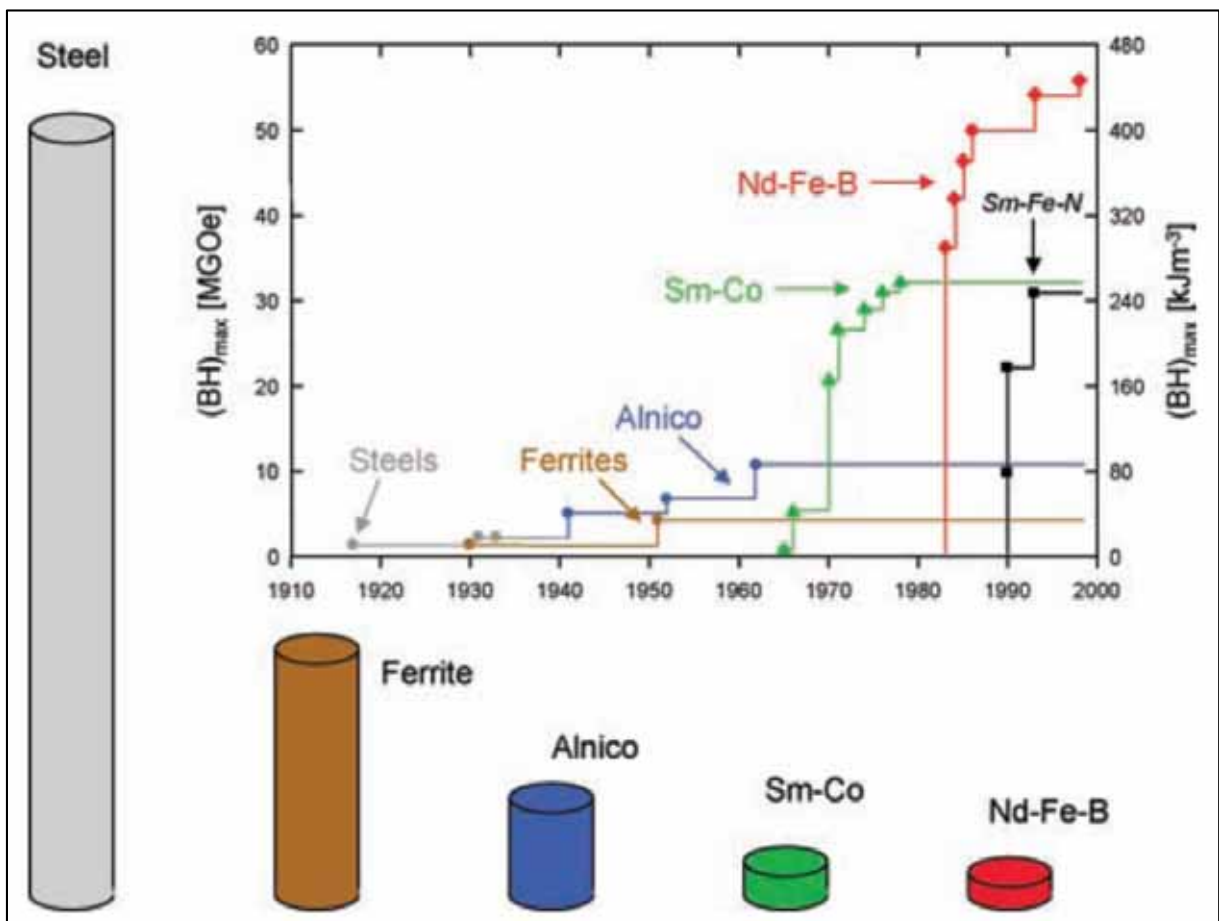
Da gerade für die wichtigen industriellen Anwendungen von NdFeB-Magneten Zahlen zum heutigen und zukünftigen Mengenaufkommen und damit zum möglichen Recyclingpotenzial fehlen, ist dies Schwerpunkt der vorliegenden Studie des Öko-Instituts für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

³ Siehe auch: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/erecon/index_en.htm

2 Seltene Erden und Permanentmagnete

Wie bereits in Kapitel 1 erörtert, stellen Permanentmagnete ein wesentliches Anwendungsfeld von Seltenen Erden, insbesondere von Samarium, Neodym, Praseodym, Terbium und Dysprosium dar. Die technologische und geschichtliche Entwicklung von Seltenen-Erden Magneten (kurz SE-Magnete) wird von Gutfleisch et al. (2011) nachgezeichnet und 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. 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 (siehe Abbildung 3).

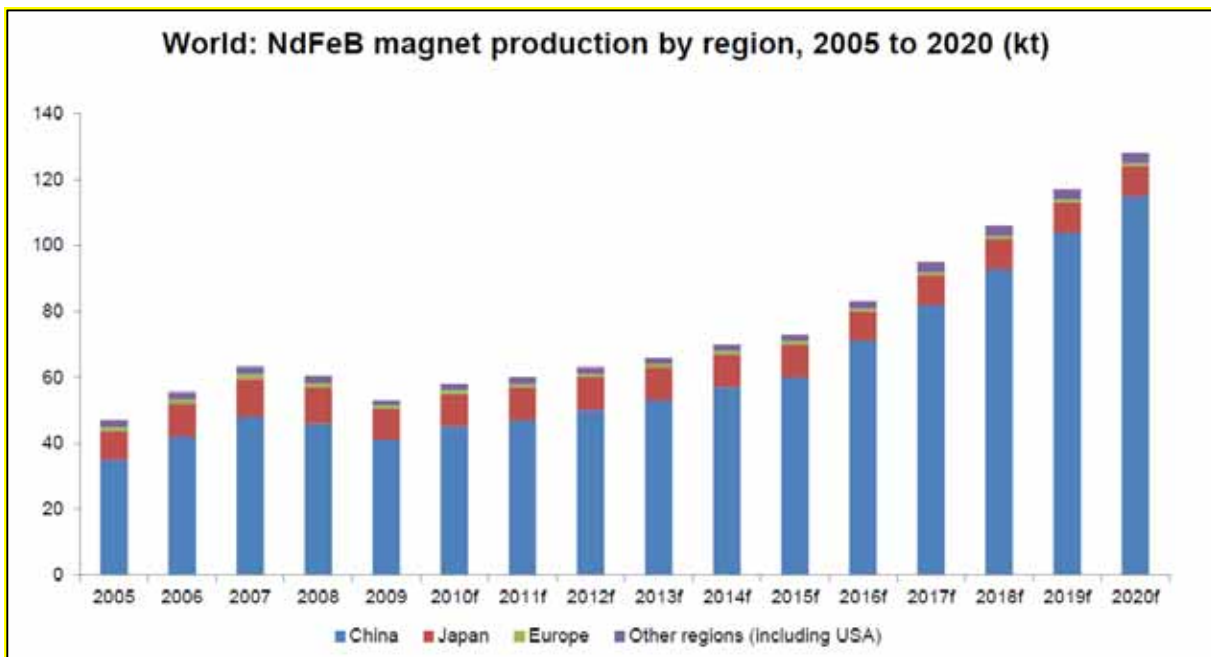
Abbildung 3 Zeitliche Entwicklung der Energiedichte $(BH)_{max}$ von verschiedenen Arten von Permanentmagneten



Erläuterung: Die Darstellung der Stabmagnete illustriert die unterschiedlichen Energiedichten der Magnetmaterialien. So besitzt der kleine dargestellte Nd-Fe-B Magnet (rechts im Bild) die gleiche Energiedichte wie der große Stahlmagnet (links im Bild). Messpunkt ist dabei ein Referenzpunkt 5 mm über der jeweiligen Poloberfläche. Quelle: Gutfleisch et al. 2011

Die Nachfrage nach SE-Magneten ist seit den 1980er Jahren deutlich gestiegen, was vor allem auf die zunehmenden Massenanwendungen in der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik (siehe Abschnitt 2.2.1), im Kfz-Bereich (siehe Abschnitt 2.2.2), Windkraftanlagen (siehe Abschnitt 2.2.3) sowie Industrieanlagen (siehe Abschnitt 2.2.4) zurückzuführen ist. So ist die weltweite Gesamtproduktion von NdFeB Magneten seit der Jahrtausendwende von etwas über 10.000 t auf rund 60.000 t im Jahr 2008 angestiegen (Shaw & Constantinides 2012). Im Zuge der Wirtschaftskrise 2008 und 2009 ist die Produktion etwas zurückgegangen, steigt aber seit 2010 wieder an. Bis 2020 wird eine Verdopplung der Produktion von NdFeB-Magneten erwartet (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4 Weltweite Produktion an NdFeB-Magneten (2005 bis 2020) in kt



Quelle: Shaw & Constantinides 2012

Im Jahr 2010 hatten NdFeB-Magnete einen Anteil von 62 % am gesamten Markt (Wertschöpfungsanteil) für Permanentmagnete (siehe Abbildung 5). Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich diese Marktdaten auf den Wert der gehandelten Magnete beziehen. Da insbesondere Ferrite preislich deutlich günstiger sind als andere Magnettypen, haben diese hinsichtlich Stückzahlen und Volumen heute und auch in Zukunft nach wie vor den größten Anteil inne (siehe Abbildung 6).

Abbildung 5 Marktanteile unterschiedlicher Arten von Permanentmagneten (Quelle: US Magnetic Materials Association 2010, zitiert nach Gutfleisch et al. 2011)

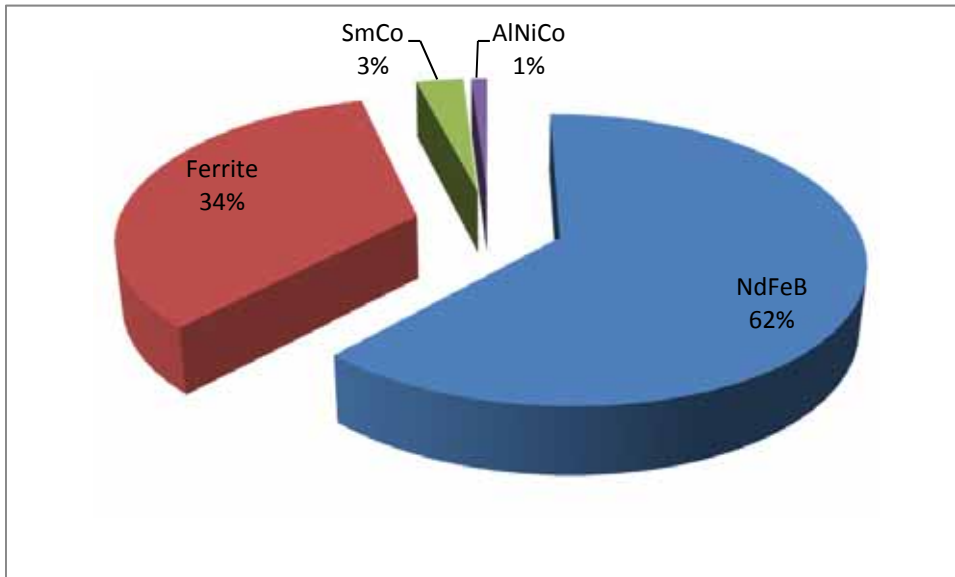
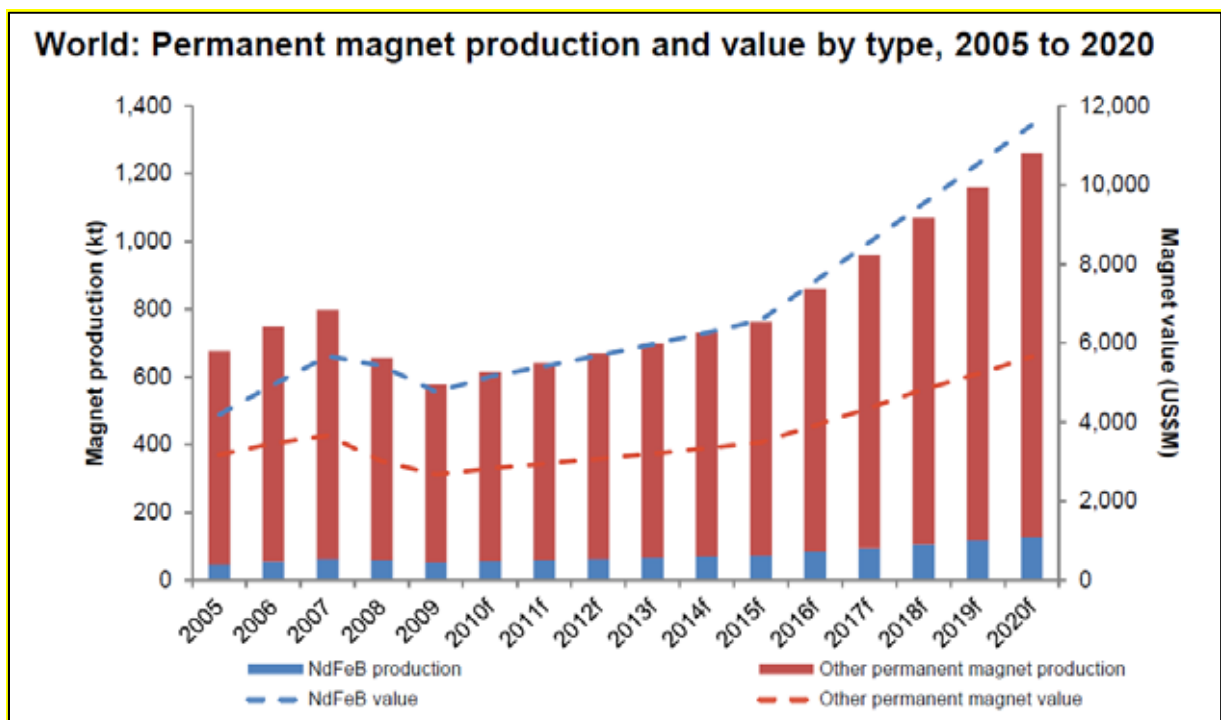


Abbildung 6 Weltweite Produktion an Permanentmagneten (2005 bis 2020) in kt und Mio. USD



Quelle: Shaw & Constantinides 2012

Der Bedarf nach starken Permanentmagneten hat sich zum wesentlichen Nachfragetreiber vor allem nach den Seltenen Erden Neodym, Praseodym und Dysprosium entwickelt, sodass

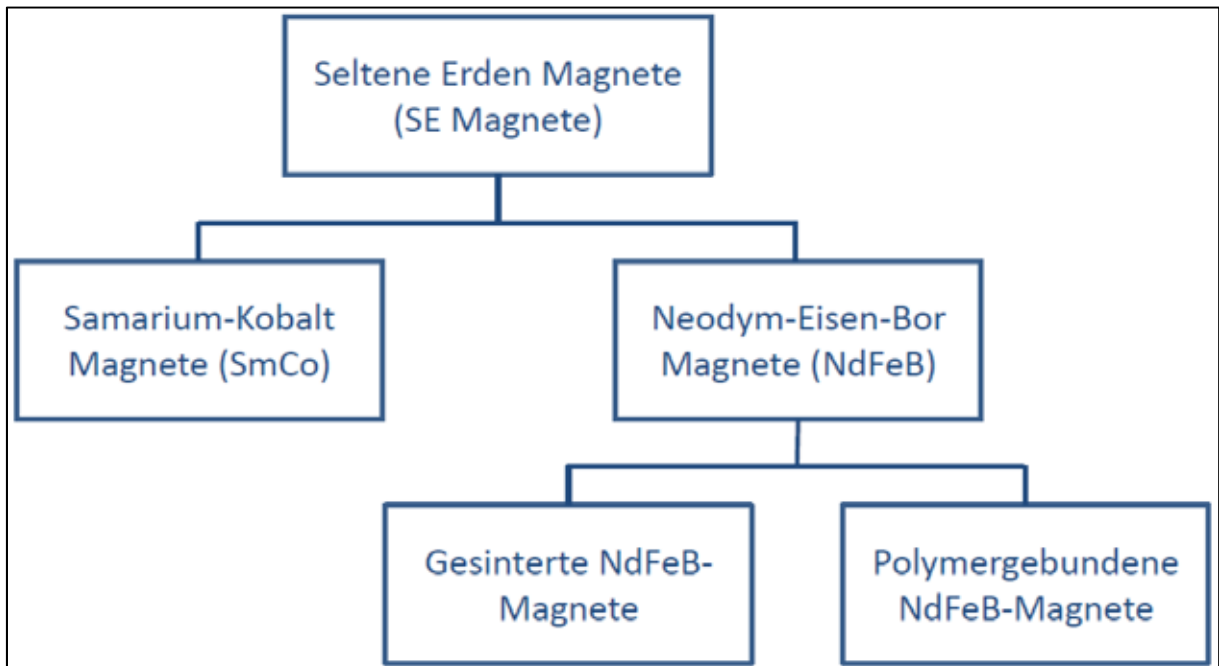
heute ca. 95% der Gesamtförderung von Dysprosium für die Fertigung von Magneten verwendet wird (Hoenderdaal et al. 2013). Diese Elemente – und insbesondere Dysprosium – gelten als kritisch hinsichtlich der Versorgungslage mit Primärrohstoffen und wiesen zwischen Juli 2010 und Juli 2011 Preisanstiege von 950 % (Neodym) und 790 % (Dysprosium) auf. Zwar kam es zwischen Anfang 2012 und Mitte 2013 zu deutlichen Preisrückgängen, erneute Preisanstiege im zweiten Halbjahr 2013 zeigen aber, dass die Niedrigpreisphasen bei Seltenen Erden auch langfristig der Vergangenheit angehören.

Während sich der Preis für Dysprosium-Metall in den Jahren 2008 und 2009 noch bei ca. 150 USD / kg Dysprosium bewegte und bis Ende 2010 auf rund 390 USD / kg Dy anstieg, explodierte der Preis im Jahr 2011 und erreichte im Ende Juli 2011 mit 3100 USD / kg Dy einen Höchststand. Damit zeigt Dysprosium den stärksten Preisanstieg aller Seltenen Erden. Seit Herbst 2011 fiel der Preis wieder und stabilisierte sich im Frühjahr 2013 auf ca. 680 USD / kg Dy. Seit August 2013 war wieder ein Anziehen der Preise zu beobachten, im Dezember 2013 ließ der Preis wieder etwas nach und stand im Dezember 2013 bei 660 USD / kg Dysprosium. Eine ähnliche Entwicklung zeigte die Preiskurve für Neodym-Metall in den letzten Jahren. Pendelte hier der Preis 2008 und 2009 noch zwischen 17 und 25 USD / kg Neodym, stieg er bis Ende 2010 auf 115 USD / kg Ny an und erreichte Ende Juli 2011 mit 500 USD / kg Nd einen Höchststand. Seit dem Spätsommer 2011 fiel der Nd-Preis wieder und stabilisierte sich im Sommer 2013 auf ca. 70 bis 80 USD / kg Nd. Seit September 2013 zieht der Preis für Neodym wieder leicht an und lag im Dezember 2013 bei 101 USD / kg Neodym.

2.1 Klassifizierung von Seltenen Erden Magneten

Hinsichtlich der Einteilung der Seltenen Erden Magnete wird folgende Klassifikation verwendet.

Abbildung 7 Klassifizierung von Seltener Erden Magneten (eigene Darstellung Öko-Institut)



2.1.1 Samarium-Kobalt Magnete

Für Samarium-Kobalt Magnete werden zwei unterschiedliche Legierungen verwendet: SmCo_5 und $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Demnach bewegt sich der Gewichtsanteil der Seltenen Erden (hier Samarium) zwischen 23 % und 34 %. Während die SmCo_5 -Legierung ein Energieprodukt von 180 kJ/m^3 aufweist, werden mit $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 225 kJ/m^3 und eine Einsatztemperatur von bis zu 350°C erreicht (Schroeter 2013). Mit der Beimischung anderer Elemente können die Legierungen noch weiter optimiert werden, sodass auch Energieprodukte von 260 kJ/m^3 erreicht werden können (siehe Abbildung 3).

Im Vergleich zu NdFeB-Magneten sind SmCo-Magnete besser geeignet für hohe Temperaturen ($200\text{-}350^\circ\text{C}$). Zudem sind sie deutlich korrosionsbeständiger.

SmCo-Magnete sind aufgrund ihrer aufwendigen Herstellung sowie den relativ hohen Preisen für die beiden Legierungsbestandteile Samarium und Kobalt relativ teuer und liegen preislich in der Regel über dem Niveau vergleichbarer NdFeB-Magnete. Dieser Zusammenhang hat sich allerdings während der Hochpreisphase für Seltene Erden von Mitte 2011 bis Mitte 2012 zeitweise umgekehrt, sodass SmCo-Magnete teilweise auch in anderen Einsatzbereichen anstelle von NdFeB-Magneten verwendet wurden.

Ein kurzfristiger Umstieg von NdFeB-Magneten auf SmCo-Magnete ist allerdings nicht immer unproblematisch, da die SmCo-Legierungen als sehr spröde und bruchanfällig gelten. Im Gegensatz zu NdFeB-Magneten werden SmCo-Magnete deshalb vor allem in Nischenanwendungen eingesetzt und erreichen nur einen deutlich geringeren Marktanteil (siehe Abbildung 5).

2.1.2 Neodym-Eisen-Bor Magnete

Neodym-Eisen-Bor Magnete basieren auf der $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Legierung was einen rechnerischen Seltenen Erden-Gehalt von etwa 27 % bedingt. Allerdings wird in der Legierung neben Neodym oft auch noch Praseodym, Dysprosium und weitere Elemente wie beispielsweise Kobalt eingesetzt. Daraus resultiert in vielen Anwendungen ein durchschnittlicher Seltenen Erden-Gehalt von 31 % (Buchert et al. 2012). Praseodym wird vor allem zur Teilsubstitution des teureren Neodyms verwendet, was laut Hatch (2011) bis zu einem Mischverhältnis von 3:1 (Nd:Pr) ohne Qualitätseinbußen möglich ist. Die Beimischung von Dysprosium dient zur Steigerung der Koerzitivfeldstärke bei hohen Temperaturen und hat bei vielen Anwendungen eine große Bedeutung. Während NdFeB-Magnete ohne Dysprosium nur bis Temperaturen von ca. 80°C in ihren magnetischen Eigenschaften stabil bleiben, kann die Beimischung von bis zu 10 % Dysprosium (Hoenderdaal et al. 2013) den geeigneten Temperaturbereich auf bis zu 200°C erhöhen.

Entsprechend variiert die Zusammensetzung der Magnete je nach Anwendungsgebiet: Während NdFeB-Magnete für eher niedrige Temperaturbereiche (z. B. in Lautsprechern) typischerweise 31 % Neodym und Praseodym (und kein Dysprosium) enthalten, werden in Magneten für höhere Temperaturbereiche (z. B. Elektromotoren) diese Elemente teilweise durch Dysprosium ersetzt.

NdFeB-Magnete erreichen Energiedichten von bis zu über 400 kJ/m^3 , womit sie die mit Abstand stärksten Permanentmagneten sind (siehe Abbildung 3). Bei NdFeB-Magnete kann in polymergebundenen und gesinterte Magnete unterschieden werden:

Polymergebundene NdFeB-Magnete (auch kunststoffgebundene NdFeB-Magnete genannt) werden aus einem nanoskaligen NdFeB-Pulver hergestellt, das mit Hilfe eines Polymers in die gewünschte Form gepresst wird. Polymergebundene NdFeB-Magnete weisen eine merklich geringere Energiedichte auf als gesinterte NdFeB-Magnete. Die Vorteile liegen in der leichten Verarbeitung (z. B. Spritzguss), der sehr variablen Formgebung und der deutlich verbesserten Korrosionsbeständigkeit⁴. So werden die polymergebundenen NdFeB-Magnete vor allem für filigrane Anwendungen wie z. B. Gleichstrommotoren von optischen Laufwerken und Festplatten verwendet (siehe Abbildung 8). Die Materialzusammensetzungen der Magnetlegierung ist bei polymergebundenen Magneten in der Regel sehr einheitlich mit 29 % Neodym ohne Beimischung von Praseodym oder Dysprosium (Buchert et al. 2012). Diese einheitliche Zusammensetzung ergibt sich aus der Tatsache, dass die meisten Hersteller von polymergebundenen NdFeB-Magneten das

⁴ Während gesinterte NdFeB-Magnete zum Korrosionsschutz beschichtet werden müssen (z. B. mit Nickel oder einer Lackierung), übernimmt bei polymergebundenen Magneten bereits die Kunststoffmatrix diese Schutzfunktion.

gleiche Magnetpulver verwenden, das weltweit nur von sehr wenigen Herstellern produziert wird.

Gesinterte NdFeB-Magnete werden ebenso aus pulverigem Ausgangsmaterial gefertigt. Allerdings werden die Bestandteile nicht mit einem Bindemittel verklebt, sondern bei hohem Druck und hoher Temperatur gesintert. Wie eingangs in diesem Kapitel erläutert, kann die Zusammensetzung der gesinterten NdFeB-Magnete stark variieren. Da gesinterte NdFeB-Magnete sehr korrosionsanfällig sind, werden sie für viele Anwendungen mit einem Korrosionsschutz (z. B. Nickelüberzug) beschichtet. Aufgrund ihrer besonders hohen Energiedichte kommen die gesinterten NdFeB-Magnete in vielen High-tech-Anwendungen zum Einsatz.

2.2 Einsatzbereiche von Seltenen Erden Magneten

2.2.1 Kommunikations- und Unterhaltungselektronik

In der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik werden SE Magnete vor allem in kleinen Motoren (z. B. von optischen Laufwerken, Festplatten und Vibrationsalarmen) sowie in einigen Lautsprechern eingesetzt. Während in den Spindelmotoren üblicherweise polymergebundene NdFeB-Magnete im Rotor des Motors eingesetzt werden (siehe Abbildung 8), werden in Lautsprechern und im sogenannten Schwingspulenbetätiger von Festplatten gesinterte NdFeB-Magnete mit Nickelüberzug verwendet. Insgesamt sind die Magnete zumeist sehr klein und überschreiten bei einem Notebook üblicherweise in keinem Fall das Stückgewicht von 3 g (Buchert et al. 2012).

Die größten Magnete kommen im Schwingspulenbetätiger von 3,5-Zoll-Festplatten vor, wo meist zwei NdFeB-Magnete verbaut sind. Während diese Magnete bei älteren Festplatten ein Gesamtgewicht von 26 g pro Festplatte erreichten (Westphal & Kuchta 2012), liegt dieser Wert bei neueren Geräten in der Regel deutlich unter 20 g.

Abbildung 8 Polymergebundene NdFeB-Magnete von Gleichstrommotoren in optischen Laufwerken (links) und Festplatten (rechts).



Insgesamt wird geschätzt, dass für Anwendungen für optische und akustische Geräte (Informations-, Kommunikations- und Unterhaltungselektronik) ca. 10% der gesamten NdFeB-Magnetproduktion aufgewendet werden (Shin-Etsu, zitiert nach Oakdene Hollins 2010).

2.2.2 Fahrzeugbereich

In Kraftfahrzeugen kommen SE Magnete in zahlreichen Einzelanwendungen zum Einsatz. Hierzu zählen beispielsweise hochwertige Lautsprecher, Servolenkungen sowie Sensoren und Kleinmotoren. Als mengenmäßig relevant können sich in Zukunft vor allem Fahrzeuge mit Hybrid- und Elektroantrieb entwickeln, da diese Antriebstränge meist Motoren mit SE-Magneten (gesinterte NdFeB-Magnete) enthalten. Generell ist der zukünftige Bedarf für diese Anwendungen stark von der Absatzentwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen abhängig. Hier ist festzustellen, dass die unterschiedlichen Prognosen sehr starke Abweichungen aufweisen und somit zukünftige Mengenbedarfe an SE Magneten ebenfalls

nur schwer zu prognostizieren sind (Schüler et al. 2011). Die Magnetgewichte in den Antriebsträngen für Hybrid-, Plug-in-Hybrid und vollelektrische PKW liegen heute je nach Motorengröße zwischen rund 1 kg und 2,4 kg (Buchert et al. 2011). Der Gewichtsanteil der SE in den Magnetlegierungen liegt bei gut 30%, wobei der Dysprosiumgehalt aufgrund der Temperaturanforderungen mit rund 9 % hier vergleichsweise hoch ist.

Je nach Entwicklung der nationalen und vor allem globalen Marktdurchdringung der unterschiedlichen Antriebsstränge für Elektromobilität im PKW-Bereich kann von einem erheblichen Nachfragewachstum für NdFeB-Magnete und damit Neodym, Praseodym und Dysprosium ausgegangen werden. Aufgrund der kritischen Versorgung und des hohen Preislevels gehen die Entwicklungen hin zu NdFeB-Magneten mit geringerem Dysprosiumanteil (7 % oder gar weniger), um den Nachfrageanstieg entsprechend zu dämpfen (Buchert et al. 2011).

Neben Kraftfahrzeugen entwickeln sich ebenso die Elektroräder zu einer mengenmäßig bedeutenden Anwendung von NdFeB-Magneten. Für die Magnetgewichte pro Rad werden 300 g sowie ein Nd-Anteil von 30 % und ein Dy-Anteil von 4 % angegeben (Hoenderdaal et al. 2013).

Sowohl die elektrischen Antriebsmotoren für PKW als auch für Fahrräder sind aufgrund der hohen Magnetgewichte und der bereits erreichten (Fahrräder) oder in Zukunft erwarteten hohen Stückzahlen (PKW) große Nachfragetreiber für NdFeB-Magnete und damit Seltene Erden.

2.2.3 Windkraftanlagen

Seit wenigen Jahren werden getriebelose Windkraftanlagen eingesetzt, die mit Synchrongeneratoren, welche mit Permanentmagneten ausgestattet sind, arbeiten. Im Jahr 2010 entfielen auf diesen Antriebstyp rund 9 % der global neu installierten Leistung an Windkraftanlagen (Buchert 2011). Dieser Antriebstyp eignet sich im Gegensatz zu den „klassischen“ Antrieben für Windkraftanlagen, die mit Getrieben arbeiten, vor allem für große Leistungsbereiche (z. B. 6 MW-Anlagen). Gerade für den Einsatz in Offshore-Windkraftanlagen verspricht der getriebelose Antrieb (Synchrongeneratoren mit Permanentmagneten) eine Reihe von Vorteilen (Gewichtseinsparung, weniger Wartungsaufwand etc.). Der Bedarf an NdFeB-Magneten für diese Technologie ist hoch, es wird von rund 500 bis 600kg je MW Leistung ausgegangen, d.h. große Windkraftanlagen (6 MW) dieses Typs sind mit drei bis vier Tonnen NdFeB-Magnete ausgestattet (Buchert 2011). Auch für dieses Anwendungsgebiet wird zur Unterstützung der Temperaturstabilität Dysprosium in die Magnetlegierung eingearbeitet. Szenarien gegen global von einem stark wachsenden Bedarf an Seltenen Erden (vor allem Neodym, Praseodym, Dysprosium, wenig Terbium) für Windkraftanlagen aus. So könnte der Bedarf an SE von gut 600 t im Jahr 2010 für diesen Einsatzbereich bis zum Jahr 2020 je nach Szenario auf 8.000 t bis gut 20.000 t steigen (Buchert 2011). Treiber sind u.a.

umfassende Pläne der chinesischen Regierung zum Ausbau der Windenergie und diverse Projekte zu Offshore-Windkraftanlagen in der Nordsee.

2.2.4 Industrieanlagen

NdFeB-Magnete werden in Industrieanlagen in erster Linie für Elektromotoren und -generatoren, aber auch für Sortieranlagen und für Hebewerkzeuge eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in Abschnitt 3, da dieser Einsatzbereich Schwerpunkt dieser Studie ist.

2.2.5 Sonstige Anwendungen

Neben den bislang in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 beschriebenen Anwendungen kommen NdFeB-Magnete in weiteren zahlreichen Anwendungen zunehmend zum Einsatz. Zu nennen sind die unter anderem Magnetresonanztomographie (MRT) in der Medizin, moderne Aufzugsanlagen, energieeffiziente Waschmaschinen, Klimaanlage und Heizungspumpen. Aber auch für diverse militärische Anwendungen spielen NdFeB-Magnete eine sehr wichtige Rolle (Grieb 2013).

3 Seltene Erden Magneten im industriellen Einsatz

3.1 Seltene Erden Magnete in Elektromotoren

Nach zahlreichen Experteneinschätzungen stellen Elektromotoren mengenmäßig mit Abstand den wichtigsten Anwendungsbereich von SE-Magneten in Industrieanlagen dar. Aus Rohstoff- und Recyclingsicht ist dabei von zusätzlicher Bedeutung, dass NdFeB-Magnete in Elektromotoren zum Zweck der Temperaturstabilität zumeist einen relativ hohen Anteil am besonders begehrten Dysprosium haben⁵. Exakte Mengenabschätzungen gestalten sich allerdings schwierig, weil weder die Marktanteile der Motoren mit SE-Magneten erfasst werden, noch deren Verbleib bzw. Magnetmenge genau bekannt ist. Die folgenden Abschnitte dienen entsprechend als Grundlage zur Abschätzung der eingesetzten Gesamtmenge in Baden-Württemberg und ergeben zusammen mit Kapitel 2 ein näherungsweise Bild der Trends und der Recyclingpotenziale wieder.

3.1.1 Klassifikation von Elektromotoren

Elektromotoren können nach der verwendeten Stromart sowie nach der Wirkungsweise unterschieden werden. Für die vorliegende Arbeit erweist sich dabei eine Einteilung anhand dieser beiden Kriterien als sinnvoll und wird wie in Tabelle 1 nach Fischer (2011) vorgenommen.

⁵ Literaturwerte (Hoenderdaal et al. 2013) sowie Herstellerangaben lassen auf einen durchschnittlichen Dysprosium-Gehalt im Bereich von 3,5 bis 10 % an der Magnetmasse schließen.

Dabei wird ersichtlich, dass permanenterregte Motoren (mit Dauermagneten) in einigen Gleichstrommotoren sowie in einigen Synchronmaschinen zum Einsatz kommen. Während sich bei permanenterregten Gleichstrommotoren die Magnete im Stator befinden und die Läuferwicklungen mittels Bürsten und Kommutator mit Strom versorgt werden, so sind die Magnete bei permanenterregten Synchronmaschinen im Läufer eingebaut (bürstenloser Motor)⁶.

Insbesondere synchrone Servomotoren (permanenterregte Synchronmotoren, engl. permanent-magnet synchronous motor - PSM) finden seit einigen Jahren verstärkt Anwendung im industriellen Bereich und werden vermehrt auch für höhere Leistungsbereiche von bis zu 100 kW eingesetzt (Fischer 2011), wobei sie dabei vor allem in Konkurrenz zu Drehstrom-Asynchronmaschinen (auch als *fremderregte Asynchronmaschinen* bezeichnet) treten. Daher kommt den permanenterregten Synchronmotoren hinsichtlich des industriellen Einsatzes von NdFeB-Magneten – und damit Seltenen Erden – die entscheidende Rolle zu.

Der Motortyp fremderregte Asynchronmaschinen hatte 2008 einen Marktanteil von 83,2 % in Deutschland (gegenüber 4,8 % Synchronmotoren) (Deutsches Kupferinstitut 2011) und war für über 90 % des Stromverbrauchs von Motoren im Leistungsbereich von 0,75 W bis 200 kW verantwortlich (Almeida et al. 2008). Aus diesem Prozentverhältnis lässt sich umgekehrt bereits das mögliche zukünftige Potential der permanenterregten Synchronmotoren erkennen.

⁶ Dieser Motorentyp wird oft auch als *bürstenloser Gleichstrommotor* bezeichnet. Die Einteilung unter „Gleichstrommotoren“ ist dabei eher historischer Natur und fußt in der Tatsache, dass permanenterregten Synchronmaschinen ein Frequenzumrichter vorgeschaltet ist, der den Drehstrom zuerst in Gleichstrom umwandelt und dann wiederum den vom Motor benötigten Dreh- / Wechselstrom erzeugt (Almeida et al. 2008).

Tabelle 1 Motorenklassifizierung nach Stromart und Wirkungsweise (Quelle: Fischer 2011)

Stromart	Stromwendermaschinen	Asynchronmaschinen	Synchronmaschinen	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps
Gleichstrom	Dauermagnetmotor			Feinwerktechnik, Kfz-Elektrik, Servoantriebe	< 1 W bis 10 kW
	Fremderregter Motor			Hauptantrieb für Werkzeugmaschinen, Hebewerkzeuge, Prüffelder, Walzwerke	10 kW bis 10 MW
	Reihenschlussmotor			Anlasser im Kfz, Fahrmotor in Bahnen	300 W bis 500 kW
Wechselstrom	Universalmotor			E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W bis 2000 W
	Reihenschlussmotor			Fahrmotor in 16 2/3 - Hz- und 50-Hz-Vollbahnen	100 kW bis 1000 kW
		Spaltpmotor		Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W bis 150 W
		Kondensator-motor		Haushaltsgeräte, Pumpen, Gebläse, Werkzeuge	50 W bis 2000 W
			Hysterese-motor	Uhrwerke, Feinwerktechnik, Hilfsantriebe	< 1 W bis 20 W
			Reluktanz-motor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W bis 10 kW
Drehstrom	Neben-Schlussmotor (durch Umrichterantriebe abgelöst)*			Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW
		Käfigläufer-motor**		Industrie-standardantrieb, z. B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik, Umformer, Fahrmotoren in Bahnen	100 W bis 50 MW
		Schleifen-ringläufer-motor*		Hebezeuge, Pumpen und Verdichter	10 kW bis 10 MW
		Linearmotor	Linearmotor	Fördertechnik, Schnellbahnen	100 W bis 10 MW
			Dauermagnetmotor***	Servoantriebe, Gruppenantrieb	100 W bis 100 kW
			Schenkel-polmaschine	Notstromgenerator, langsam laufender Industrieantrieb, Wasserkraftgenerator	10 kW bis 1000 MW
			Vollpolmaschine	Verdichter, Mühlenantrieb, Turbogenerator im Kraftwerk	100 kW bis 1500 MW
Impulsstrom			Elektronik-motor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	< 1 W bis 200 W
			Schrittmotor	Quarzuhren, Positionierantrieb	W bis 500 W

* Nur noch von historischer Bedeutung

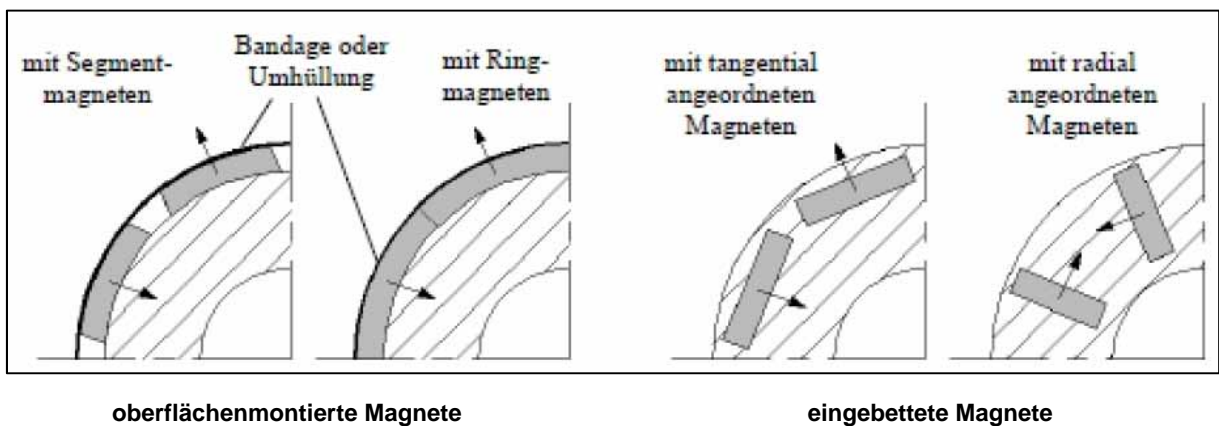
** Die Käfigläufermotoren werden zumeist auch als fremderregte Asynchronmaschinen bezeichnet. Diese dominieren zahlenmäßig den Einsatzbereich der industriellen Anlagen.

*** Die Dauermagnetmotoren werden auch als permanenterregte Synchronmaschinen oder synchrone Servomotoren bezeichnet. Im Anwendungsbereich der industriellen Anlagen treten sie zunehmend in Konkurrenz zu fremderregten Asynchronmaschinen.

3.1.2 Aufbau permanenterregte Synchronmaschinen

Bei permanenterregten Synchronmaschinen ist der Läufer mit Dauermagneten besetzt, während in den Kupferwicklungen des Stators ein magnetisches Wechselfeld erzeugt wird. Die Dauermagnete können in unterschiedlicher Weise im Rotor verbaut sein: Während bei oberflächenmontierten Magneten die Dauermagnete auf den Stator aufgeklebt und zusätzlich durch eine Bandage gehalten werden, werden bei anderen Modellen die Magnete in Aussparungen des Stahlkörpers eingesteckt. Bei älteren Modellen ist zumeist eine oberflächenmontierte Ausführung anzutreffen, bei neueren Modellen sind dagegen eingesteckte Magnete (auch als *vergrabene Magnete* bezeichnet) mit tangentialer Anordnung weit verbreitet.

Abbildung 9 Verschiedene mögliche Anordnung von Dauermagneten am Läufer von permanenterregten Synchronmotoren.



Quelle: Cravero 2005, zitiert nach Rieger 2009

3.1.3 Marktentwicklung

Im industriellen Bereich (Maschinen) kamen bis vor einigen Jahren hauptsächlich Drehstrom-Asynchronmaschinen zum Einsatz. Dieser Motorentyp hatte 2008 einen Marktanteil von 83,2 % in Deutschland (gegenüber 4,8 % Synchronmotoren) (Deutsches

Kupferinstitut 2011) und war für über 90% des Stromverbrauchs von Motoren im Leistungsbereich von 0,75 W bis 200 kW verantwortlich (Almeida et al. 2008).

Permanenterregte Synchronmaschinen mit SE-Magneten wurden erstmals Ende der 1970er Jahre entwickelt. Erste serienmäßig produzierte Modelle kamen in den 1980er Jahren auf den Markt, erreichten zuerst aber nur kleine Marktanteile. Erst seit ca. 5-10 Jahren haben sich permanenterregte Synchronmotoren mit SE-Magneten zu einem bedeutenden Markt entwickelt, wobei sie vor allem in Konkurrenz zu Drehstrom-Asynchronmaschinen treten. Der Einsatzbereich lag lange Zeit im Leistungsbereich von 100 W bis ca. 10 kW, wobei in den letzten Jahren zunehmend eine Ausweitung in obere Leistungsklassen von 75 kW oder gar 100 kW zu beobachten ist (Fischer 2011). Der Hauptgrund für den vermehrten Einsatz von permanenterregten Synchronmotoren anstatt fremderregter Asynchronmotoren ist die hohe Energieeffizienz bei gleichzeitig kompakter Bauform und niedrigem Gewicht. Diese Eigenschaften machen permanenterregte Synchronmotoren nicht nur für den mobilen Einsatz attraktiv, sondern auch für Maschinen mit kleinen Bauformen, hoher Effizienz sowie einer niedrigen Toleranz für Abwärme.

Zudem sind permanenterregte Synchronmotoren auch für solche Fälle interessant, in denen alte Asynchronmaschinen gegen neue Antriebe ausgetauscht werden müssen. Hier kommt zum Tragen, dass die europäische Motorenverordnung für neue Motoren seit 16. Juni 2011 eine Mindesteffizienz nach IE2 vorsieht (siehe Abschnitt 3.1.4). Zwar können diese Vorgaben von fremderregten Asynchronmaschinen erreicht werden, dies erfordert aber größere Bauformen und höhere Stückgewichte, was nicht immer mit den geometrischen und statischen Anforderungen älterer Maschinen in Einklang zu bringen ist.

Mit Inkrafttreten der zweiten und dritten Anforderungsstufe der europäischen Motorenverordnung am 01.01.2015 und 01.01.2017 wird allgemein von einer weiteren Marktverschiebung hin zu permanenterregten Synchronmotoren ausgegangen (siehe Abschnitt 3.1.4).

3.1.4 Effizienzstandards und rechtliche Anforderungen

Im Jahr 1992 wurden das erste Mal Mindeststandards für Elektromotoren vom US Kongress festgelegt. In Europa folgte 1998 ein freiwilliges Maßnahmenpaket zur Erreichung von Energieeinsparpotenzialen der CEMEP⁷ und der Europäischen Kommission ohne eine gesetzliche Regelung beschlossen. Ein Kennzeichnungskonzept („EFF3“ bis „EFF1“) wurde erarbeitet mit einer freiwilligen Selbstverpflichtung zur Reduzierung des Verkaufs von Motoren mit einem damals üblichen Wirkungsgrad. Die Kennzeichnung „EFF3“ stand für Motoren mit niedrigem Wirkungsgrad, „EFF2“ für Motoren mit verbessertem Wirkungsgrad und „EFF1“ für Motoren mit erhöhtem Wirkungsgrad. Die Kennzeichnung bezog sich ausschließlich auf den Geltungsbereich der 2- und 4-poligen Niederspannungs-

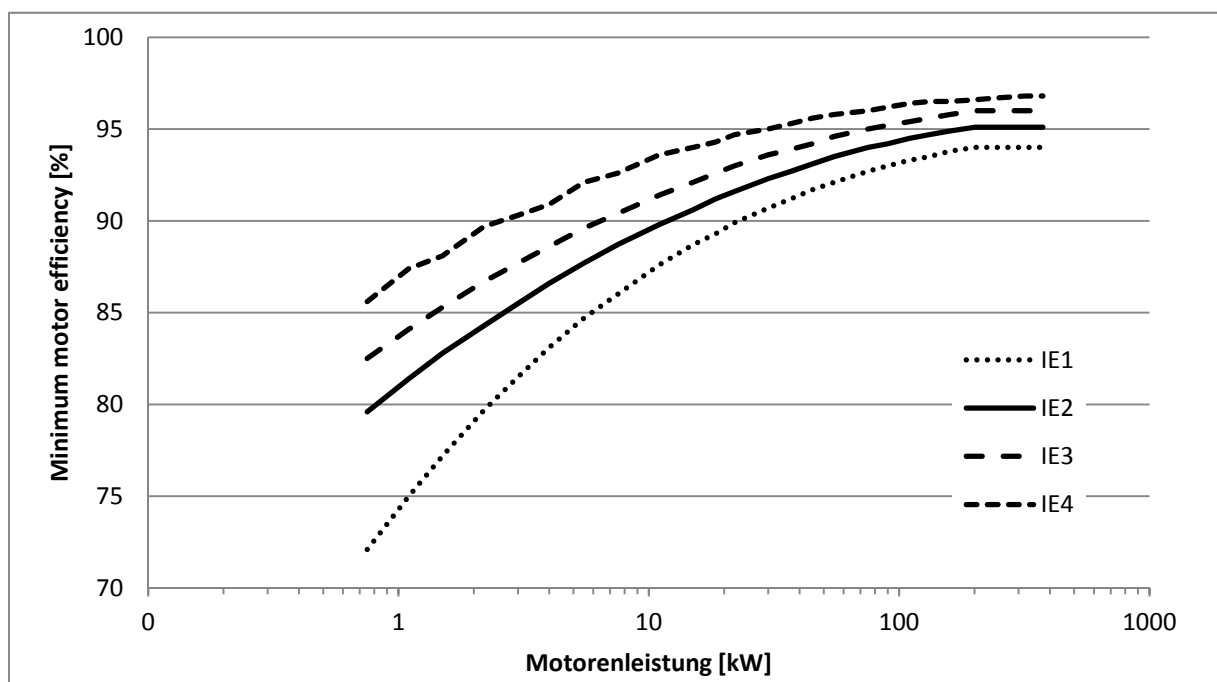
⁷ Vertretung des Verbandes der nationalen Hersteller von Elektromotoren in Europa

Drehstrommotoren von 1,1 kW bis 90 kW in Standardausführung, was letztendlich viele übliche Einsatzbereiche im industriellen Bereich abdeckte.

Die Kennzeichnung der Elektromotoren nach ihrem Wirkungsgrad von 1998 nach den Klassifizierungen „EFF3“ bis „EFF1“ wurde im Jahr 2009 ersetzt durch die weltweit gültige IEC⁸-Normierung (IEC 60034-30:2009), die heute noch Gültigkeit besitzt. Der Geltungsbereich wurde erweitert auf 2-, 4- und 6-polige Industrie-Normmotoren der Leistungsklassen 0,75 kW bis 375 kW für 50 Hz und 60 Hz, so dass diese Grenzwerte auch bei den nordamerikanischen Motoren anwendbar sind (Deutsches Kupferinstitut 2011). Derzeit sind folgende Effizienzklassen eingeteilt

- IE1 = Standard Wirkungsgrad (vergleichbar EFF 2)⁹
- IE2 = Hoher Wirkungsgrad (vergleichbar EFF1)
- IE3 = Premium Wirkungsgrad

Abbildung 10 Mindesteffizienzen von 4-poligen 50Hz Elektromotoren der Klassen IE1, IE2 und IE3 nach IEC 60034-30 sowie der vorgeschlagenen IE4-Klasse nach IEC 60034-31.



Aufbauend auf diese nun etablierten Effizienzklassen liegt im Annex A der Norm IEC 60034-31 ein Vorschlag für eine weitere Effizienzkategorie – der Super-Premium-Klasse IE4 – vor. Dieser Vorschlag sieht eine weitere Reduktion der Verluste um 15-20 % gegenüber IE3 vor (siehe Abbildung 10).

⁸ International Electrotechnical Commission

⁹ Vertrieb in der EU aufgrund der EU-Verordnung Nr. 640/2009 seit Juni 2011 nur noch eingeschränkt gestattet

Der Vergleich der beschriebenen Klassifizierungen wird in Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2 Vergleich der IE- und EFF-Klassifizierung von Elektromotoren.

Neue IE-Klassifizierung nach IEC 60034-30 & IEC 60034-31		Alte IE-Klassifizierung nach CEMEP	
Bezeichnung / Wirkungsgrad	IE-Code	Bezeichnung / Wirkungsgrad	Code
Super Premium	IE 4	-	-
Premium	IE 3	-	-
Hoch	IE 2	Hoch	EFF 1
Standard	IE 1	Verbessert	EFF 2
<Standard	Keine Klassifizierung	Normal	EFF 3

Laut verschiedener Experteneinschätzungen ist die derzeit diskutierte IE4-Effizienzklasse mit den heutigen fremderregten Asynchronmotoren nur in oberen Leistungsbereichen zu erreichen. Bei kleineren und mittleren Motoren wird IE4 derzeit nur von permanenterregten Synchronmaschinen mit SE-Magneten erreicht (Almeida et al. 2012).

Im Jahr 2005 verabschiedete das Europäische Parlament und der Europäische Rat die *Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte* (gängige Kurzbezeichnung: EuP- oder Ökodesign-Richtlinie), die im Jahr 2009 von der vergleichbaren Richtlinie 2009/125/EG ersetzt wurde (ErP-Richtlinie)¹⁰.

In der Folge des daraufhin gestarteten Ökodesign-Prozesses wurde im Jahr 2009 die sogenannte *Motorenverordnung*¹¹, die erstmals verpflichtende energetische Mindeststandards für neue Elektromotoren mit einer Nennleistung zwischen 0,75 kW und 375 kW in der EU festgelegt. Die Verordnung sieht folgende energetische Mindeststandards vor:

- Ab 16. Juni 2011: Motoren müssen die Wirkungsgradklasse IE2 erfüllen.
- Ab 1. Januar 2015: Motoren mit einer Nennleistung von 7,5 – 375 kW müssen entweder die Wirkungsgradklasse IE3 oder wenn sie mit einem drehzahlgeregelten Antrieb ausgestattet sind, IE2 erfüllen.

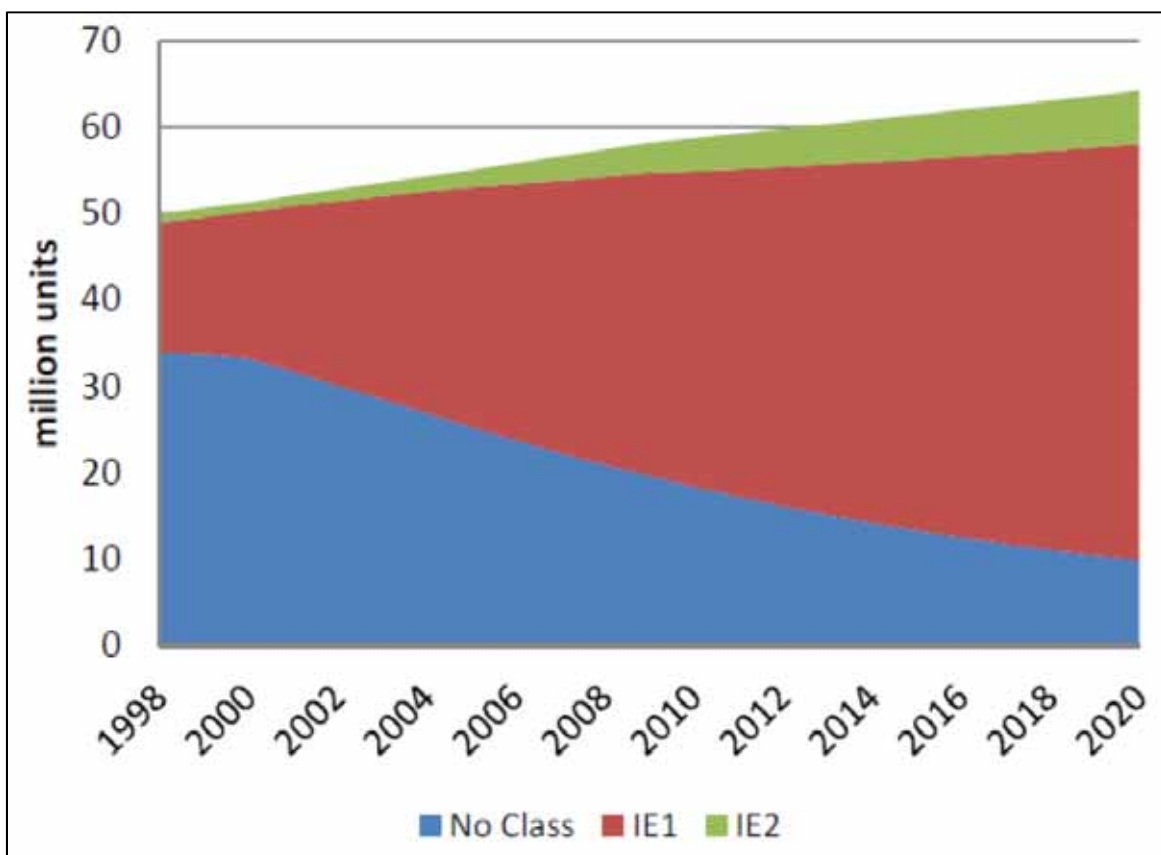
¹⁰ In Deutschland wird diese Richtlinie durch das Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchender Produkte (EVPG) umgesetzt.

¹¹ Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren.

- Ab 1. Januar 2017: Motoren mit einer Nennleistung von 0,75 – 375 kW müssen entweder die Wirkungsgradklasse IE3 oder, wenn sie mit einem drehzahlregelmotoren Antriebs ausgestattet sind, IE2 erfüllen.

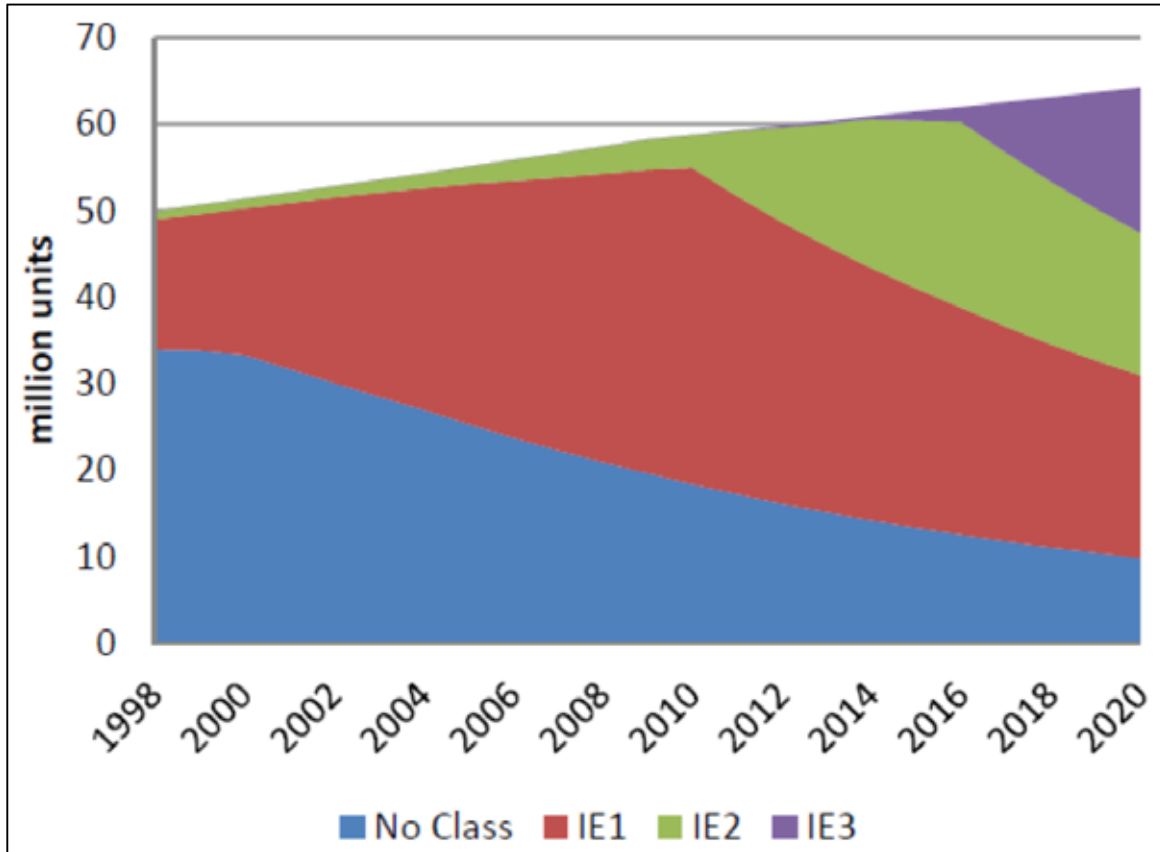
Letztendlich wird davon ausgegangen, dass die Verordnung Nr. 640/2009 zu einer massiven Marktveränderung hin zu effizienteren Motoren im industriellen Einsatz führt und insbesondere eine rasche Marktdurchdringungen der Klassen IE2 ab 2011 und IE3 ab 2015 fördert (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).

Abbildung 11 Anteile der verschiedenen Motor-Effizienzklassen in der industriellen Nutzung in der EU (Prognose **ohne** Motorenverordnung 640/2009).



Quelle: Almeida et al. 2012

Abbildung 12 Anteile der verschiedenen Motor-Effizienzklassen in der industriellen Nutzung in der EU (Prognose mit Motorenverordnung 640/2009).



Quelle: Almeida et al. 2012

Da in der Verordnung, die die Richtlinie umsetzt, nicht alle Motoren inbegriffen sind, wird derzeit von der EU eine Vorstudie zur Verabschiedung von zusätzlichen Ökodesign-Regelungen bezüglich Elektromotoren erstellt (EuP Vorstudie DG Energy Los 30 Motoren und Antriebe)¹². Diese Vorstudie adressiert folgende Motorentypen:

- Motoren im Leistungsbereichen unter 0,75 kW
- Motoren im Leistungsbereich oberhalb von 375 kW
- Motoren, die nicht durch die Verordnung 640/2009 abgedeckt sind. Dies betrifft insbesondere permanenterrregte Motoren, Reluktanzmotoren, Bremsmotoren sowie weitere Motoren, die sich aus den Ausnahmen von Artikel 1 Punkt 2 von Verordnung 640/2009 ergeben.

¹² Almeida et al. 2012

Der Endbericht – auf dessen Basis weitere Ökodesign-Anforderungen an Motoren erarbeitet und diskutiert werden – soll in 2015 verabschiedet werden¹³.

Darüber hinaus existieren im Ökodesign-Prozess noch verschiedene weitere Regulierungsansätze die Motoren direkt oder indirekt betreffen. Diese sind:

- Verordnung Nr. 641/2009 zu Nassläufer-Umwälzpumpen;
- Verordnung Nr. 327/2011 zu Ventilatoren mit Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW;
- Verordnung Nr. 547/2012 zu Wasserpumpen
- Laufende Vorstudie zu Werkzeugmaschinen (DG Enterprise Los 5)
- Laufende Vorstudie zu Abwasserpumpen (DG Energy Los 28)
- Laufende Vorstudie zu Reinwasserpumpen (DG Energy Los 29)
- Laufende Vorstudie zu Produkten in Antriebssystemen insbesondere Kompressoren (DG Energy Los 31)

3.1.5 Lebensdauern und Entsorgungswege

Die Lebensdauern von Elektromotoren hängen von mehreren Faktoren wie die Anzahl der Betriebsstunden, der üblichen Betriebslast sowie eventuellen Überlastungen, der Häufigkeit von Start/Stop-Vorgängen, der Qualität der Stromversorgung sowie Temperatur, Feuchtigkeit, Vibrationen, Kontakt mit Staub und Chemikalien ab (Almeida et al. 2008).

Die häufigste Ursache von Motorenversagen ist der Verschleiß der Lager, gefolgt von Beschädigungen am Stator (Almeida et al. 2012).

Während kleinere und kostengünstige Motoren bei Beschädigung meist ausgetauscht werden, liegt die Priorität bei Motoren industrieller Anlagen zumeist bei Reparaturlösungen. Dies liegt einerseits an der Tatsache, dass der jeweilige Motor in der Regel optimal auf seinen Einsatz in einer Maschine abgestimmt ist und zudem die Reparatur über herstellereigene Werkstätten oder lokale Betriebe meist schneller und kostengünstiger realisiert werden kann als Beschaffung und Einbau eines neuen Antriebs. Entsprechend gehen Almeida et al. (2012) davon aus, dass Motoren industrieller Anwendungen im Laufe ihrer Nutzungsdauer im Durchschnitt zweimal repariert werden. In Interviews mit verschiedenen Motorenherstellern und Reparaturbetrieben wurde ermittelt, dass bei permanenterregten Synchronmaschinen Schäden nur in sehr seltenen Fällen die Magnete des Rotors betreffen. Entsprechend wird bei Reparaturvorgängen oftmals der magnetbesetzte Rotor als Ganzes wiederverwendet.

¹³ Dabei gilt eine Ausweitung von verpflichtenden Mindeststandards als sehr wahrscheinlich, da eine Auswahl zur vertieften Evaluierung einer Produktgruppe im Rahmen des EuP/ErP-Prozesses bereits eine prinzipielle Entscheidung für eine Durchführungsmaßnahme darstellt. Dieser Entscheidung kann entweder durch den Erlass verbindlicher Vorschriften (z. B. EU-Verordnung) oder einer freiwilligen Vereinbarung der Industrie nachgekommen werden.

Insgesamt gehen die Autoren von folgenden durchschnittlichen Lebensdauern aus, die sowohl auf fremderregte Asynchronmaschinen, als auch permanenterregte Synchronmaschinen bezogen sind:

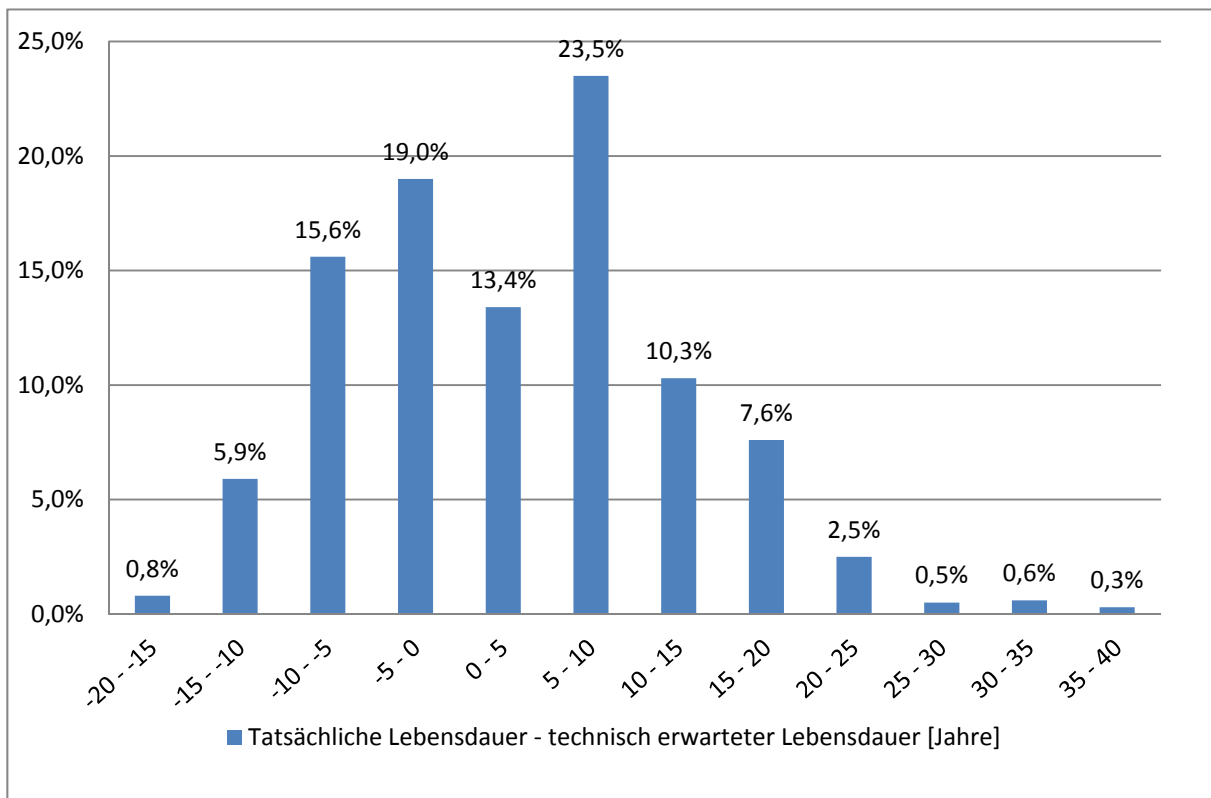
Tabelle 3 Durchschnittliche Lebensdauern von Elektromotoren im industriellen Einsatz

Leistungsbereich	Durchschnittliche Lebensdauer
1,0 – 7,5 kW	12 Jahre
7,5 – 75 kW	15 Jahre
75 – 250 kW	20 Jahre

Quelle: Almeida et al. 2012

Almeida et al. (2012) verweisen jedoch auf eine beträchtliche Streuung bei den tatsächlichen Lebensdauern von Elektromotoren. So wurde in der Vergangenheit beobachtet, dass 5,9 % der Motoren bereits 10-15 Jahre vor dem erwarteten Ende der Lebensdauer außer Betrieb genommen wurden (siehe Abbildung 13).

Abbildung 13 Beobachtete Abweichungen der realen Lebensdauern von der technisch erwarteten Lebensdauer von Elektromotoren.



Quelle: Almeida et al. 2012

Die Entsorgung gebrauchter und defekter Elektromotoren in industriellen Anlagen geschieht in der Regel über folgende Wege:

- Beschädigte Motoren werden von Reparaturbetrieben übernommen und funktionsfähig an den Eigentümerbetrieb zurückgegeben. Eventuell ausgewechselte Komponenten (defekte Lager, durchgebrannte Kupferwicklungen etc.) oder gar vollständige (nicht mehr reparierbare) Motoren werden vom Reparaturbetrieb einbehalten und an Entsorgungsfachbetriebe verkauft.
- Die Motoren werden zusammen mit ein oder mehreren Maschinen durch einen Recyclingbetrieb entsorgt. Je nach Art und Aufbau der Maschine werden nach Abtransport und Detoxifizierung (z. B. Entnahme von Altölen, Ausbau elektronischer Bauteile) die metallhaltigen Teile mechanisch zerkleinert und sortiert. Die erzeugten Fraktionen (in der Regel Stahl, Kupfer und Aluminium sowie gegebenenfalls spezifische Fraktionen wie Edelstahl und Wolframschrotte) werden an Schmelzbetriebe weitergegeben.
- Die Motoren werden zusammen mit ein oder mehreren Maschinen zum Zwecke einer Zweitnutzung verkauft. Laut Aussagen verschiedener Motorenhersteller befinden sich die Hauptabsatzmärkte für gebrauchte Maschinen außerhalb der Europäischen Union. Entsorgung und Recycling von zweitgenutzten Maschinen und Antrieben findet demnach überwiegend in nichteuropäischen Ländern statt.

Letztendlich werden dabei alle diese Entsorgungsarten im B2B-Bereich abgewickelt, wodurch überwiegend von einer sachgerechten Entsorgung und Verwertung ausgegangen werden kann (Schischke et al. 2012). Ausnahmen sind insbesondere bei der finalen Entsorgung von exportierten Gebrauchsmaschinen sehr wahrscheinlich.

Eine gesonderte Behandlung von permanenterregten Motoren mit SE-Magneten ist bis dato nicht etabliert. Dies liegt primär an der Tatsache, dass das Aufkommen in den Entsorgungsbetrieben derzeit noch sehr gering ist, da diese Motoren erst seit ca. 5-10 Jahren in nennenswertem Umfang eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.2). Hinzu kommt, dass es derzeit noch keinen funktionierenden Markt für post-consumer Magnetschrotte gibt. Zwar hat der Preisanstieg bei Seltenen Erden bis Mitte 2011 den Ausschlag für verstärkte Forschung und Entwicklung in diese Richtung gegeben, diese haben aber bisher noch nicht zu einer nennenswerten Nachfrage nach entsprechenden Schrotten geführt.

Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass Motoren mit SE-Magnete in Recyclingbetrieben derzeit analog zu anderen Elektromotoren behandelt werden, also mechanisch zerkleinert und in die Hauptfraktionen (Fe-Schrott, Cu-Schrott, Al-Schrott) sortiert werden. In diesen Verfahren bleiben SE-Magnete aufgrund ihrer Eigenschaften entweder an den Recyclingmaschinen haften und bilden dadurch einen Störfaktor im Ablauf, oder sie haften anderen Fe-Schrotten an und werden entsprechend in Stahlwerken

verarbeitet. Diese zweite Version stellt in jedem Fall einen dissipativen Totalverlust der enthaltenen Seltenen Erden dar.

Eine gezielte Demontage von Permanentmagneten aus Motoren aus dem Kfz-Bereich wird derzeit im Rahmen des MORE-Projektes¹⁴ am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) in Nürnberg erprobt und hinsichtlich der Tauglichkeit für den großskaligen Einsatz untersucht. Dabei werden sowohl Verfahren erprobt, bei denen die Magnete in magnetisierter Form gewonnen werden, als auch solche bei denen die Magnete zuvor durch Erhitzen entmagnetisiert werden.

Für die Zukunft wird allgemein als problematisch eingestuft, dass Elektromotoren mit SE-Magneten von unkundigem Personal kaum von konventionellen Elektromotoren unterschieden werden können¹⁵. Eine frühzeitige Sortierung der Motoren wird dadurch perspektivisch erschwert.

3.2 Seltene Erden Magnete in Sortieranlagen

Sortieranlagen, die mit Magneten arbeiten, kommen in vielen verschiedenen Industriezweigen und Anlagen zum Einsatz. Diese reichen von Sortieranlagen im Abfall- und Recyclingbereich bis hin zur Aussortierung metallischer Fremdkörper aus Schüttgut wie Getreide¹⁶. Die entsprechend eingesetzten Sortiermaschinen und Vorrichtungen unterscheiden sich deshalb stark in Aufbau und Größe. Ebenso werden sowohl elektromagnetische Systeme, als auch permanentmagnetische Systeme mit unterschiedlichen Magnettypen verwendet. Die folgenden Beispiele zeigen einige typische Magnetanwendungen im Sortierbereich:

3.2.1 Überbandabscheider

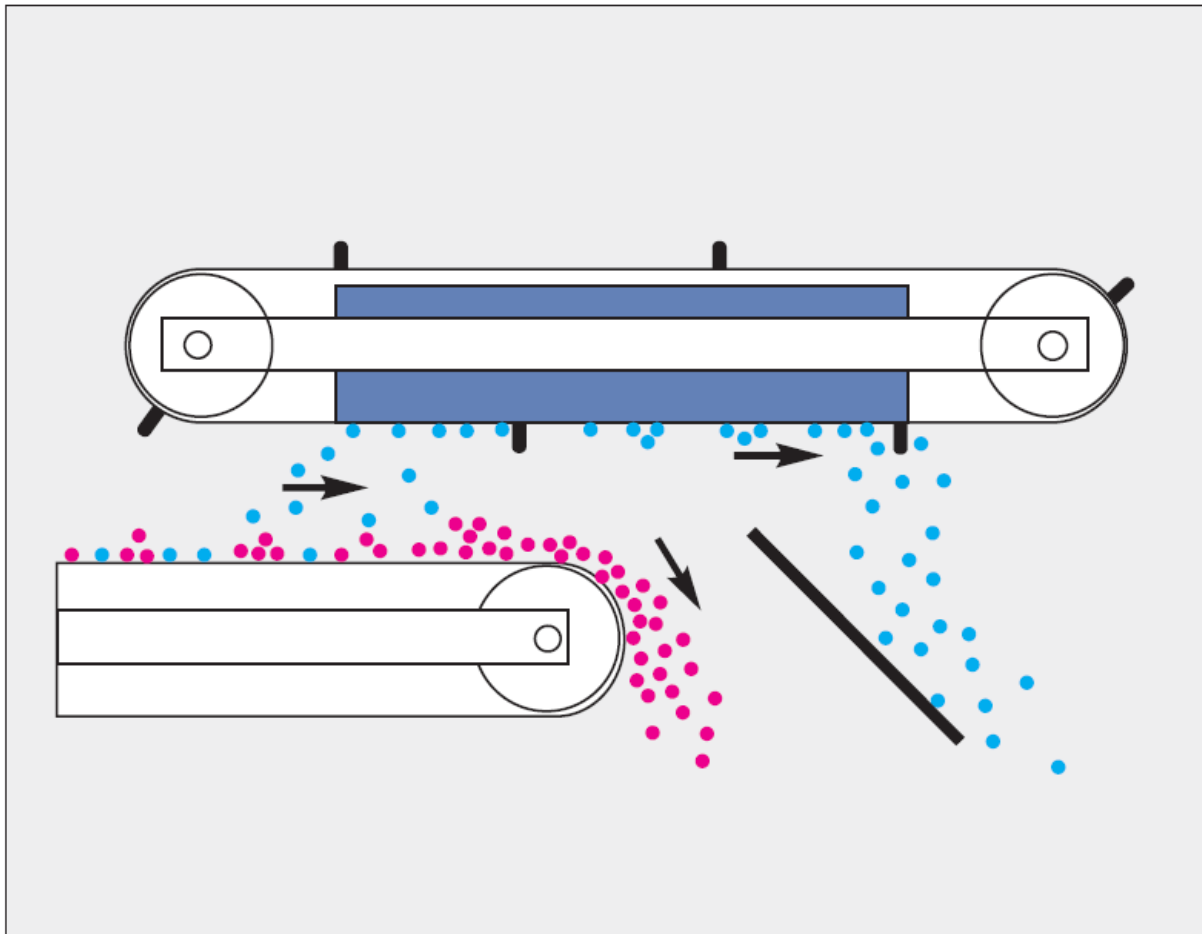
Überbandabscheider existieren in verschiedenen Varianten, die entweder mit Elektromagneten oder Permanentmagneten ausgestattet sind. Das Funktionsprinzip ist dabei in beiden Fällen gleich: Auf einem Förderband wird Schüttgut unter dem Überbandabscheider vorbeitransportiert. Ferromagnetische Teile werden von den Magneten im Überbandabscheider angezogen und mit Hilfe des umlaufenden Überbandes in den nichtmagnetischen Bereich gezogen, wo die Partikel abfallen (siehe Abbildung 14).

¹⁴ Das Projekt Motor Recycling (MORE) unter der Leitung von Siemens (Bast et al 2014) wird vom BMBF im Rahmen des STROM-Programms gefördert. Abschließende Ergebnisse werden voraussichtlich im Sommer 2014 vorliegen.

¹⁵ Zwar ist eine Unterscheidung anhand typischer Motorkennzahlen sowie dem Drehverhalten des Rotors zumindest abschätzungsweise möglich, dies erfordert aber vertiefte Sachkenntnis, die nicht bei allen Angestellten in Entsorgungs- und Recyclingbetrieben vorausgesetzt werden kann.

¹⁶ Aufgrund der verschiedenen in der Wertschöpfungskette eingesetzten Maschinen kommt es immer wieder zu Kontaminationen mit Eisenteilen wie Schrauben, Muttern oder Bolzen. Solche Teile können einerseits Schäden an Mahlwerken und anderen Maschinen verursachen, andererseits stellen sie auch im fertigen Produkt unerwünschte Fremdkörper dar.

Abbildung 14 Funktionsschema eines Überbandabscheiders im Abfall- und Recyclingbereich



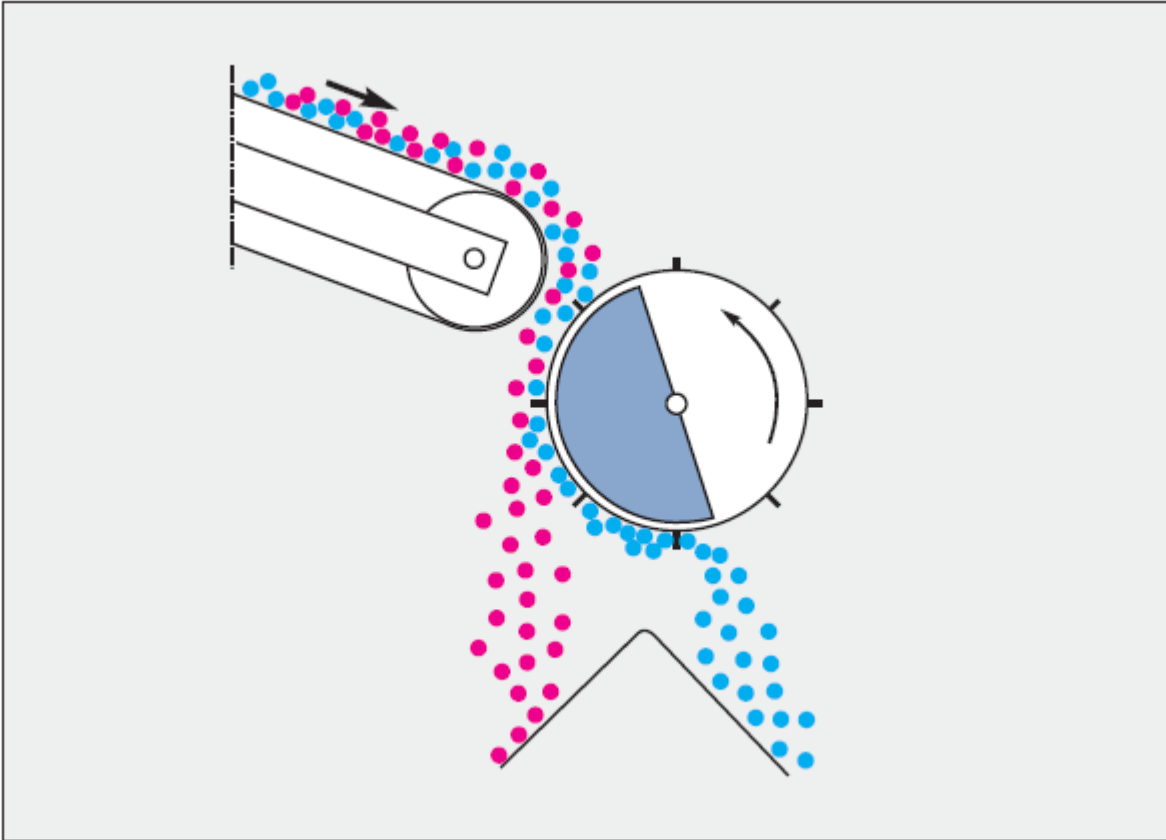
Quelle: Bakker Magnetics B.V. www.bakkermagnetics.com

Der magnetische Bereich umfasst je nach Modell eine Fläche von knapp 0,2 m² bis über 2 m² (Bakker Magnetics ohne Jahr), sodass bei Modellen mit Permanentmagneten durchaus große Mengen Magnetmaterial eingesetzt werden.

3.2.2 Magnetische Sortierrollen

Magnetische Sortierrollen werden zur Sortierung von Schüttgut homogener Korngrößen verwendet. Mit Hilfe eines Permanentmagneten werden ferromagnetische Partikel von nicht-magnetischen Teilen getrennt. Die Sortierrolle besteht aus einem beweglichen äußeren, und einem nicht-beweglichen inneren Teil. Während der äußere Teil der Rolle eine Drehbewegung ausführt, ist im statischen inneren Teil ein Segment mit Permanentmagneten bestückt. Wird das Schüttgut über die Rolle geleitet, so bleiben ferromagnetische Teile so lange an der Rolle haften, bis sie von der rotierenden Oberfläche in den nichtmagnetischen Bereich befördert werden (siehe Abbildung 15).

Abbildung 15 Funktionsschema einer magnetischen Sortierrolle.

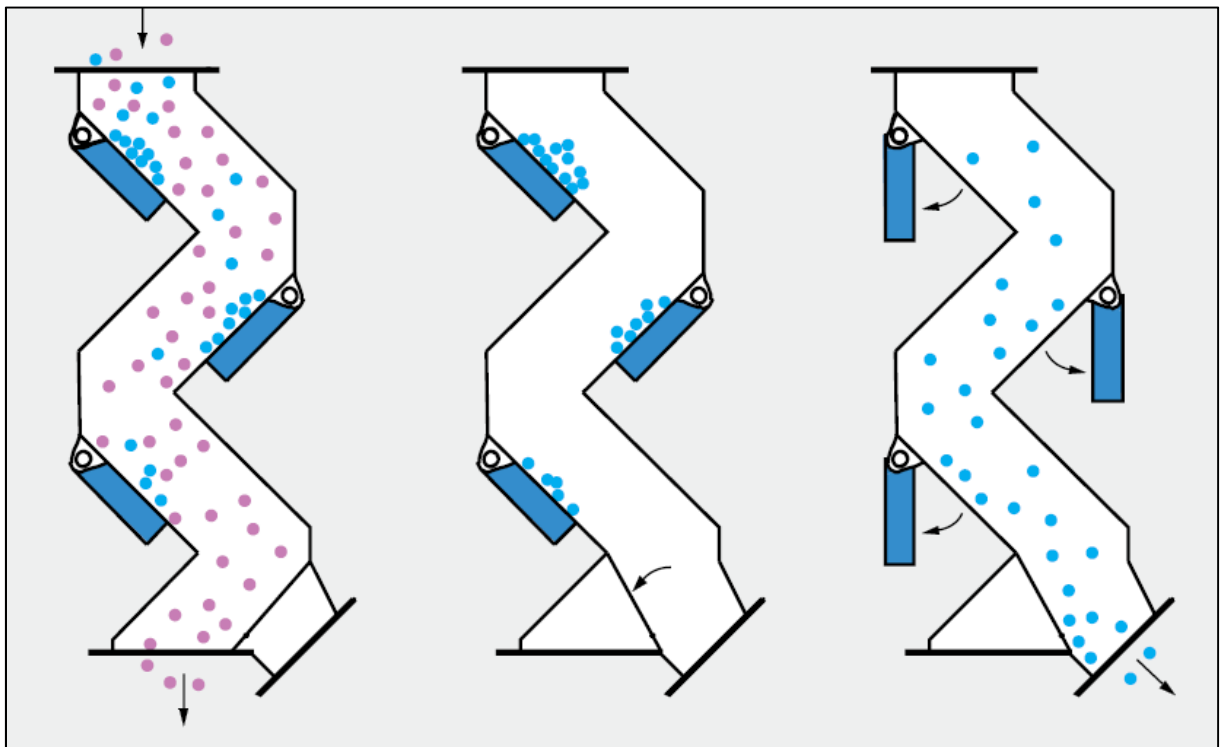


Quelle: Bakker Magnetics B.V. www.bakkermagnetics.com

3.2.3 Andere Sortiervorrichtungen

Zur Aussortierung vereinzelter ferromagnetischer Partikel aus einem Massenstrom, existieren verschiedene Vorrichtungen, die sich zwar hinsichtlich Geometrie unterscheiden, vom Funktionsprinzip aber durchaus ähnlich sind. Ein Vertreter dieser Sortieranlagen ist die Kaskadensortieranlage, bei der das Schüttgut in einer Kaskade an Permanentmagneten vorbeigeleitet wird. Ferromagnetische Teile bleiben an den Magneten haften und werden in einem späteren Arbeitsschritt entfernt (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16 Funktionsschema einer Kaskadensortieranlage.



Quelle: Bakker Magnetics B.V. www.bakkermagnetics.com

3.3 Seltene Erden Magnete in Hebewerkzeugen

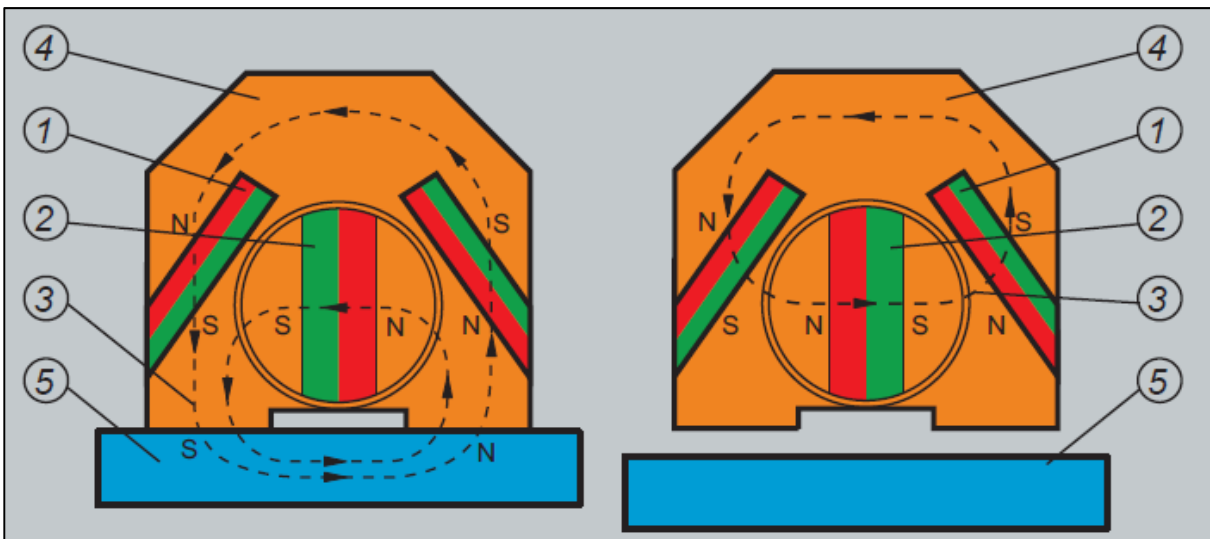
Seltene Erden Magnete werden auch zum Heben ferromagnetischer Lasten wie Bleche und Rohre eingesetzt. Anwendungsbereiche sind Industrien wie beispielsweise dem Behälter- und Rohrleitungsbau sowie dem Schiffsbau. Hebemagnete werden aufgrund ihrer Feldstärken fast ausschließlich aus gesintertem NdFeB-Material gefertigt. Das Zusetzen von Dysprosium ist bei diesen Anwendungen nicht üblich, da der Temperaturbereich der in der Regel unter 80°C liegt (siehe Abschnitt 2.1.2). Rein elektromagnetische Hebewerkzeuge kommen aus Sicherheitsgründen (Unfallgefahr bei Stromausfällen) nicht zum Einsatz. Entsprechend werden als elektromagnetische Hebewerkzeuge solche Hebewerkzeuge bezeichnet, die zwar elektromagnetisch geschaltet werden, deren Hebewirkung aber dennoch von Permanentmagneten ausgeht.

Abbildung 17 Hebemagnet der Firma Hebezone



Quelle: Hebezone GmbH (www.hebezone.de)

Abbildung 18 Funktionsweise von Hebemagneten



- 1 = Fester Permanentmagnet
- 2 = Beweglicher Permanentmagnet
- 3 = Magnetpole
- 4 = Stahlgehäuse – Ferromagnetischer Kranz
- 5 = Ferromagnetische Last

Quelle: Hebeteknik GmbH, www.hebeteknik.at

Hebemagnete bestehen aus zwei festen und einem beweglichen Permanentmagnet. Mit einem Hebel kann der bewegliche Magnet so positioniert werden, dass sich die Pole der Magnete abstoßen und die Feldlinien eine außen anliegende ferromagnetische Last erfassen (Ein-Zustand). Wird der bewegliche Magnet um 180° gedreht, so heben sich die Feldlinien im Inneren der Vorrichtung auf (Aus-Zustand).

Magnetische Hebewerkzeuge werden für Traglasten von ca. 100 kg bis mehrere 1000 kg gefertigt.

4 Abschätzung der eingesetzten Magnetmengen im industriellen Einsatz in Deutschland und Baden-Württemberg

4.1 Methodik

4.1.1 Bottom-Up-Analyse

Mit Unterstützung des Landesverbandes der baden-württembergischen Industrie (LVI), des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) und der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV) wurde eine umfangreiche Befragung von Unternehmen in Baden-Württemberg per Fragebogen durchgeführt.

Hierbei wurde nach Einsatz und Anwendung von Aggregaten (z. B. Elektromotoren) gefragt, die NdFeB-Magnete enthalten. Weiterhin wurden nach Verbrauchsmengen an Magneten, dem Dysprosiumgehalt und Erwartungen für die zukünftige Entwicklung gefragt.

Bei der Flächenbefragung hat sich herausgestellt, dass in den meisten Industrieunternehmen sehr wenig Kenntnis und Erfahrung darüber vorhanden ist, welche Mengen an NdFeB-Magneten in ihren Produktionsstätten vorhanden sind bzw. ob überhaupt Elektromotoren mit NdFeB-Magneten zum Einsatz kommen. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Unternehmen die Motoren vielfach als Teil von ganzen Produktionsanlagen kaufen.

4.1.2 Top Down Analyse

In den offiziellen Statistiken von Eurostat finden sich keine Daten zu Produktion, Import oder Export synchroner Servomotoren. Diese sind aber gerade für die Untersuchung permanenterregter Motoren in der Industrie von zentraler Bedeutung. Ein Grund für diese Lücke in den Statistiken ist wohl, dass bisher keine Norm für Servomotoren existiert (Experteninterviews 2013). Viele bisherige Studien zu Elektromotoren leiten deswegen die künftigen Einsatz von Servomotoren bzw. Permanentmagneten in der Industrie aus der allgemeinen Entwicklung der Statistiken zu Asynchronmotoren und bürstenlosen Gleichstrommotoren ab (Hoenderdaal et al. 2013, Almeida et al. 2012, Plötz & Eichhammer 2011).

Da für den Einsatz von Permanentmagneten in den Produktionsanlagen der Industrie aber die bürstenlosen Gleichstrommotoren kaum eine Rolle spielen und sich aus den Zahlen der Asynchronmotoren keine Rückschlüsse auf die tatsächlich vorhandenen Mengen an Permanentmagneten im Industrieinsatz ziehen lassen, wurden im Lauf des Jahres 2013 eine Reihe von Interviews mit Experten von verschiedenen Motoren- und Magnetherstellern und Vertretern von Fachverbänden in Deutschland geführt¹⁷. In diesen Gesprächen konnten viele Fragen zum Einsatz und zum Verbleib der Permanentmagnete geklärt werden. Aus den Informationen wurden neben der aktuellen und einer historischen Entwicklung der Produktion von Servomotoren (siehe Abbildung 19) und des Stocks an Permanentmagneten, der in Industrieanlagen in Deutschland vorhanden ist (siehe Abbildung 20), auch der künftige potentielle Rückfluss an Permanentmagneten aus ausgemusterten Elektromotoren hochgerechnet (siehe Abbildung 21).

4.2 Jährliche Produktion synchroner Servomotoren für Industrieanwendungen

Nach den Einschätzungen von Motorenherstellern wurden in Europa im Jahr 2012 ca. 1,5 bis 2 Millionen synchrone Servomotoren mit NdFeB-Magneten hergestellt. Davon wurden ca. 50 % in Deutschland produziert.

Etwa die Hälfte der in Deutschland hergestellten Motoren wird auch hier im Land eingesetzt, die andere Hälfte der Motoren wird entweder direkt oder als Teil von Maschinen und Anlagen ins Ausland exportiert. Zusammen mit einem geringen Zuwachs durch Importe kann von rund 500.000 Servomotoren pro Jahr ausgegangen werden, die dauerhaft in Deutschland in industriellen Anwendungen verbleiben (Experteninterviews 2013).

Durch die Wirtschaftskrise 2008/09 und die Hochpreisphase für die Seltenen Erden 2010/11 gab es in den letzten Jahren eine Stagnation der Produktion von Servomotoren.

Für die nächsten Jahre erwarten die Motorenhersteller einen deutlichen Anstieg der Servomotorenproduktion. Bis 2016 wird die Zahl der Servomotoren um rund 16 % im Vergleich zu 2012 zunehmen - zum einen durch Wirtschaftswachstum, zum anderen durch Substitution anderer veralteter Techniken.

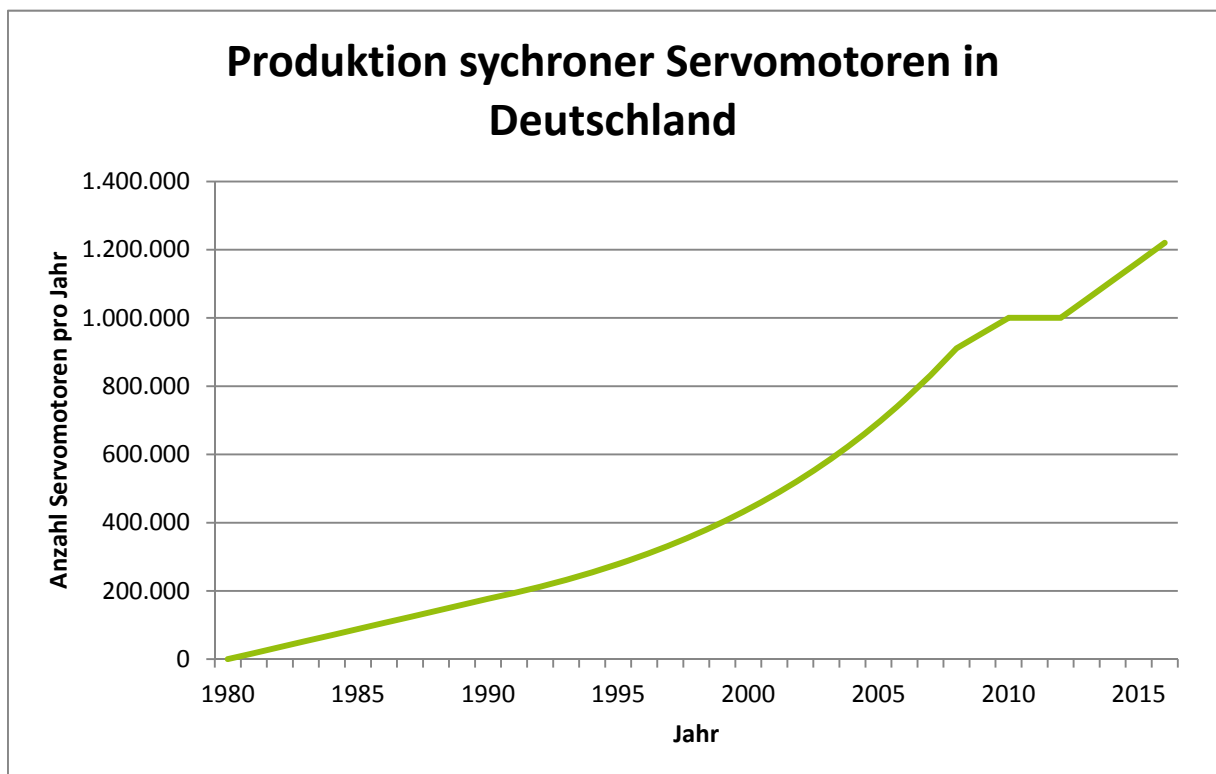
Auf den Markt gekommen sind synchrone Servomotoren mit NdFeB-Magneten bereits Anfang der 1980er Jahre und zwar für Werkzeugwechsler bei Werkzeugmaschinen. In größeren Stückzahlen kamen die Servomotoren ab etwa 1990 in den Einsatz, damals lag die Produktion in Deutschland bei rund 150-200 Tsd. Einheiten pro Jahr. Im Jahr 2000 lag die

¹⁷ Die Angaben der Motoren- und Magnethersteller sind vollständig anonymisiert, damit keine Rückschlüsse auf Betriebsdaten der Unternehmen gezogen werden können. Aus diesem Grund wird hier auch auf die Nennung der befragten deutschen Unternehmen verzichtet.

Herstellungszahl in Deutschland bei rund 500.000 Einheiten pro Jahr, also ungefähr bei der Hälfte von heute (Experteninterviews 2013).

Die nachfolgende Abbildung zeigt die hochgerechnete Entwicklung der Produktion von synchronen Servomotoren mit NdFeB-Magneten in Deutschland seit Beginn 1980er Jahre. Die Werte für die Jahre 2014 bis 2016 wurden hochgerechnet aus den Prognosen der Hersteller.

Abbildung 19 Produktion synchroner Servomotoren in Deutschland seit Anfang der 1980er Jahre



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut e.V. nach Informationen von Motorenherstellern (Experteninterviews 2013)

Neben den Servomotoren werden im deutschen Maschinenbau rund 2.600 Torque-Motoren pro Jahr eingekauft, die ebenfalls NdFeB-Magnete enthalten. Die Zahl der Torque-Motoren wird bis 2016 auf ca. 4.500 steigen. Weiterhin werden in der deutschen Industrie 10.000 Linearmotoren pro Jahr eingekauft, in dieser Zahl sind allerdings nicht nur solche mit NdFeB-Magneten enthalten sondern auch asynchrone Linearmotoren (Experteninterviews 2013).

4.3 Jährlicher Verbrauch an NdFeB-Magneten in Industrieanwendungen

Die Magnetmengen, die in den Servomotoren eingesetzt werden, unterscheiden sich stark je nach Motor. Neben der reinen Motorleistung spielen Form und Aufbau des Motors, die

Drehzahl, das Drehmoment und andere Parameter hierbei eine wichtige Rolle, so dass nicht einfach vom Gewicht oder von der Leistung auf das Magnetgewicht geschlossen werden kann.

Nach Aussagen von Motorenherstellern liegen rund 30 % der im deutschen Maschinenbau eingesetzten Servomotoren im Leistungsbereich 1-3 kW, rund 16 % liegen dagegen im Bereich über 20 kW (Experteninterviews 2013).

Im Durchschnitt liegen die typischen Magnetmengen pro Servomotor zwischen 0,05 und 0,2 kg. Bei einzelnen Herstellern liegt die Spannweite des Produktportfolios aber auch deutlich darüber. Gerade bei den Torque-Motoren können die Mengen an NdFeB-Magneten mehrere Hundert Kilogramm pro Motor betragen (Experteninterviews 2013).

Ausgehend von Durchschnittsangaben der Motorenhersteller wird hier mit einem durchschnittlichen Magnetgewicht von 0,175 kg pro Motor gerechnet. Somit kann im den letzten Jahren von einem Jahresverbrauch von rund 85-90 t NdFeB-Magnete in Industrieanwendungen in Deutschland ausgegangen werden. Ausgehend vom Anteil des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg an der Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes in Gesamtdeutschland, der in den letzten Jahren bei rund 20 % lag (Statistische Bundesamt 2013), wird der Jahresverbrauch an NdFeB-Magneten in der baden-württembergischen Industrie auf ca. 17-18 t geschätzt.

Der Anteil der Seltenen Erden an den Magneten liegt bei den meisten Motorenherstellern zwischen 25 und 35 %. Neben Neodym wird für die Magnete in den Industriemotoren aufgrund der erforderlichen Temperaturstabilität auch Dysprosium eingesetzt, dessen Anteil am Gesamtmagnetgewicht bei ca. 3,5 – 10 % liegt. Daneben sind in den NdFeB-Magneten oft auch Anteile an Praseodym (kann Neodym gleichwertig ersetzen) und geringe Mengen Terbium enthalten.

5 Ausweichstrategien während der Hochpreisphase

Die Hochpreisphase bei den Seltenen Erden in den Jahren 2010 und 2011 hat bei den Motorenherstellern zu einer Reihe von Ausweichstrategien geführt (Experteninterviews 2013).

Vor 2010 waren die Prognosen für synchrone Servomotoren wegen der höheren Effizienz noch deutlich optimistischer, einzelne Motorenhersteller erwarteten gar eine vollständige Verdrängung von Asynchronmotoren vom Markt. Diese Prognose wurde aber durch die zwischenzeitlich hohen SE-Preise relativiert.

Deshalb fahren viele Motorenentwickler derzeit zweigleisig und entwickeln sowohl effizienzoptimierte Asynchronmotoren (höherer Kupferanteil im Läufer – früher kam hier oft Aluminium mit niedrigerer Leitfähigkeit und dadurch höheren Verlusten zum Einsatz), als auch synchrone Servomotoren (mit NdFeB-Magneten). IE4 kann mit synchronen Servomotoren schon heute erreicht werden. Mit Asynchronmotoren ist dies noch nicht

möglich. Es ist aber denkbar, dass weitere Optimierungen bei Asynchronmotoren hier zumindest bei einigen Bauformen eine IE4-Konformität ermöglichen. Allerdings sind hier synchrone Servomotoren im Vorteil.

Die meisten Motorenhersteller sind während des Preisschocks 2010/11 davon ausgegangen, dass diese Hochpreisphase bei den SE nur kurz andauert. Um die Versorgung mit Permanentmagneten sicherzustellen, haben viele Motorenhersteller größere Mengen an NdFeB-Magneten eingekauft, teilweise direkt in China. Die höheren Preise werden heute in der Regel an die Kunden weitergegeben.

Teilweise gab es bei Motorenherstellern Überlegungen von den NdFeB-Magneten zurück zu anderen Dauermagneten zu gehen. Während Ferrit-Magnete wegen der deutlich geringeren Energiedichte nicht in Frage kamen, haben einzelne Hersteller das Segment der Motoren mit SmCo-Magnete ausgebaut.

In den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Magnet- und Motorenhersteller werden seit einigen Jahren verschiedene Strategien gefahren, um den SE-Anteil an den Magneten zu reduzieren. Neben der Reduktion des Gesamt-SE-Anteils handelt es sich hier vor allem um Bemühungen den Gehalt am besonders kritischen Dysprosium zu verringern. Das Dysprosium ist vor allem in der äußeren Schicht des Magneten zum Erhalt der Temperaturstabilität erforderlich, im Inneren der Magneten kann der Dy-Gehalt dagegen deutlich reduziert werden. Auch durch einen optimierten Aufbau der Rotoren und durch Veränderungen in der Geometrie der Magnete lassen sich das Gesamtmagnetgewicht und damit der Gesamt-SE-Gehalt in den Motoren verringern.

Andere Hersteller setzen auf moderne Niederspannungsmotoren, z. B. Synchronreluktanzmotoren, die keine Permanentmagnete enthalten und bereits heute die Effizienzanforderungen von IE4 erfüllen, allerdings einen Frequenzumrichter benötigen und deswegen nicht direkt mit einem Netzanschluss betrieben werden können.

Vereinzelt wurden bei den Motorenherstellern auch Rotoren aus ausgemusterten Servomotoren ausgebaut und wieder in neue Motoren eingesetzt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Kunden der Motorenhersteller, das heißt unter anderem die Anwender in der Industrie, die Systeme während der kurzen Hochpreisphase kaum gewechselt haben, da die Motoren meist sehr genau in die Anlagen eingepasst sind und somit wenig Spielraum für den Einsatz anderer Motoren-Typen bei kurzfristigen Preisanstiegen bleibt.

6 Recyclingpotenziale

Die Motorenhersteller unterhalten zwar zum Teil Reparatur- und Rücknahmecenter, aber bisher gibt es sehr wenige Rückläufe von ausgemusterten Motoren. Hier wird versucht einzelne Teile zu reparieren, die Rotoren werden - wenn möglich - wiederverwendet. Falls die Rotoren nicht mehr gebraucht werden können, kommen sie mitsamt den Magneten in

den Stahlschrott. Manche Hersteller bauen die Magnete bereits heute aus und lagern sie ein für ein künftiges Recycling von NdFeB Magneten.

In der Regel verbleiben die Motoren allerdings bei den Abnehmern und werden von diesen entsorgt oder weiterverkauft. Bisher gehen Motoren meist nach 10-15 Jahren auf Sekundärmärkte in Osteuropa oder Asien, da die Unternehmen veraltete Maschinen und Anlagen weiterverkaufen.

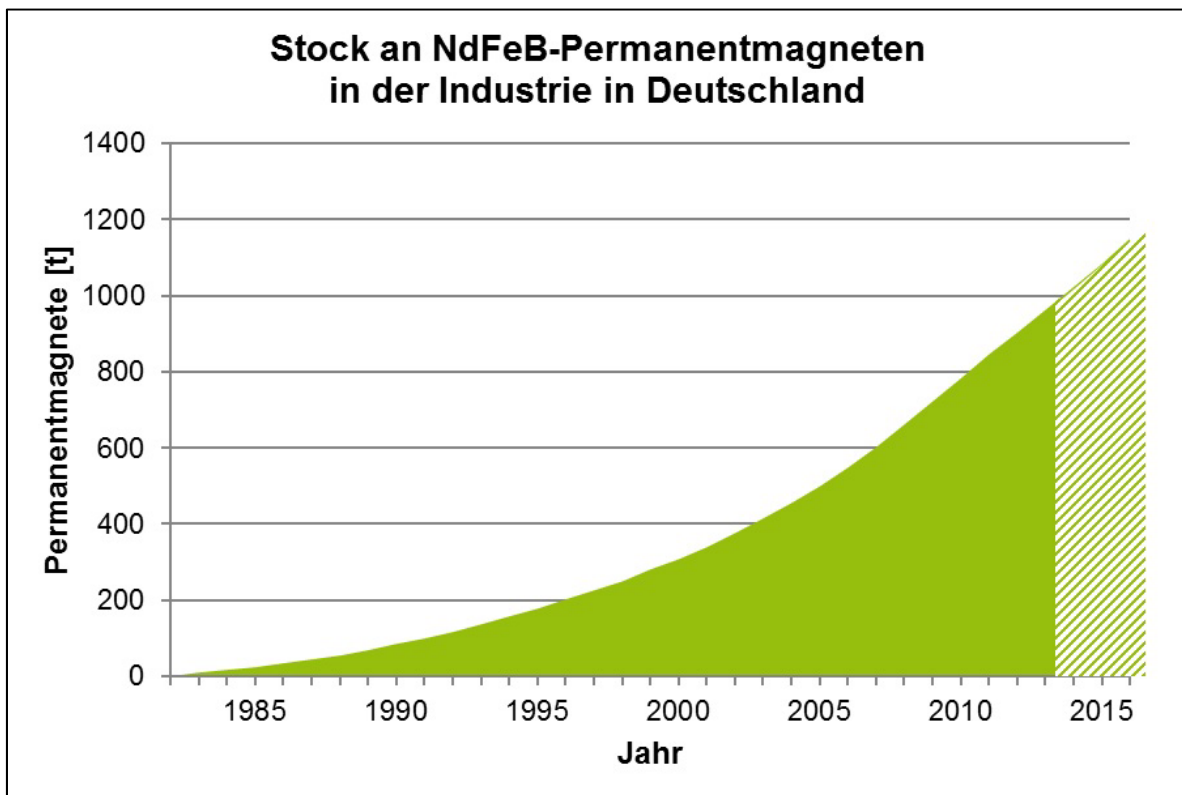
Mit regelmäßigem Austausch von Verschleißteilen können die Motoren 30 bis 40 Jahre halten, dann erst kommen sie zu Schrottverwertern. Die Dauermagnete landen vermutlich nicht nur im Stahl- oder Kupferschrott, sondern teilweise auch im Restmüll.

Die Motorenhersteller erwarten zukünftig vor allem Rückläufe von defekten Torque-Motoren, da die kleinen Reparaturwerkstätten, die es weltweit gibt, diese aufgrund der Größe und des Gewichts kaum reparieren können.

Nach Angaben von Motorenherstellern halten rund 10 % der Motoren 5-10 Jahre, rund 60 % 10 bis 15 Jahre und ca. 30% über 15 Jahre (Experteninterviews 2013). Aus den Zahlen der Produktion der Servomotoren, der Exportquote und der Lebensdauer der Motoren lässt sich der Stock an NdFeB-Magneten errechnen, der in den Produktionsanlagen der Industrie in Deutschland vorhanden ist. Abbildung 20 zeigt die berechnete Entwicklung des Stocks seit Anfang der 1980er Jahre, als die ersten Motoren mit NdFeB-Magneten auf den Markt kamen, mit der erwarteten Weiterentwicklung bis 2016. Aktuell ist einem Stock von knapp 1000 t NdFeB-Magneten zu rechnen, der in der deutschen Industrie vorhanden ist, davon ca. 20 %, d.h. 200 t, in Baden-Württemberg.

Besonders interessant und augenfällig ist der starke und anhaltende Anstieg des Stocks an NdFeB-Magneten, die in deutschen Industrieanlagen im Einsatz sind. So wird der gegenwärtige Stock von rund 1000 t in wenigen Jahren erheblich weiter angewachsen sein (siehe Graphik). Dazu muss erwähnt werden, dass in die Abschätzung der Stockentwicklungen nur Daten bzgl. der wichtigsten industriellen Anwendung, d.h. der Elektromotoren, eingeflossen sind. Hinzu kommen noch weitere Mengen von NdFeB-Magneten, die in Sortieranlagen und für Hebewerkzeuge im Einsatz sind (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3). Diese zusätzlichen Mengen konnten jedoch nicht identifiziert werden, sind jedoch in geringerer Größenordnung anzusetzen im Vergleich zu den Tonnagen aus den Elektromotoren. Insgesamt weisen die Ergebnisse des steigenden Stocks an NdFeB-Magneten in industriellen Anwendungen auf ein stark wachsendes zukünftiges Recyclingpotenzial hin, welches in den nächsten Jahren erschlossen werden muss.

Abbildung 20 Entwicklung des Stocks an NdFeB-Magneten in Industrieanwendungen in Deutschland

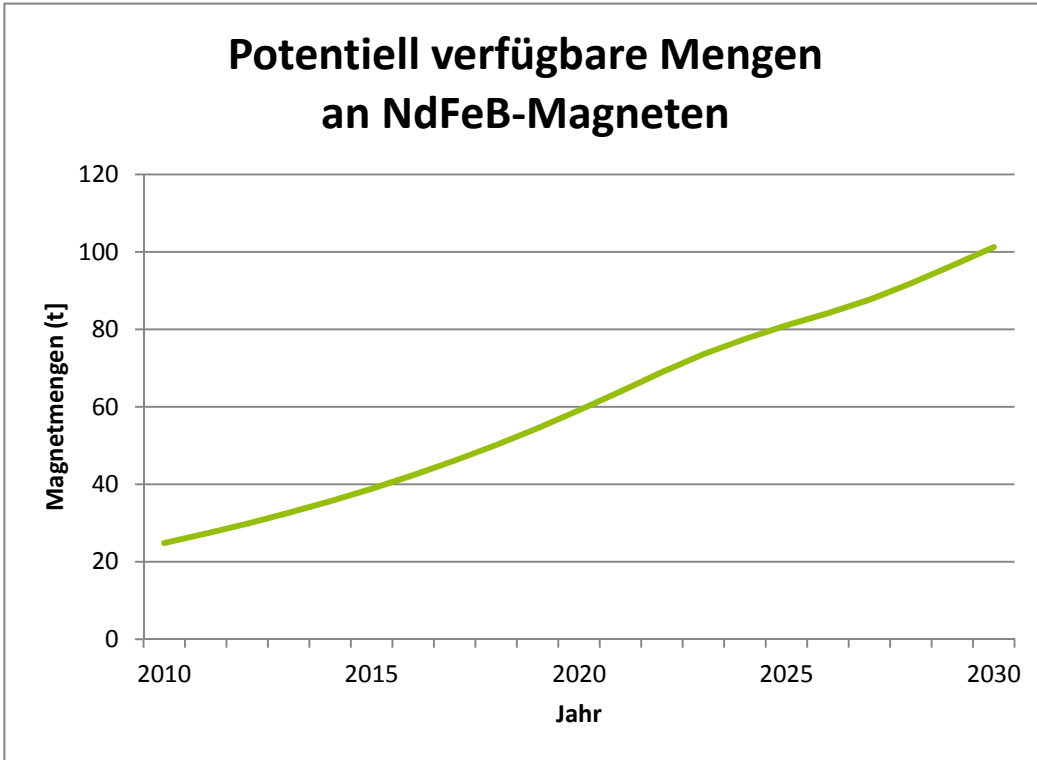


Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut e.V. nach Informationen von Motorenherstellern (Experteninterviews 2013)

Da die Produktion an synchronen Servomotoren mit Permanentmagneten erst in den letzten 10 bis 15 Jahren einen deutlichen Aufschwung genommen hat und die Servomotoren, die in Deutschland ausgemustert werden, häufig ins Ausland weiterverkauft werden, fallen bisher wenig Magnete für ein potenzielles Recycling an. Vereinzelt werden heute allerdings schon NdFeB-Magnete von Motorenherstellern oder Reparatur- und Recyclingbetrieben ausgebaut und gesammelt für ein künftiges Recycling.

Abbildung 21 zeigt die potenziell verfügbaren Mengen an NdFeB-Magneten, die in Deutschland in ausgemusterten Servomotoren aus Industrieanwendungen anfallen, wenn kein Weiterverkauf ins Ausland angenommen wird („Erstanfall“).

Abbildung 21 Entwicklung der potenziell anfallenden Mengen an NdFeB-Magneten pro Jahr aus ausgemusterten Motoren aus Industrieanwendungen in Deutschland



Quelle: eigene Berechnungen Öko-Institut e.V. nach Informationen von Motorenherstellern (Experteninterviews 2013)

Aus der obigen Abbildung wird deutlich, dass das jährlich anfallende Potenzial an NdFeB-Magneten für ein zukünftiges Recycling von heute rund 35 t auf gut 100 t im Jahr 2030 stark anwachsen wird.

7 Anforderungen an eine Kreislaufwirtschaft

In diesem Abschnitt werden kurz die wichtigsten Anforderungen, die für eine zukünftige erfolgreiche Kreislaufwirtschaft von Permanentmagneten notwendig sind, skizziert. Im folgenden Abschnitt finden sich Schlussfolgerungen aus dieser Studie und entsprechende Empfehlungen zur Realisierung einer entsprechenden zukünftigen Kreislaufwirtschaft. Aufgrund ihrer überragenden Bedeutung stehen die NdFeB-Magnete hierbei eindeutig im Fokus, d. h. weniger die mengenmäßig weniger relevanten SmCo-Magnete.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine zukünftige Etablierung eines Recyclings von NdFeB-Magneten im industriellen Maßstab sind mittelfristig Jahresmengen von mindestens einigen hundert Tonnen Magnetmaterial, die zum Recycling verfügbar sein müssen. Wie in Abschnitt 6 erarbeitet, kann aus industriellen Anwendungen (Elektromotoren) für

Deutschland für heute von einem Potenzial von rund 35 t und bis 2030 von einem Potenzial von gut 100 t pro Jahr ausgegangen werden. Für eine Etablierung des Recyclings von NdFeB-Magneten bzw. der darin erhaltenen Seltenen Erden Neodym, Praseodym und Dysprosium (untergeordnet auch Terbium) ist daher mindestens eine Recyclinglogistik im europäischen Rahmen notwendig und zielführend, da somit leichter Mengenschwellen für ein rentables Recycling überschritten werden können. Entsprechend müssen Sammel- und Zerlegesysteme zur Separierung der entsprechenden NdFeB-Magnete aufgebaut werden. Im Projekt MORE (Bast et al. 2014) werden z. B. derzeit Demontagevorschriften für die Entnahme von NdFeB-Magneten aus Antriebsmotoren der Elektromobilität entwickelt.

Weiterhin ist eine Bündelung bei der Erfassung und Kanalisierung von NdFeB-Magneten zusammen mit Magnetmaterial aus anderen Anwendungen wie Elektromobilität, Elektrofahrzeugen, Heizungspumpen, Aufzugsanlagen usw. anzustreben, da auch dadurch die erforderlichen „economies of scale“ in der Anlagenauslegung für das Recycling von NdFeB-Magneten erreicht werden können. Hierbei ist selbstverständlich eine Klassierung der NdFeB-Magnete z. B. nach Verschmutzungsgrad, Beschichtung, Dysprosiumgehalt etc. wichtig, um die Magnetmaterialien anschließend in die jeweils optimalen Prozesse (Wiederverwendung von Magneten, werkstoffliches Recycling zu neuen NdFeB-Legierungen oder rohstoffliches Recycling zur Rückgewinnung von Neodymoxid, Dysprosiumoxid etc.) einspeisen zu können.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Seltene Erden-Magnete kommen in verschiedenen industriellen Anwendungen wie elektrische Antrieben, Sortieranlagen und Hebewerkzeugen vor. Sowohl mengenmäßig als auch von der chemischen Zusammensetzung ist dabei der Einsatz in permanenterregten Synchronmaschinen aus Rohstoff- und Recyclingsicht besonders relevant. Mittel- und langfristig steigt sowohl der Stock an NdFeB-Magneten als auch das Recyclingpotenzial stark an – bedingt jeweils durch stark steigende Einsatzmengen.

Nichtsdestotrotz können zukünftig auch die NdFeB-Magnete aus Sortieranlagen und von Hebewerkzeugen ein zusätzliches interessantes Potenzial für das Recycling sein, nicht zuletzt, da hier von relativ großen Magneten je Einheit ausgegangen werden muss. Allerdings ist der Dysprosiumgehalt in diesen Anwendungen eher geringer.

Es muss dabei erinnert werden, dass im globalen Rahmen für alle Anwendungen von NdFeB-Magneten zwischen heute und 2020 von einer Verdoppelung der jährlichen Nachfrage (von rund 60.000 t auf rund 120.000 t) ausgegangen wird. Dies unterstreicht das wachsende Potenzial für zukünftige Recyclingaktivitäten.

Aufgrund der Tatsache, dass SE-Magneten erst seit den 1980er Jahren serienmäßig in Produkten und Maschinen verbaut wurden und meist erst seit fünf bis zehn Jahren signifikante Marktanteile – insbesondere bei Elektromotoren – erreicht haben, ist das

Aufkommen von Altgeräten und Schrotten derzeit noch gering. Da die derzeit anfallenden Magnetmengen aus industriellen Anwendungen weder statistisch erfasst werden, noch schlüssig und zuverlässig aus anderen Datenquellen abgeschätzt werden können, ist eine genaue Quantifizierung dieser Mengen derzeit nicht seriös möglich. Qualitative Aussagen von Herstellern sowie Reparaturbetrieben von Elektromotoren lassen aber durchwegs den Schluss zu, dass der Rücklauf reparaturbedürftiger und defekter Anwendungen – insbesondere Motoren – derzeit noch gering ist, mittelfristig aber stark ansteigen wird. Dies deckt sich mit den Ergebnissen dieser Studie (vgl. Abschnitte 4 und 6.)

Dies resultiert insbesondere aus der Tatsache, dass alle wesentlichen Anwendungen durchschnittliche Lebensdauern von über 10 Jahren aufweisen. Ein signifikantes Aufkommen von SE-Magneten und Schrotten mit SE-Magneten aus industriellen Anlagen wird daher erst in weiteren fünf bis zehn Jahren erwartet. Allerdings können sich Synergien durch den Anfall weiterer NdFeB-Magnete aus anderen Anwendungen (Elektrofahrräder) ergeben.

Zwar werden bei allen betrachteten Anwendungen die Entsorgungen in der Regel im Business-to-Business Bereich abgewickelt, was typischerweise eine sehr gute Voraussetzung für hohe Erfassungsraten und eine geregelte Entsorgung ist, der Ausprägung eines Recyclingzweiges mit Fokus auf SE-Magneten stehen aus jetziger Sicht dennoch verschiedene Hemmnisse im Wege:

- Aufgrund der Tatsache, dass die Rückgewinnung von Seltene Erden aus end-of-life Magneten noch nicht im industriellen Maßstab realisiert wird, gibt es derzeit keinen funktionsfähigen Markt für eventuell generierte Magnetschrotte. Derzeit ist weder der Zeithorizont für die Etablierung eines solchen Marktes, noch die Preisniveaus vorhersehbar. Diese Unsicherheit wirkt sich naturgemäß negativ auf die Bereitschaft zum Aufbau entsprechend ausgeprägter Rücknahme und Separationssysteme aus.
- Gebrauchte Industrieanlagen werden oftmals nicht verschrottet, sondern in Nicht-EU-Länder beispielsweise in Osteuropa und Asien exportiert. Mit diesem Exportstrom gehen auch eventuell enthaltene SE-Magnete der deutschen und europäischen Recyclingwirtschaft verloren.
- SE-Magnete sind zumeist so in ihre Anwendung verbaut, dass diese von außen nur mit spezifischem Fachwissen als solche erkannt werden können. Hinzu kommt, dass die derzeit etablierten Vorbehandlungstechnologien für Industrieanlagen Magnete nicht sortenrein abtrennen können. Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften werden SE-Magnete deshalb überwiegend in die Stahlfraktion sortiert, wo die Seltenen Erden dissipativ verloren gehen. Deshalb ist zu befürchten, dass selbst im Falle eines sich etablierenden Marktes für Magnetschrotte das Recyclingpotenzial ohne entsprechende Gegenmaßnahmen nicht voll ausgeschöpft werden kann.

In Anbetracht dieser Gemengelage kann gefolgert werden, dass das Recycling von SE-Magnete aus industriellen Anwendungen kurzfristig keinen signifikanten Beitrag zur Versor-

gung mit Seltenen Erden leisten kann. Hierfür sind sowohl das derzeitige geringe Aufkommen als auch die ungeklärten Erfassungs- und Verwertungsfragen ausschlaggebend. Dennoch können bereits heute Weichen gestellt werden, die mittel- bis langfristig die Wahrscheinlichkeit stark erhöhen, dass die Seltenen Erden in den anfallenden Magnetmengen in den industriellen Kreislauf zurückgeführt werden. Hierzu zählen insbesondere folgende Maßnahmen:

Kennzeichnungspflicht für industrielle Anwendungen

Für industrielle Anwendungen, die eine gewisse Mindestmenge an Magnete enthalten (z. B. > 10 g), sollte eine Kennzeichnungspflicht eingeführt werden. Diese Kennzeichnung sollte über folgende Aspekte Auskunft geben:

- Sind in der Anwendung Permanentmagnete verbaut? (Ja/Nein)
- Wenn ja, welcher Typ Permanentmagnet ist verbaut? (Ferrit, AlNiCo, SmCo, NdFeB)

Eine solche einfache Kennzeichnung sollte auf dem Typschild der Maschine angebracht sein und es zukünftig Recyclingbetrieben erleichtern, eventuell werthaltige Magnete zu lokalisieren.

Für die Implementierung einer solchen Kennzeichnungspflicht bietet sich die Überprüfung der Motorenverordnung¹⁸ an, die spätestens im Jahr 2016 erfolgen muss und dabei explizit Aspekte der Ressourceneffizienz, Wiederverwendung und Recycling berücksichtigen soll (Artikel 7 der Verordnung). Ebenso sollte der laufende Ökodesign-Prozess zu Motoren < 0,75kW und > 375kW an (DG Energy Los 30) im Blick gehalten werden, der wahrscheinlich einen großen Teil der Diskussionsgrundlage für die Revision der Motorenverordnung bereitstellt. Eben solche Möglichkeiten bieten sich bei den zukünftigen Revisionen der Ökodesign-Verordnungen zu Nassläufer-Umwälzpumpen (641/2009), Ventilatoren (327/2011) und Wasserpumpen (547/2012) sowie den laufenden Ökodesign-Prozessen zu Werkzeugmaschinen (DG Enterprise Los 5), Abwasserpumpen (DG Energy Los 28), Reinwasserpumpen (DG Energy Los 29) und Produkten in Antriebssystemen insbesondere Kompressoren (DG Energy Los 31).

Generell sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Kennzeichnungssystematik bei den verschiedenen Anwendungen einheitlich erfolgt.

Aufbau eines Rücknahmesystems für Magnetschrotte

Die Untersuchung zeigt, dass die anfallenden Mengen an Seltenen Erden-Magneten aus industriellen Anwendungen – insbesondere Elektromotoren – in den kommenden Jahren

¹⁸ Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren.

stark zunehmen werden. Dennoch ist derzeit noch kein System in Sicht, das eine effektive Rückführung dieser Magnetschrotte in eine Kreislaufwirtschaft sicherstellen könnte. Zwar gilt die Tatsache, dass industrielle Anlagen im B2B-Bereich entsorgt werden, als prinzipiell positiver Faktor beim Aufbau einer Kreislaufwirtschaft, andere Faktoren, wie z. B. der bis dato fehlende Absatzmarkt für Magnetschrotte, wirken sich aber ebenso hemmend auf die Etablierung eines solchen Systems aus. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass das Recycling von Seltenen Erden aus Magnetschrotten derzeit auch einem „Henne-Ei-Problem“ gleicht: Solange kein Absatzmarkt für Magnetschrotte besteht, wird sich ohne zusätzliche Stimulanz kein Sammel- und Rücknahmesystem etablieren. Umgekehrt werden wohl keine Investitionen in großskaliges Recycling von Magnetschrotten getätigt, solange nicht die Versorgung mit ausreichend großen Schrottmengen gewährleistet ist.

Insofern kommt dem frühzeitigen Aufbau eines Sammel- und Rücknahmesystems eine strategische Bedeutung zu, da sich entsprechende Ansätze positiv auf Investitionsentscheidungen im Bereich Magnetrecycling auswirken.

Entsprechend sollte in unmittelbarer Zukunft ein Sammel- und Rücknahmesystem für Magnetschrotte konzeptioniert und sukzessive aufgebaut werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein solches System nicht zwangsläufig auf regulatorischer Basis etabliert werden muss, sondern ebenso auf Initiativen der Industrie aufbauen kann.

Hinsichtlich der geographischen Abdeckung ist zu berücksichtigen, dass Mengeneffekte eine wichtige Rolle beim Neuaufbau von Recyclingstrukturen spielen. Insofern sollte ein Sammelsystem idealerweise EU-weit konzeptioniert werden.

Hinsichtlich der Exportströme von Seltenen Erden-Magneten ins außereuropäische Ausland ist zu berücksichtigen, dass diese Exporte in der Regel nicht unter das Abfallregime fallen. Bei den entsprechenden Anlagenexporten handelt sich zumeist um funktionierende Gebrauchtanlagen und somit einem legalen Warenstrom. Forderungen nach einer Unterbindung solcher Exporte sind aus diesem Grund juristisch kaum umsetzbar. Zudem ist auch aus Umweltsicht fragwürdig, ob eine Einbehaltung von funktionsfähigen Gebrauchtanlagen zum Zwecke des Recyclings sinnvoll ist¹⁹. Vielmehr sollte bei diesem Aspekt geprüft werden, in wieweit Anreizsysteme etabliert werden können, dass mittelfristig auch Magnetschrotte die im außereuropäischen Ausland anfallen, für das Recycling in der EU erfasst werden können. Dieser Aspekt wird zurzeit in einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt am Beispiel von NdFeB-Magneten, die manuell aus Festplattenlaufwerken von Alt-PCs in Ghana ausgebaut werden, untersucht (Bo2W 2015).

¹⁹ So gibt die europäische Abfallhierarchie der Wiederverwendung eindeutig Vorzug gegenüber der stofflichen Verwertung (Recycling).

Initiativen Baden-Württembergs auf Europäischer Ebene

Das Öko-Institut regt an, dass das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg die Ergebnisse dieser Studie nutzt und entsprechende Initiativen zur Förderung des Recycling von NdFeB-Magneten aus industriellen Anwendungen bei der Europäischen Kommission in Brüssel anstößt. Hierfür sollte unbedingt die Unterstützung der relevanten Industrieverbände wie LVI/BDI, ZVEI, VDMA, VCI sowie BDSV gesichert werden, die die Durchführung dieser Studie bereits umfassend und engagiert unterstützt haben. Das gerade gestartete europäische Kompetenznetzwerk zu Seltenen Erden – European Rare Earths Competency Network - ERECON unter der Koordinierung durch die DG Enterprise and Industry bietet hierfür aktuell eine hervorragende Plattform um entsprechende Aktivitäten zum Recycling von NdFeB-Magneten in Brüssel anzustoßen.

9 Literatur

- Almeida et al. 2008 Almeida, T. A.; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J.; Fonseca, P.: EuP Lot 11 Motors Final Report. Coimbra, 2008.
- Almeida et al. 2012 Almeida, A.; Falkner, H.; Fong, J.; Jugdoyal, K.: EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, Draft Version 2 November 2012, Coimbra, 2012.
- Bakker Magnetics 1997 Bakker Magnetics: Industrial Magnetic Metal Separation Systems. Eindhoven, 1997.
- Bakker Magnetics (ohne Jahr) Bakker Magnetics: Separation systems for waste processing and recycling industries. Eindhoven, ohne Jahr.
- Bast et al. 2014 Bast, U. et al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben - MORE (Motor Recycling), Siemens AG, Daimler AG, Umicore AG & Co KG, Vacuumschmelze GmbH, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Technische Universität Clausthal, Inst. für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Öko-Institut e.V., Fraunhofer -Institut für System- und Innovationsforschung, gefördert durch das BMBF im Rahmen des Programms „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“, 2014.
- Binnemans et al. 2013 Binnemans, K. et al.: Recycling of rare earths: a critical review, Journal of Cleaner Production, Volume 51, 15 July 2013, Pages 1-22.
- Bo2W 2015 Buchert, M.; Bleher, D. Degreif, S.; Manhart, A.; Mehlhart, G., Merz, C.; Schleicher, T. et al.: Globale Kreislaufführung strategischer Metalle: Best-of-two-Worlds Ansatz (Bo2W); Öko-Institut e.V.; Umicore, Vacuumschmelze, Johnson Controls, Zentrum für Umwelt und Entwicklung (CEDARE) in Kairo (Ägypten), City Waste Management Co. Ltd. (Ghana), gefördert durch das BMBF im Rahmen des r3-Programms, 2012-2015 (www.resourcefever.org).
- Buchert 2011 Buchert, M.: Rare Earths - a Bottleneck for future Wind Turbine Technologies? Vortrag auf der WIND TURBINE SUPPLY CHAIN & LOGISTICS, Berlin, 29. August 2011.
- Buchert et al. 2011 Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen; Öko-Institut e.V., Daimler AG, Umicore, TU Clausthal, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011.
- Buchert et al. 2012 Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38, Recklinghausen, 2012.
- Deutsches Kupferinstitut 2011 Deutsches Kupferinstitut: Sparen mit dem Sparmotor. Energieeffiziente Antriebsstränge mit Motoren nach IEC 60034-30. Düsseldorf, 2011.

Experteninterviews 2013	Interviews mit Experten verschiedener Motoren- und Magnetherstellern sowie mit Vertretern von Fachverbänden im Laufe des Jahres 2013
Fischer 2011	Fischer, R.: Elektrische Maschinen. 15. Aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
Grieb 2013	Grieb, B. (Magnequench GmbH): Seltene Erden – eine Übersicht, Vortrag auf dem Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress Baden-Württemberg, Forum 6: Energieeffiziente industrielle Antriebe und deren Abhängigkeit von Selten Erden, Stuttgart, 13.11. 2013.
Gutfleisch et al. 2011	Gutfleisch, O.; Willard, M.A.; Brück, E.; Chen, C.H.; Sankar, S.G.; Liu, P.: Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. In: Advanced Materials, Volume 23, 821-842, 2011.
Hatch 2011	Hatch, G.: Seagate, rare earths and the wrong end of the stick. Internet: http://www.techmetalsresearch.com/2011/07/seagate-rareearths-and-the-wrong-end-of-the-stick/ (Zugriff: 25.07.2011).
Hebetechnik (ohne Jahr)	Hebetechnik: Benutzerhinweise Lasthebemagnete. Internet: http://www.hebetechnik.at/download/benutzerhinweise/Benutzerhinweise_Lasthebemagnete.pdf (Zugriff: 30.09.2013)
Hoenderdaal et al. 2013	Hoenderdaal, S.; Espinoza, L.T.; Marscheider-Weidemann, F.; Graus, W.: Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? In: Energy, Volume 49, 344-355, 2013.
Kingsnorth 2010	Kingsnorth, D., IMCOA: "Rare Earths: Facing New Challenges in the New Decade" presented by Clinton Cox SME Annual Meeting 2010, 28 Feb – 03 March 2010, Phoenix, Arizona
Oakdene Hollins 2010	Oakdene Hollins Research & Consulting: Lanthanide Resources and Alternatives, A report for Department for Transport and Department for Business, Innovation and Skills. Aylesbury, 2010.
Plötz & Eichhammer 2011	Plötz, P.; Eichhammer, W.: Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2011
Rieger 2009	Rieger, R.: Die Verwendung von „seltene Erdmetallen“ in der Elektrogeräte- und Fahrzeugproduktion und ihre Erfassungsmöglichkeit im Metallrecycling. Diplomarbeit an der TU Dresden, Dresden, 2009.
Schischke et al. 2012	Schischke, K.; Hohwieler, E.; Feitscher, R.; König, J.; Kreuzchner, S.; Wilpert, P.; Nissen, N.F.: EuP Lot 5: Machine tools and related machinery. Berlin, 2012.
Schroeter 2013	Schroeter, K.-H.: Magnetwerkstoffe. Internet: http://www.magnetwerkstoffe.de/ (Zugriff: 01.02.2013).

- Schüler et al. 2011 Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling. Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- Shaw & Constantinides 2012 Shaw, S.; Constantinides, S.: Permanent Magnets: the Demand for Rare Earths. 8th International Rare Earths Conference. November 2012
- Statistisches Bundesamt 2013 Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2013
- UNEP 2011 Graedel, T.E.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. et al.: Recycling rates of metals – a status report, International Resource Panel – Working Group on the Global Metal Flows (Editor), UNEP 2011.
- Westphal & Kuchta 2012 Westphal, L.; Kuchta, K.: Recyclingverfahren gesucht. In: Recycling Magazin 13/2012.