

# Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden

## – Quantitative Ergebnisse für Neodym in Deutschland –

Volker Zepf

1.	Das verkannte Potential .....	463
2.	Jahresproduktion von Neodym.....	465
3.	Untersuchung des Neodymbedarfs ausgewählter Bereiche .....	465
3.1.	Computerfestplatten .....	465
3.2.	Mobiltelefone .....	466
3.3.	Windenergie .....	467
3.4.	E-Mobilität .....	468
3.5.	Elektrofahrräder .....	469
3.6.	Zusammenfassung: Globaler Neodym-Bedarf der Bereiche HDDs, Mobiltelefone, Windräder, E-Mobilität und E-Bike.....	470
3.7.	Recyclingpotential von Nd aus Permanentmagneten in Deutschland .....	470
4.	Weiteres Potential.....	471
4.1.	Magnetresonanztomographen .....	471
4.2.	Haushaltskleingeräte.....	472
4.3.	Weitere Anwendungsgebiete .....	472
5.	Fazit.....	473
6.	Quellen .....	474

*Ich weiß, dass ich nicht weiß.*

Sokrates zugeschrieben in Platons Apologie.

*Wenn Du weißt, was du tust, kannst Du tun, was Du willst.*

Moshé Feldenkrais

## 1. Das verkannte Potential

Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen-Erd-Elemente (SEE), im Speziellen von Neodym (Nd) in Deutschland, kann auch als das unbekanntes Recyclingpotential betitelt werden.

Ein Hauptproblem sind die unzuverlässigen verfügbaren Zahlen zu Produktion der SEE und die Anwendungen von Nd sowie viele Schätzungen, Prognosen und Szenarien, die teilweise auf unrealistischen Annahmen basieren und folglich zu falschen Ergebnissen führen. Die Schlagzeilen im Sinne des notwendigen Handy-Recyclings, um die für die deutsche Wirtschaft so wichtigen Seltenen Erden wieder zu gewinnen, sind bei genauer Betrachtung oft nicht haltbar und bedürfen der Richtigstellung, um tatsächliche Potentiale zu erkennen und falsche Anstrengungen rechtzeitig zu stoppen.

In diesem Sinne geht diese Arbeit der Frage nach, welche Neodym-haltigen Produkte eventuell schon heute für ein Recycling in Deutschland zur Verfügung stehen, ohne dass dies bekannt ist. Dazu wird eine Dissertation des Autors über die SEE fortgeführt; im Speziellen über den Bedarf an Neodym für die vier Schlüsselbereiche Computerfestplatten (HDDs), iPhones (Mobiltelefone), Windenergie und E-Mobilität (Antriebsmotoren) im Jahr 2010. Auffallend waren damals wie heute die unzuverlässigen Informationen und Zahlen zu und über die Produktionsmengen der SEE insgesamt und der einzelnen SE Elemente im Besonderen. Letztlich wurde aufgrund der vielen damaligen Schlagzeilen, sowohl in wissenschaftlichen Studien und vor allem in der Presse über die scheinbare Unverzichtbarkeit von Seltenen Erden für die Windindustrie die Hypothese aufgestellt, dass die vier genannten Anwendungsbereiche zusammen achtzig Prozent des globalen Neodym-Angebots beanspruchen. Eine Falsifikation der Hypothese schien unwahrscheinlich und es wurde vielmehr eine geringe Korrektur der Hypothese durch reliable und valide Quantifizierungen erwartet. Das Ergebnis war jedoch eine völlige Falsifikation der Hypothese, indem für diese vier Bereich nur etwa zwanzig Prozent des globalen Bedarfs an Neodym abgeleitet werden konnte ([52], S. 114ff). Dieses überraschende Ergebnis birgt prinzipiell drei Erkenntnisfragen:

1. Wo verbergen sich die restlichen achtzig Prozent an Neodym? Hier besteht nach wie vor weiterer Forschungsbedarf. Eine ähnliche und eher basale qualitative Materialflussanalyse hat beispielsweise das Öko Institut auf europäischer Ebene empfohlen [40].
2. In diesen achtzig Prozent verbirgt sich ein Recycling-Potential, das möglicherweise schon heute (in Deutschland) verfügbar ist. Um welche Produkte handelt es sich?
3. Sind die verfügbaren Daten über die SEE wirklich zuverlässig? Denn eine intransparente Datenlage erschwert ökonomische und politische Entscheidungen.

Im Nachgang zur Dissertation wurde an der Universität Augsburg 2013 ein studentisches Seminar eingeführt, das versucht, durch weitere Grundlagenrecherchen die Daten über die Anwendungen von Neodym in Permanentmagneten in Kleingeräten besser zu bestimmen. Dies gelingt mit den verfügbaren Mitteln zwar nur bedingt; dennoch konnten einige interessante Erkenntnisse gewonnen, Schlagzeilen relativiert bzw. korrigiert und weiterer Forschungsbedarf bestimmt werden.

Es werden zunächst die quantitativen Ergebnisse der Dissertation mit dem Berichtsjahr 2010 vorgestellt, ergänzt durch aktuelle Daten, überwiegend aus 2013, bevor weitere untersuchte Produktgruppen kurz vorgestellt werden. Ein Exkurs über die Produktionsmengen der SEE hilft, die gemessenen Daten in eine globale Perspektive zu setzen.

## 2. Jahresproduktion von Neodym

Ein Grundproblem für die Bewertung des Abbaus von SEE ist die mangelnde Zuverlässigkeit der Produktionszahlen. Meist wird nur die Gesamtproduktion der Lanthanoide gemeinsam angegeben; eine Differenzierung nach einzelnen SEE findet sich kaum, und wenn, bei Investor Presentations der Produzenten Lynas Corp., Australien und Molycorp, USA. Das United States Geological Survey (USGS) ist eine der Hauptquellen für die jährlichen Produktionszahlen, die in regelmäßigen Abständen in den Mineral Commodity Summaries (MCS) und den Minerals Yearbook (MYB) veröffentlicht werden. Die Quellen des USGS sind neben den Veröffentlichungen der (nicht chinesischen) SEE-Produzenten, die Berichte des China Rare Earth Information Centers, die Veröffentlichungen der britischen Beratungsdienst Roskill, und Informationen von Prof. D. Kingsnorth, IMCOA, Australien. Die Daten-Problematik ist in Zepf ([52], S. 51ff) detailliert dargestellt.

Nach den Zahlen des USGS MYB gab es 2009 ein Fördermaximum von 132.000 Tonnen Seltenerdoxid (SEO), während sich in den Folgejahren die Produktion von 123.000 Tonnen (2010) bis auf etwa 110.000 Tonnen SEO (2011) verringerte. Die dazwischen liegende MCS von 2012 hatte noch von 130.000 Tonnen SEO-Produktion für 2011 gesprochen. Die tatsächliche Produktionsmenge von Neodym kann über den Erzgehalt abgeschätzt werden (Details siehe [52] S. 53-64). Ein Richtwert ergibt sich aus dem Nd-Gehalt in Bayan Obo, der bei etwa 18 Prozent liegt. Bei einer Jahresproduktion von 110.000 Tonnen SEO (2013) beträgt der Anteil von Nd demnach 19.800 Tonnen Nd in seiner oxidischen Form ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ )<sup>1</sup>, das entspricht rund 17.000 Tonnen reinem Nd-Gehalt. Dieser Wert gilt als zentraler Vergleichswert für die Bewertung des Recyclingpotentials. Ein Beispiel für die unzuverlässige Datenqualität bietet die Angabe von Constantinides (2012), Arnold Magnetics, USA, der den Bedarf an SEE-Magneten für 2010 bei rund 29.000 Tonnen Nd-Oxid und für 2015 schon bei 45.000 Tonnen Nd-Oxid sieht ([12], Folie 21); dafür müssten 160.000 Tonnen bzw. 250.000 Tonnen SEO abgebaut werden. 2010 wurden jedoch laut USGS 123.000 Tonnen SEO abgebaut, was etwa 22.000 Tonnen Nd-Oxid bzw. 18.800 Tonnen reinem Nd entspricht. Ein weiteres Beispiel sind die Prognosen für die Windenergie im Jahr 2020 von 16.830 Tonnen Magneten ([35], S. 3). Dies entspricht einem Zuwachs von gerundet 28.000 MW bei den DD PMG Systemen. 2013 betrug der Zuwachs 5.000 MW (weitere Informationen siehe unten). Die Prognose scheint zu hoch gegriffen.

## 3. Untersuchung des Neodymbedarfs ausgewählter Bereiche

### 3.1. Computerfestplatten

Für die Bestimmung des Bedarfes von Neodym für Computerfestplatten (Hard Disk Drives, HDDs) wurden etwa 150 HDDs unterschiedlicher Hersteller und Produktionsjahre zerlegt, die absoluten und durchschnittlichen Gewichte der Schreibkopfmagnete je Produktionsjahr bestimmt und der qualitative Materialmix mittels EDX-Messverfahren untersucht.

<sup>1</sup>  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  entspricht nach der Molmassenberechnung: 85,74 % Nd und 14,26 % O

Im Jahr 2010 wurden weltweit 675 Millionen HDDs produziert. Für die Herstellung der Schreibkopfmagnete und Spindelantriebe wurde der Bedarf von 1.818 Tonnen Nd ermittelt ([52], S. 74-86). Nach 2010 waren die Produktionszahlen rückläufig bis 2013 eine Trendwende bei 552 Millionen HDDs gesehen wird [14, 42], wofür etwa 1.400 Tonnen Nd benötigt wurden. Genaue Zahlen sind nicht zu bestimmen, da der Anteil von 2,5" HDDs unbekannt ist; deren Magnetgewicht liegt mit etwa 2,5 Gramm deutlich unter den durchschnittlich etwa 14 g der 3,5" HDDs. Trotz des zunehmenden Erfolgs und Marktanteils von Solid State Festplatten, die keine Permanentmagnete enthalten, prognostiziert Coughlin [14] bis 2019 eine Zunahme der HDD Produktion auf 800 Millionen HDDs. Für ein mögliches Recycling in Deutschland sind diese globalen Zahlen natürlich nicht relevant. Laut Gartner [18-21] wurden in Deutschland 2013 gerundet zehn Millionen (2012: 12 Millionen) Desktops und Notebooks verkauft. Dies entspricht etwa zehn Tonnen bzw. 11 Tonnen enthaltenem Nd in den HDDs. Daraus wird abgeleitet, dass bei einer (geschätzten) durchschnittlichen Nutzungsdauer eines PCs, Notebooks bzw. der darin enthaltenen HDD, die in diesem Jahr gekauften Geräte ab etwa 2024 für ein Recycling verfügbar sind. Nachdem in der Vergangenheit weniger PCs und Notebooks gekauft wurden, die HDD-Magnete aber etwas größer waren, soll die Annahme gelten, dass schon ab heute jedes Jahr etwa 10 Tonnen Nd Recyclingpotential aus HDDs in Deutschland besteht. Bei dieser Einschätzung sind die Herausforderungen der Rücknahmelogistik und eventuelle Verluste im Recyclingprozess nicht berücksichtigt.

### 3.2. Mobiltelefone

Die Analyse des Neodymanteils in Mobiltelefonen erfolgte analog zu den Arbeitsschritten bei den HDDs. Es wurden Mobiltelefone gesammelt, zerlegt und die durchschnittlichen Magnetgewichte der Lautsprecher, Vibrationsmotoren und der (meist mitgelieferten) Kopfhörer ermittelt und eine Stichprobe mittels EDX untersucht. Das durchschnittliche Gesamt-Magnetgewicht eines Mobiltelefon-Sets betrug 1,1 g mit durchschnittlichen Anteilen von 26 Prozent Nd und 5 Prozent Pr (Praseodym). Mit der Annahme von 0,4 g Nd je Set benötigten die 1,6 Mrd. Mobiltelefone, die 2010 produziert wurden, 450 Tonnen Nd ([52], S. 86-91). Die Zahl der weltweit produzierten Mobiltelefone stieg 2012 auf 1,75 Mrd. und 2013 auf 1,8 Mrd. Stück [22]. Mit denselben Annahmen von 0,4 g Nd je Mobiltelefon wurden folglich 700 Tonnen bzw. 720 Tonnen Nd verbaut. Der Anteil der in Deutschland verfügbaren Handys, die für ein Recycling in Frage kommen beziffert das Marktforschungsinstitut BITKOM 2012 mit 85,5 Millionen und 2013 schon mit 105,9 Millionen ausgedienten Mobiltelefonen [8]. Der Absatz von Mobiltelefonen betrug 2012 knapp über 32 Millionen Geräte und 2013 annähernd 35 Millionen Geräte [43]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass mehr Mobiltelefone in die Nutzung gingen als Alte ausgedient wurden, das künftige Recyclingpotential also noch leicht steigen wird. Für ein Recycling stehen Ende 2013 theoretisch 106 Millionen Mobiltelefone zur Verfügung, die bei 0,4 g Nd pro Handy einer Gesamtmenge von etwa 42 Tonnen Nd entsprechen. Jedes Jahr sammelt sich eine Menge an Altgeräten an, die knapp der Zahl der Neuverkäufe entspricht. Jährlich kommen also etwa dreißig Millionen Altgeräte hinzu mit einem Potential von weiteren 12 Tonnen Nd. Bei dieser Theorie werden techno-ökonomische Aspekte nicht berücksichtigt.

### 3.3. Windenergie

Die Aussage diverser Studien, Berichte und Schlagzeilen, dass die SEE in Windrädern benötigt werden, oder gar dass die SEE für die Herstellung von Windenergieanlagen (WEA) unabdingbar sind, ist nur teilweise zutreffend. Die Fakten sind in der Fachbranche hinlänglich bekannt (z.B. [53]). Im Prinzip können 3 grundsätzliche WEA-Systeme unterschieden werden:

1. Die klassische asynchron-Technologie mit einem Getriebe im Antriebsstrang, die keine wesentlichen permanenterregten Komponenten benötigt.
2. Die Direct-Drive Systeme (DD), die einen Magneten für die Übertragung der mechanischen in elektrische Energie nutzen. Diese Magnete können entweder als elektrisch erregte Systeme (z.B. die Windräder der Fa. ENERCON) oder als Permanentmagnetsysteme (Permanent Magnet Generator PMG) auf Basis von NdFeB-Magneten aufgebaut sein (z.B. die Windräder von Vensys und deren Lizenzsysteme der chinesischen Goldwind [50]). Hier wird ein Anteil von etwa 165 kg Nd je MW installierter Leistung angenommen ([52], S. 95ff).
3. Ein Hybrid-System, das beide genannten Systeme kombiniert. Hier werden alle beteiligten Komponenten in kleinerem Maßstab benötigt. Ein Beispiel für diese Technologie ist das Areva Multibrid M5000 ([3], S. 4-6). Von diesem Typ stehen bislang 126 WEA in den Windparks alpha ventus (2009), Trianel Windpark Borkum (2014) und Global Tech I (2014) ([3], S. 10; [4, 5]). Für diese Technologie gibt Constantinides ein Magnetgewicht von 200kg/MW ([12], Folie 29), also 60 kg Nd an.

Die Bestimmung der WEA, die tatsächlich SEE-basierte Magnete haben (sog. Direct Drive Permanent Magnet Generator – DD PMG), erfolgte mittels einer klassischen Literaturrecherche anhand von überwiegend Jahresberichten namhafter Hersteller, Produktdatenblätter und Fachartikel. Die Ergebnisse waren zunächst erstaunlich, denn der Anteil der DD PMG am Gesamtmarkt ist relativ gering. Bei einem Zubau im Jahr 2010 von 40 GW weltweit – auf eine insgesamt installierte Windleistung von knapp 200 GW – betrug die Leistung der in 2010 produzierten DD PMG Anlagen 4,2 GW, was einem Anteil von etwa 11 Prozent der zugebauten Leistung entspricht. Dominant in diesem Sektor waren 2010 die beiden chinesischen Firmen Goldwind mit 3.850 MW (2.567 WEA) und XEMC mit 355 MW installierter Leistung, was 800 t Nd entspricht. Westliche Firmen hatten diesen WEA-Typ zwar im Angebot, aber meist nur wenige Prototypen oder wenige erste Serienanlagen errichtet. Drei Jahre später, 2013, produzierten die beiden chinesischen Firmen 3.750 MW und 1.052 MW respektive ([26], S. 42), wofür diese beiden Firmen alleine für 800 Tonnen Nd Bedarf zeichnen, und weitere 200 Tonnen auf andere Hersteller entfallen.

Der globale Anteil der klassischen Technologie beträgt Ende 2013 etwa 82 Prozent (Smith 2014). Bei einer weltweit insgesamt installierten Windleistung von gerundet 320 GW, sind das knapp 262 GW [27]. Die restlichen 18 Prozent (etwa 58 GW) teilen sich auf die Direktantriebs- bzw. Hybridsysteme auf. Um hier noch die tatsächlich auf SEE-basierten Systeme zu bestimmen, müssen von den DD-Systemen die elektrisch erregten Magnetsysteme abgezogen werden. Dies sind im Prinzip alle Windräder

der Fa. ENERCON, deren globaler Marktanteil nach Angaben des BTM Consult bei 9,8 Prozent liegt [17]. Folglich liegt der Anteil der SEE-basierten Systeme weltweit bei etwa 8 Prozent oder 26 GW. In der Annahme des durchschnittlichen Neodymbedarfs von 165 kg je MW installierter Leistung ([52], S. 96), sind demnach 4.290 Tonnen Neodym weltweit in WEA verbaut. Die tatsächlichen Mengen an eingesetztem Neodym, Praseodym und eventuell Dysprosium in diesen WEAs sind jedoch unbekannt.

Für die Bewertung des Recyclingpotentials der in den WEA enthaltenen SEEs ist sowohl eine zeitliche als auch räumliche Betrachtung notwendig: die ersten DD PMG Anlagen wurden etwa 2007 aufgestellt, abgesehen von wenigen Versuchsträgern die schon früher in Betrieb gingen. Bei der durchschnittlichen Lebensdauererwartung von zwanzig Jahren, stehen die ersten WEAs also ab etwa 2027 für ein Recycling zur Verfügung. Die meisten der 2007 errichteten WEA sind von den chinesischen Firmen Goldwind und XEMC in China aufgestellt worden und stehen somit für ein Recycling in Deutschland nicht zur Verfügung. Von den 26 GW auf DD PMG Basis entfallen 23 GW auf die beiden chinesischen Firmen Goldwind und XEMC, so dass sich die verbleibenden 3 GW auf die anderen Hersteller verteilen, die für ein SEE-Recycling außerhalb Chinas ab etwa 2030 verfügbar sein werden. Dies entspricht aufgrund der bisherigen Annahmen etwa 500 Tonnen Neodym, von dem ein Teil sicher in Deutschland verfügbar sein wird. Der genaue Anteil ist jedoch unbekannt. Es wird deutlich, dass das Recyclingpotential von SEE aus WEA in Deutschland für mehrere Jahre nicht vorhanden ist. Nachdem die ersten DD PMG Anlagen in Deutschland etwa 2005 aufgestellt wurden, werden diese nach einer geschätzten Betriebsdauer von zwanzig Jahren ab etwa 2025 für ein Recycling verfügbar sein.

Der Trend geht bei der WEA-Klasse über 3,6 MW verstärkt in DD PMG und Hybrid-Systeme [51]; während die niedrigeren Leistungsklassen überwiegend bei der klassischen Getriebe-Technologie bleiben werden ([10], S. 135-188). Der Anteil der SEE-basierten WEAs wird künftig also steigen [4, 5], dennoch bleiben Zweifel daran, ob sich diese Technologie als Hauptsystem durchsetzen wird [41]. Zudem ist zu erwarten, dass durch optimierte Produktionsprozesse der Materialbedarf auch für die Permanentmagnete in diesem Anwendungsgebiet geringer wird [24] oder neue Technologien auf Basis supraleitender Materialien [2] den Materialeinsatz bei den WEA diversifizieren.

### 3.4. E-Mobilität

Die Recherche über die E-Mobilität, hier die die Hybrid- und reinen Elektro-PKW, stellte sich als sehr schwierig heraus, da wiederum nur wenig zuverlässige Daten über die Magnetgewichte in den Antriebsmotoren verfügbar waren und sind. Zudem ließen sich Verkaufszahlen von Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen nur für die USA und Deutschland zuverlässig ermitteln. Die Daten über die Magnetgewichte schwanken in den Ausführungen einer kooperativen Studie des Öko Instituts, Daimler, TU Clausthal und Umicore [39] und den Firmenangaben von Toyota zwischen knapp 1 kg und 2,3 kg, wobei dem Toyota Prius ein Magnetgewicht von 1,3 kg zugesprochen wird ([25], S. 831). In einem White Paper pro Kupfer-basierten Motoren spricht Goodrich bei einem Toyota Prius von 2,2 kg [23]. Nach Constantinides ([12], S. 23) kann ein durchschnittliches

Magnetgewicht von 2,4 kg je Elektrofahrzeug interpoliert werden. Die globale Automobilproduktion betrug 2013 etwa 65 Millionen PKW [44], während der Hybridmarkt mit 2,7 Millionen Fahrzeugen für 2014 [36] und 2020 mit 3,8 Millionen Fahrzeugen prognostiziert wird [34]. Genauere Zahlen für 2013 sind wie folgt: in Deutschland wurden etwa 32.500 E- und Hybridfahrzeuge zugelassen [28, 29], den USA waren es rund 600.000 Fahrzeuge [16], in China 17.600 [11] und in Japan alleine 680.000 Toyota Hybride [45]. In der Annahme, dass der globale Markt 2013 etwa 2 Millionen Hybridfahrzeuge betrug und das durchschnittliche Magnetgewicht bei 2,4 kg liegt – was als Durchschnittswert vermutlich zu hoch gegriffen ist – ergibt sich ein globaler Bedarf von  $(2,4\text{kg} * 30 \text{ Prozent Nd} * 2 \text{ Millionen Fahrzeuge}) = 1.440 \text{ Tonnen Nd (2013)}$ .

Für ein mögliches Recycling in Deutschland ist das Volumen theoretisch eindeutiger zu bestimmen, da die Verkaufszahlen bekannt sind. Allerdings ist nicht bekannt, ob diese Fahrzeuge nach einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 14 bis 15 Jahren ([47], S. 16 u. 21) auch tatsächlich in Deutschland für ein Recycling zur Verfügung stehen, oder ob manche Fahrzeuge für eine weitere Nutzung exportiert werden. Das UBA berichtet für 2010, dass von 2,9 Millionen gelöschten PKW lediglich 0,55 Millionen Altfahrzeuge verwertet wurden. 1,08 Millionen Fahrzeuge wurden exportiert und die verbleibenden 1,26 Millionen PKW gelten als nicht zugeordnet, nicht erfasster Export, Diebstahl und Nutzung auf nicht-öffentlichem Gelände ([46], Folie 6). Ab 2005 wurden erstmals mit knapp 4.000 PKW erwähnenswerte Mengen an E-Fahrzeugen zugelassen, die ab etwa 2020 für eine Verwertung verfügbar sind. Bei einem angenommenen Magnetgewicht von 2,4 kg ergibt sich ein erster möglicher Sekundärertrag von  $(2,4 * 30 \% * 4.000 \text{ PKW}) = 2.880 \text{ kg}$ . Insgesamt liegt der E-Fahrzeugbestand in Deutschland am 1. Januar 2014 bei knapp 100.000 PKW [29], in dem mit derselben Annahme insgesamt 72 Tonnen Nd enthalten sind. Sollten ab 2015 jährlich 50.000 E- und Hybride in Deutschland in Betrieb gehen, dann resultiert unter den genannten Annahmen ab 2030 ein Recyclingpotential von 36 Tonnen Nd jährlich.

### 3.5. Elektrofahrräder

Die Elektrofahrräder und Pedelecs, hier der Einfachheit halber E-Bike genannt, erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. 2013 sind etwa 30 Millionen E-Bikes weltweit verkauft worden mit einer Prognose, dass der Verkauf bis zum Jahr 2023 auf 40 Millionen Räder steigen wird [36]. In Deutschland wurden 2013 insgesamt 410.000 E-Bikes verkauft, so dass sich bis Ende 2013 der Gesamtbestand auf 1,6 Millionen E-Bikes beläuft [54]. Laut Magnews ([32], S. 24) sind in E-Bikes (2007) im Schnitt 380 g Magnete enthalten. Die Analyse eines defekten aber aktuellen E-Bikes im Rahmen eines studentischen Seminars ergab ein Magnetgewicht von 160 g für den Antriebsmotor (20 Magnetplättchen zu je 8 g). Die anschließende EDX-Analyse<sup>2</sup> ergab einen Nd-Anteil von 25 Prozent, so dass insgesamt 40 g Nd in diesem Antriebssystem enthalten sind. Diese Messung wird fortan für die Berechnung genutzt. Somit beträgt das Nd-Gewicht der 410.000 in Deutschland verkauften Räder 16,4 Tonnen Nd. Die weltweit verkauften 30 Millionen E-Bikes benötigten demnach 1.200 Tonnen Nd. Wann nun die Räder in Deutschland für ein Recycling zur Verfügung stehen, ist kaum abzuschätzen. Nachdem die E-Bikes

<sup>2</sup> EDX – Energy Dispersive X-Ray



eine hohe Anfangsinvestition erfordern, kann davon ausgegangen werden, dass diese Räder mehrere Jahre gefahren werden. Zudem ist ein späteres Refurbishing denkbar. Die Nutzungsdauer kann somit weit über zehn Jahre betragen. Die Massenproduktion von E-Bikes begann etwa ab dem Jahr 2005 und stellt mit der erwarteten steigenden Nachfrage einen recht neuen und beachtlichen Bedarf an Nd dar. In Deutschland wurden 2010 schon 200.000 E-Bikes verkauft, 2011 waren es 330.000 und 2012 etwa 380.000 Räder ([9], S. 15). Bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren ergibt sich ein theoretisches Potential von 8 Tonnen Nd ab frühestens 2020; 13 Tonnen Nd in 2021; 15,2 Tonnen Nd in 2022 und 16,4 Tonnen Nd in 2023.

### 3.6. Zusammenfassung: Globaler Neodym-Bedarf der Bereiche HDDs, Mobiltelefone, Windräder, E-Mobilität und E-Bike

Die Hauptaussage dieser ursprünglichen Analyse ist es, dass die gestellte Hypothese völlig falsifiziert wurde. Die vier Anwendungsbereiche HDDs, Mobiltelefone, Windenergie und Elektromobilität beanspruchen nicht 80 Prozent des globalen Nd-Angebotes, sondern nur annähernd 20 Prozent; inkl. der E-Bikes sind es 25 Prozent (2010) bzw. 33 Prozent in 2013. Das quantitative Recyclingpotential dieser vier (fünf) Bereiche ist zudem in der zeitlichen Achse heute noch sehr begrenzt und wird sich diesbezüglich erst ab etwa 2030 signifikant vergrößern.

Tabelle 1: Globaler Neodym-Bedarf der Bereiche HDDs, Mobiltelefone, Windräder, E-Mobilität und E-Bike

Bedarf an Nd	2010 <sup>1</sup>	2013
	t	
HDDs	1.818	1.400
Mobiltelefone	450	720
Windräder	804	1.000
E-Antriebsmotoren	250	1.440
E-Bike	1.240 <sup>4</sup>	1.200
Summe (Anteil an Jahresproduktion)	4.562 (~24 %)	5.760 (~34 %)
<b>Jahresproduktion Nd<sup>2</sup></b>	<b>18.800<sup>5</sup></b>	<b>17.000<sup>3</sup></b>
Differenz (Anteil an Jahresproduktion)	14.238 (~75 %)	11.240 (~66 %)

Quellen und Bemerkungen:

- 1: Zepf, V. Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use. Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. springer; Berlin, Heidelberg; 2013, S. 116
- 2: USGS MCS REE 2013
- 3: korrigiert auf metallisches Gewicht
- 4: Zepf, V. Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use. Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. springer; Berlin, Heidelberg; 2013, S. 107: verändert auf 40 g Nd/E-Bike

### 3.7. Recyclingpotential von Nd aus Permanentmagneten in Deutschland

Nachdem ab dem Jahr 2000 mehr als 90.000 Tonnen SEO und ab 2004 mehr als 100.00 Tonnen SEO gefördert wurden, müssen folglich jedes Jahr mehr als 14.000 Tonnen bzw. 15.000 Tonnen reines Nd in die Produktion gegangen sein – oder auf Halde



gelegt worden sein, was aus ökonomischer Sicht unwahrscheinlich ist. Diese Produkte könnten schon heute für ein Recycling verfügbar sein. Hierzu einige Beispiele, die jedoch zeigen, dass dieses Thema nach wie vor sehr intransparent und inhomogen ist.

Tabelle 2: Recyclingpotential von Neodym aus Permanentmagneten in Deutschland

	Ab 2014	Ab 2015	Ab 2020*	Ab 2030*
HDDs	10 t jährlich			
Mobiltelefone	42 t einmalig (106 Mio. Handys)	12 t jährlich („neue“ Altgeräte)	→	→
WEA	--	--	--	500 t jährlich (Tendenz vermutlich steigend)
e-Mobilität	--	--	3 t	72 t einmalig, dann 36 t jährlich (wenn nicht exportiert)
E-Bikes	--	--	8 t jährlich (Tendenz steigend: 2023: 16,4 t jährlich)	→

-- Kein oder geringes Potential

## 4. Weiteres Potential

### 4.1. Magnetresonanztomographen

Im Zusammenhang mit medizinischen Applikationen werden u.a. oft die Magnetresonanztomographen (MRT; engl. Magnetic Resonance Imaging (MRI)) genannt, die SEE, allen voran Neodym enthalten (z.B. [30], S. 248f). Lucas et al. thematisieren lediglich die theoretische bzw. qualitative Anwendungsebene ohne detaillierte quantitative Daten anzugeben. Hierzu gibt Constantinides ([12], S. 21) als Bedarf für die MRIs 2.490 Tonnen für das Jahr 2010 an. Die Fachberichte und Produktangaben der weltweit führenden Produzenten, Siemens, GE, Philips, Toshiba und Hitachi sprechen jedoch eine andere Sprache – weg von PM-basierten MRTs hin zu supraleitenden Systemen. Meist werden vier MRT Leistungsklassen unterschieden: Low Field (Niederfeld) Tomographen mit einer Feldstärke von <0,5 Tesla; Mid Field Systeme 0,5 – 1,0 Tesla; High-Field 1,5 Tesla; Very High Field bis 7 Tesla und darüber (z.B. [31]). Aufgrund der erforderlichen Feldstärken und der damit verbundenen Größe der Magneten, können und werden PM-basierte MRTs nur in den Low Field Tomographen bis etwa 0,35 Tesla eingesetzt. Alle stärkeren Systeme nutzen überwiegend supraleitende Materialien auf NbTi-Basis. Cosmos & Parizh [13] geben deren globalen Bestand mit 26.500 Geräten im Jahr 2008 an. Die Jahresproduktion von Low Field Systemen im Jahr 2000 beziffern sie mit 600 Einheiten und dass ab 2005 diese Produktion nahezu komplett eingestellt wurde ([13], 1f).

Bei einer Jahresproduktion von 2.000 Geräten [33] oder 3.500 Geräten (Global Industry Analysts 2008, in: Magnetica 2011 [31]), sind sich die Experten einig, dass die High und Very High Field Systeme den Markt dominieren und die PM-basierten Systeme nur noch Nischen bedienen.

Über die Anzahl von MRTs in Deutschland gibt es keine genauen Zahlen. Die BARMER GEK schätzt in ihrem Arztreport 2011 einen Bestand in Deutschlands Krankenhäusern von 703 MRT (2008). Der Bericht kommt zum Schluss, dass der Anteil der ambulanten Geräte wesentlich höher sein muss, da vier Mal mehr ambulante als stationäre MRT Untersuchungen abgerechnet wurden ([6], S. 192f). So versteht sich das Statement der BARMER GEK, dass es 2009 etwa 1.850 MRT in Deutschland gab ([7], S. 13). Aus den Zahlen des OECD Berichts 2013 lässt sich für Deutschland im Jahr 2011 ein Bestand von etwa 900 MRTs in Krankenhäusern ableiten ([38], S. 87), so dass der heutige Bestand an MRTs in Deutschland bei etwa 2.000 Einheiten liegen kann. Unklar ist nach wie vor, welche Geräte hiervon Low Field Systeme sind, die SEE-PM nutzen und theoretisch für ein späteres Recycling in Frage kommen. Es stellt sich zudem die Frage, ob solche Systeme überhaupt in Deutschland ausgesondert werden und für ein Recycling zur Verfügung stehen (werden). Der sich entwickelnde Gesundheitssektor in Schwellen- und Entwicklungsländern könnte ein Abnehmer für die hier ausgedienten Geräte sein und diese MRT somit einem Recycling in Deutschland entziehen.

## 4.2. Haushaltskleingeräte

Im Seminar wurden zudem nicht mehr genutzte oder defekte Geräte wie Staubsauger, elektrische Zahnbürsten, Akkuschauber, Stellmotoren von PKW-Außenspiegeln, (aktuelle) Rasierapparate, (aktuelle) PC-Lüfter diverser Hersteller und Größen, Stereo-Anlagen, Lautsprecher, Laser, solarbetriebene und mechanische Taschenlampen zerlegt und untersucht. In den meisten Fällen, auch bei den neueren Produkten, wurden in den Elektromotoren Ferrit-Dauermagnete mit einem typischen Anteil von etwa 88 Prozent Fe und 10 Prozent Sr ermittelt. Weitere Untersuchungen von Spülmaschinen- und Heizungspumpen sind noch nicht vollständig ausgewertet, doch auch hier liegt der Verdacht nahe, dass in den meisten Geräten Ferrite verbaut wurden. Folglich ist der Schluss zu ziehen, dass in vielen Elektromotoren in Haushaltskleingeräten keine SEE-haltigen Magnete verbaut sind. Stückzahlen der Antriebstechnik in Deutschland sind nicht bekannt, lediglich der monetäre Wert des Produktionsvolumens der elektrischen Antriebstechniken in Höhe von 10,5 Mrd. Euro (2013). Davon entfallen 3,3 Mrd. Euro auf Industriemotoren, meist IE2 und höher; 2,5 Mrd. auf Umrichter; 2,1 Mrd. Euro Kleinmotoren meist für den Bereich Automotive sowie 2,6 Mrd. Euro auf Hochspannungs-, Gleichstrom- und sonstige Motoren [55]. Es ist nicht bekannt, welche dieser Motoren auf SEE basieren, möglicherweise handelt es sich um wenige Einzelprodukte oder bestimmte Produktreihen.

## 4.3. Weitere Anwendungsgebiete

Wahrscheinliche und teilweise bestätigte Anwendungsgebiete für PM-basierte Systeme sind die Antriebsmotoren mancher Hochgeschwindigkeitszüge, z.B. des AGV von Alstom ([1], S. 1). Die Anzahl dieser Züge, die weltweit im Einsatz sind, beläuft sich auf einige hundert oder wenige Tausend, und hat in der Konsequenz einen kleinen Anteil am Magnetmarkt. Die aktuelle Aufzugs- und Fahrtreppentechnik ist ein Anwendungsfeld, in dem zunehmend Permanentmagnete in Aufzügen und Fahrtreppen

eingesetzt werden. Der Bestand an Aufzügen in Deutschland Ende 2010 wird mit 680.000 Anlagen und 30.000 Fahrtreppen vom VDM angegeben [49]. Der Branchenreport der Dresdner Bank (2007) beziffert den globalen Markt mit 7 Millionen installierten Anlagen bei einer jährlichen Produktionsmenge von 250.000 Anlagen; davon wird die Hälfte in Asien installiert ([15], S. 18). Aber auch hier gilt, dass nicht alle Aufzüge und Treppen mit SEE-basierten Permanentmagneten ausgerüstet sind. In Bezug auf ein mögliches Recycling in Deutschland stehen wieder die durchschnittliche Lebensdauer und die Anzahl der ausgesonderten Anlagen im Fokus. In der Produktreihe Heizungspumpen zeigt sich systemisch ein ähnliches Bild: namhafte Hersteller werben mit permanentmagnet-basierten Systemen, ohne dass daraus abgeleitet werden kann, dass alle Heizungspumpen diese Technik haben. Genauere Analysen über die Betriebsdauer und den EoL-Verbleib laufen gegenwärtig.

## 5. Fazit

Nach diesen weiteren Untersuchungen bleibt die drängende Frage, in welchen Produkten nun die restlichen 80 Prozent – 66 Prozent Nd verbaut sind? Und, welcher Anteil davon in Deutschland eventuell schon jetzt für ein Recycling zur Verfügung steht? Diese Frage konnte mit den wenigen finanziellen und materiellen Mitteln nicht beantwortet werden, wenngleich einige Sektoren quasi ausgeschlossen werden konnten (MRT), andere als Kandidaten identifiziert wurden (Aufzüge, Pumpen, Schiffsantriebe). Es bedarf also weiterer Forschung. Wünschenswert sind auch nachprüfbare Daten über die Förderung und Raffination der SEE insgesamt und der einzelnen Elemente an sich. Prognosen, Abschätzungen und Hochrechnungen über den Bedarf und den Verbrauch von SEE gehören auf den Prüfstand. Faktisch müssen die Produkte identifiziert werden, in denen tatsächlich Nd-basierte Permanentmagnete verbaut sind und wo diese Produkte in die Nutzung gebracht werden. In einem Industrieland werden viele Rohstoffe quasi veredelt und dann weiter exportiert, so dass nur ein geringer Anteil in Deutschland selber verbleibt. Diese Sachverhalte scheinen bislang nicht umfassend erforscht worden zu sein, gleichwohl beschäftigen sich aktuell viele Forschungsprojekte mit Recyclingverfahren, reduziertem Materialeinsatz bis hin zur völligen Substitution von SEE. Dies, obwohl möglicherweise gar kein SEE-Engpass vorliegt. All diese Maßnahmen, im Prinzip weg von den SEE, tragen gegenwärtig mit dazu bei, dass sich die Nachfrage nach SEE abschwächt, was einen unerwarteten Preisverfall zur Folge hat. Als Konsequenz haben die neuen Produzenten um ihr Bestehen am Markt zu kämpfen. Dies ist durchaus kritisch zu sehen, denn die Reserven der SEE sind beachtlich und geben keinerlei Anlass zu Panik. Im Gegenteil sollten das große Polster an Reserven die notwendigen Maßnahmen für eine ökologisch und sozio-ethisch akzeptable Extraktion und SEE-Produktion fördern. Möglicherweise würden durch neue Verfahrenstechniken und der Notwendigkeit der kostspieligen Entsorgung von chemischen und radioaktiven Abfällen die Preise für die SEE steigen, was in Anbetracht der Alternativen bzw. unter Berücksichtigung von bislang teilweise externalisierten Kosten, durchaus gerechtfertigt wäre. Ohne damit eine weitere Preishysterie gut zu heißen.

Dem tatsächlichen Aufwand entsprechende Kosten für die SEE würden sicher auch einem Recycling ökonomisch entgegen kommen. Aus heutiger Sicht ist ein Recycling von SEE wohl nur aus basalen Kreislaufwirtschaftsinteressen und aus generellem Suffizienzbestreben realistisch. Allein die bislang unbekanntenen Produktpotentiale könnten ein Argument pro Recycling schon heute sein.

## 6. Quellen

- [1] Alstom: AGV. Product Sheet. <http://www.alstom.com/transport> (16.12.2014).
- [2] AMSC: HTS Generator Solutions. Brochure HTSGen\_Bro\_0312. <http://www.amsc.com/documents/hts-generator-solutions-brochure/> (16.12.2014).
- [3] Areva: Offshore Windpower M5000. Typbroschüre. Bremerhaven, 12 S. [http://de.areva.com/mediatheque/liblocal/docs/Sites\\_Pays/Germany/PDF/Wind/AREVAwind\\_M5000\\_de.pdf](http://de.areva.com/mediatheque/liblocal/docs/Sites_Pays/Germany/PDF/Wind/AREVAwind_M5000_de.pdf) (16.12.2014).
- [4] Areva: Offshore-Wind: Erfolgreiche Anlageninstallation im Trianel Windpark Borkum. Pressemitteilung vom 05.06.2014.
- [5] Areva: Offshore-Wind: Erfolgreiche Errichtung von 80 Windenergieanlagen in Global Tech I. Pressemitteilung vom 29.08.2014.
- [6] BARMER GEK (Hrsg.): BARMER GEK Arztreport 2011. Schwerpunkt: Bildgebende Diagnostik. Schwäbisch Gmünd, 2011, 287 S.
- [7] BARMER GEK(Hrsg.): BARMER GEK Arztreport 2011. Pressekonferenz, Berlin, 1. Februar 2011. 33 S.
- [8] BITKOM: Erstmals mehr als 100 Millionen Alt-Handys zu Hause. Presseinformation vom 22. Januar 2014.
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Radverkehr in Deutschland. Zahlen, Daten, Fakten. Berlin, 2014, 43 S.
- [10] BWE: Jahrbuch Windenergie 2014. BWE Marktübersicht, 24. Aufl., Berlin, 2014, 228 S.
- [11] ChinaAutoWeb: Plug-in EV Sales in China Rose 37,9% to 17.600 in 2013. <http://chinaautoweb.com/2014/01/plug-in-ev-sales-in-china-rose-37-9-to-17600-in-2013/> (16.12.2014).
- [12] Constantinides, S.: The Demand for Rare Earth Magnets in Permanent Magnets. Arnold Magnetic Technologies. Presentation slides. <http://www.arnoldmagnetics.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=5932> 2012, (16.12.2014).
- [13] Cosmos, T. C.; Parizh M.: Advances in Whole-Bods MRI Magnets. Published version in: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 21, Issue 3, 2010, 2104-2109 (2011).
- [14] Coughlin, T.: HDD Decline Expected To Slow and Reverse. In: Forbes Online. <http://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2014/02/10/hdd-decline-expected-to-slow-and-reverse/> (16.12.2014).
- [15] Dispan, J.: Aufzüge und Fahrtreppen. Branchenstudie 2007 des IMU-Instituts. 2007, 82 S.
- [16] Eisenstein, P. A.: Sales of Plug-Based Vehicles Doubled in 2013. <http://www.thedetroitbureau.com/2014/01/sales-of-plug-based-vehicles-doubled-in-2013/> (16.12.2014).
- [17] ENERCON: Marktanteile. <http://www.enercon.de/de-de/marktanteile.htm> (16.12.2014).
- [18] Gartner (2013a): Gartner Says PC Market in Western Europe Declined 20.5 Percent in First Quarter of 2013. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2484815> (16.12.2014).
- [19] Gartner (2013b): Gartner Says PC Market in Western Europe Declined 20 Percent in Second Quarter of 2013. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2570220> (16.12.2014).

- [20] Gartner (2013c): Gartner Says PC Market in Western Europe Declined 12.8 Percent in Third Quarter of 2013. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2619515> (16.12.2014).
- [21] Gartner (2014a): Gartner Says PC Market in Western Europe Declined 4 Percent in Fourth Quarter of 2013. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2662915> (16.12.2014).
- [22] Gartner (2014b): Gartner Says Annual Smartphone Sales Surpassed Sales of Feature Phones for the First Time in 2013. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2665715> (16.12.2014).
- [23] Goodrich, A. C. (o. J., vermutlich 2008): Competitive Benchmarking Analysis: Hybrid Vehicle Traction Motors. Waltham, 10 S.
- [24] Gross, D.; McIvor, A.: The Giant Wind Gamble. In: Cleantech magazine 2011, Issue 3. <http://www.cleantechinvestor.com/portal/wind-energy/9552-the-giant-wind-gamble.html> 2011, (16.12.2014).
- [25] Gutfleisch, O.; Willard, M. A.; Brück, E.; Chen, C. H.; Sankar, S. G.; Liu, J. P.: Magnetic Materials and Devices for the 21<sup>st</sup> Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. In: Advanced Materials, 2011, 23, 821-842. Doi: 10.1002/adma.201002180, 2011
- [26] GWEC: Global Statistics: Global installed wind power capacity – regional distribution. [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/5\\_17-1\\_global-installed-wind-power-capacity\\_regional-distribution.jpg](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/5_17-1_global-installed-wind-power-capacity_regional-distribution.jpg) (16.12.2014)..
- [27] GWEC: Global Wind Report. Annual Market Update 2013. Brüssel, 2014, 78 S.
- [28] KBA: Fahrzeugzulassungen im Dezember 2013. Pressemitteilung Nr. 02/2014.
- [29] KBA: Pressemitteilung Nr. 10/2014 - Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2014.
- [30] Lucas, J.; Lucas, P.; Le Mercier, T.; Rollat, A.; Davenport, W.: Rare Earths. Science, Technology, Production and Use. Elsevier, Amsterdam et al., 370 p. plus color scheme annex. 2015
- [31] Magnetica: Today's MRI Market. <http://www.magnetica.com/page/innovation/todays-mri-market/> (16.12.2014).
- [32] Magnews: 25 years of the NdFeB Magnet Industry. In: Magnews, Autumn 2008, 22-26.
- [33] Marketsandmarkets: Advances in Magnetic Resonance Imaging (MRI) Market (2013-2018). Berichtsankündigung. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/MRI-advanced-technologies-and-global-market-99.html>, 2013, (17.12.2014).
- [34] Martin, R: Worldwide Electric Vehicle Sales to Reach 3.8 Million Annually by 2020. <http://www.navigantresearch.com/newsroom/worldwide-electric-vehicle-sales-to-reach-3-8-million-annually-by-2020>, 2013 (16.12.2014).
- [35] McCallum, W. R.: Replacing critical rare earth materials in high energy density magnets. [http://www.magneticsmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2013/01/AmesDOE\\_McCallum.pdf](http://www.magneticsmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2013/01/AmesDOE_McCallum.pdf), 2013
- [36] Navigant Research: Executive Summary: Electric Bicycles. Boulder, 2013, 14 p.
- [37] NavigantResearch: Electric Vehicle Market Forecast. Press Release, 4Q, 2014. <http://www.navigantresearch.com/research/electric-vehicle-market-forecasts>, 2013 (16.12.2014).
- [38] OECD: Health at a Glance 2013: OECD Indicators, OECD Publishing. [http://dx.doi.org/10.1787/health\\_glance-2013-en](http://dx.doi.org/10.1787/health_glance-2013-en).
- [39] Öko Institut, Daimler, TU Clausthal, Umicore: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Darmstadt, 2011, 122 S.
- [40] Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Darmstadt, 2011, 140 p.
- [41] Smith P.: Questions of the Week: Will permanent magnet generators replace DFIG? In: Wind-power monthly, 6. Oct. 2014. <http://www.windpowermonthly.com/article/1315794/question-week-will-permanent-magnet-generators-replace-dfig> (16.12.2014).

- [42] Statista: Global shipments of hard disk drives (HDD) from 4th quarter 2010 to 3rd quarter 2014 (in millions). Free statistical information. <http://www.statista.com/statistics/275336/global-shipment-figures-for-hard-disk-drives-from-4th-quarter-2010/> (17.12.2014).
- [43] Statista: Absatz von Mobiltelefonen in Deutschland von 2008 bis 2014. Infografik. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/77630/umfrage/absatz-von-mobiltelefonen-in-deutschland-seit-2008/> (16.12.2014).
- [44] Statista: Worldwide Automobile Production from 2000 to 2013. <http://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/> (16.12.2014).
- [45] Toyota: Worldwide Sales of Toyota Hybrids Top 6 Million Units. <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/worldwide+toyota+hybrid+sales+top+6+million.htm> (16.12.2014).
- [46] UBA: Aktuelles zur Verwertung von Altfahrzeugen. Vortrag von Frau Kohlmeyer in Halle, 13.4.2012. [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/abfall-ressourcen\\_produkterantwortung\\_altfahrzeuge\\_vortrag-ihk.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/abfall-ressourcen_produkterantwortung_altfahrzeuge_vortrag-ihk.pdf) (16.12.2014).
- [47] UBA: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012. Dessau, 2014, 38 S.
- [48] USGS: Mineral Commodity Summaries und Mineral Yearbooks. Rare Earths Elements. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/) 2010 (16.12.2014).
- [49] VDMA. Aufzugbranche im Aufwind. Pressemitteilung vom 17.01.2011. In: [www.technik-einkauf.de/news/vdma-aufzugsbranche-im-aufwind-2011](http://www.technik-einkauf.de/news/vdma-aufzugsbranche-im-aufwind-2011) (16.12.2014).
- [50] Vensys: Vensys Energy AG. Die Alternative. Imagebroschüre. Neunkirchen, 2012, 28 S.
- [51] Windpowermonthly: Turbines of the year – Turbines 3.6MW-plus. By: de Vries E., Buist J., 24. Dec 2013. <http://www.windpowermonthly.com/article/1225350/turbines-year---turbines-36mw-plus> (16.12.2014).
- [52] Zepf, V.. Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use. Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. Springer; Berlin, Heidelberg; 2013, 157 p.
- [53] Zimmermann, T.; Rehberger, M.; Gößling-Reisemann, S.: Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind Energy in Germany. In: Resources 2013, 2, 303-334; doi: 10.3390/resource 2030303. 2013
- [54] ZIV: E-Bikes bescheren der Fahrradindustrie weiterhin gute Umsätze. Pressemitteilung vom 25.03.2014
- [55] ZVEI: Die wirtschaftliche Situation in der elektrischen Antriebstechnik. Pressemitteilung vom 20.11.2013 des Fachverbandes Automation.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe – Band 8**

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015  
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,  
Max Müller, Cordula Müller  
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.