

Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben

Ulrich Bast, Frank Treffer, Christian Thürigen, Tobias Elwert und Frank Marscheider-Weidemann

1.	Einleitung	699
2.	Ausgangssituation	701
3.	Wiederverwertungsstrategien	701
3.1.	Funktionelle Wiederverwendung	702
3.2.	Werkstoffliche Verwertung	702
3.3.	Rohstoffliche Verwertung	703
4.	Demontage	704
5.	Recyclinggerechtes Design	704
6.	Versorgungssicherheit, Ökobewertung und Zweitmärkte	705
7.	Fazit	705
8.	Literatur	706

Ein Konsortium aus Industrie und Forschung entwickelt Recyclinglösungen für Elektromotoren. Schwerpunkt sind dabei die Permanentmagnete mit ihrem hohen Anteil an Seltenerdmetallen, die für Elektro- und Hybridfahrzeuge benötigt werden. Die Umsetzung eines umfassenden Konzepts wird von einem Forschungsverbund aus Siemens, Daimler, Umicore und Vacuumschmelze sowie der Universität Erlangen, der Technischen Universität Clausthal, dem Öko-Institut Darmstadt und dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung verfolgt. In dem vom BMBF geförderten Projekt *MORE (Motor Recycling) – Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben* (Förderkennzeichen: 03X4622) analysieren die Partner unter Federführung von Siemens die Rohstoff- und Technologiesituation, entwickeln Technologien und Prozesse, nehmen Ökoeffizienz- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vor und skizzieren Kreislaufwirtschaftssysteme. Als Ergebnis des Projekts werden Technologien zur Wiederverwendung von Hochleistungsmagnetmaterialien und zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen zur Verfügung stehen.

1. Einleitung

Die Seltenen Erden (SE) und die daraus abgeleiteten Metalle spielen in vielen Hochtechnologiebereichen eine entscheidende Rolle. Als Beispiele seien nur Leuchtstoffe für LEDs und Fluoreszenzlampen, Poliermittel in der optischen Industrie und Anwendungen in

der Laser- und Batterietechnik genannt. Im Bereich von leistungsstarken Dauermagneten, wie sie z.B. in permanenterregten Motoren und Generatoren sowie in Magnetresonanzgeräten zur medizinischen Bildgebung eingesetzt werden, sind Nd, Dy, Tb und Sm von herausragender Bedeutung. Die exzellenten magnetischen Eigenschaften (hohe Werte von Remanenz und Koerzitivfeldstärke) dieser Magnetmaterialien ermöglichen den Bau von leistungsstarken und effizienten Antrieben, wie sie besonders im Bereich der Elektromobilität benötigt werden.

Es steht zu erwarten, dass der Bedarf an Hochleistungsmagnetmaterialien der NdFeB-Familie, in denen die Seltenerdmetalle einen Anteil von etwa 30 % ausmachen, in den nächsten Jahren stark ansteigen wird. Dies liegt einerseits daran, dass mit dem Ausbau der Elektromobilität als wichtigem Bestandteil des Integrierten Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung eine erhebliche Steigerung der Stückzahlen dieser Motoren für Fahrzeuge mit Hybrid- und Elektroantrieb zu erwarten ist. Andererseits benötigen aber auch andere Zukunftsanwendungen, wie z.B. getriebelose Windturbinen, die besonders im Offshore-Einsatz Vorteile bieten, stark zunehmende Mengen an Magnetmaterialien.

Seltene Erden werden wegen der Lagerstättenverteilung als kritische Rohstoffe eingestuft [1, 2]. China besitzt eine marktbeherrschende Stellung bei den Seltenen Erden und den daraus gewonnenen Metallen und hat begonnen, Exportzölle zu erheben und eine restriktive Ausfuhrpolitik zu betreiben. Angesichts der steigenden Nachfrage sind Versorgungsengpässe deshalb nicht auszuschließen, und weitere Preissteigerungen sind für diese Metalle zu erwarten. Dies würde entlang der gesamten Wertschöpfungskette, also für Magnet-Motoren- und Fahrzeughersteller, zu erheblichen Wettbewerbsnachteilen führen. Die Wiederverwendung und -verwertung von E-Motoren und besonders der darin enthaltenen wertvollen Magnetwerkstoffe ist somit eine vordringliche Aufgabe, um den Einsatz von knappen und kostenintensiven Primärrohstoffen zu reduzieren. Allerdings stehen derzeit weder die benötigten industriell anwendbaren Technologien noch eine entsprechende Retrologistik zur Verfügung.

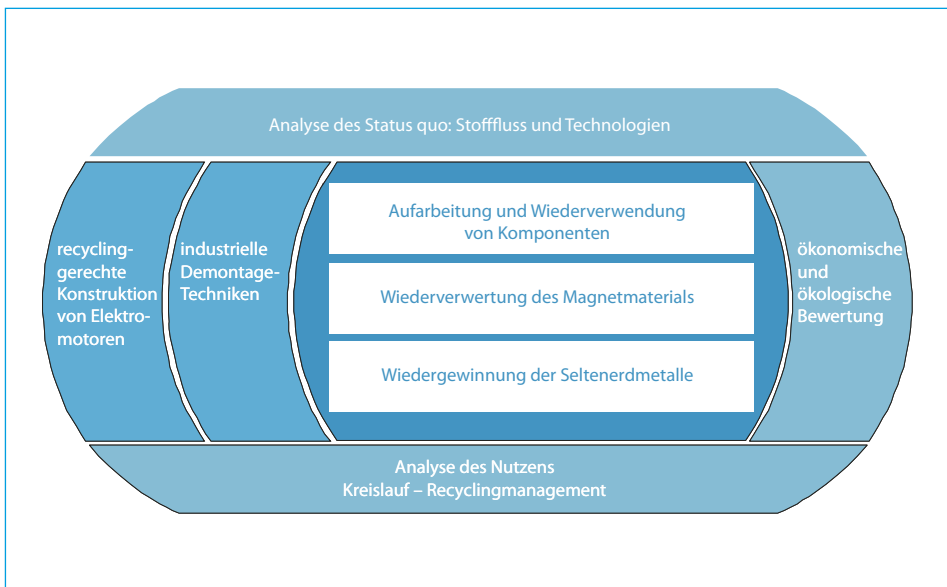


Bild 1: Umfassender Ansatz zum Recycling von Elektromotoren für Fahrerantriebe

Im Folgenden wird eine breit angelegte, interdisziplinäre Herangehensweise zur Entwicklung von Recyclingsystemen vorgestellt. Im Mittelpunkt dieser Entwicklungsarbeiten stehen verschiedene Ansätze, die das gesamte Feld von der Reparatur und Wiederverwendung von Motorkomponenten bis zur stofflichen Wiederverwertung als Sekundärrohstoff abdecken. Die Prämisse liegt dabei auf der Erarbeitung industriell umsetzbarer Lösungen, d.h. wirtschaftlicher und für große Stückzahlen einsetzbarer Prozesse. Die Entwicklung von Motordesigns, die das Recycling unterstützen, und die Mechanisierung der Prozesse sind wichtige Bestandteile des Gesamtansatzes. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit des Konzepts werden ökologische und wirtschaftliche Bewertungen der verschiedenen Prozesse vorgenommen. Zur Vervollständigung und Abrundung werden Modelle für Stoffkreisläufe ausgearbeitet.

2. Ausgangssituation

Die stoffliche Wiederverwertung von SE-haltigen Abfallströmen wurde bisher nur im Bereich Produktionsabfälle erforscht und umgesetzt. So können die Magnethersteller SE-haltige Schneidabfälle und Ausfallmagnete werkstofflich und Schleifschlämme rohstofflich in Produktionsprozesse der Primärrohstoffschiene zurückführen [3, 4]. Dazu werden die Abfälle oxidiert und die Seltenerdmetalle werden nach geeigneter Aufarbeitung durch Schmelzflusselektrolyse oder metallothermische Reduktion aus den Oxiden wiedergewonnen. Diese Technik steht nur in China zur Verfügung.

Technologien zur Aufbereitung von Magnetmaterial mithilfe der Wasserstoffzerlegung und nachfolgender Prozessschritte zur Pulveraufbereitung und Formung neuer Magnete werden untersucht, führten bislang aber nur zu Magnetpulvern und Magneten mit deutlich reduzierten magnetischen Eigenschaften [5, 6].

Einige Untersuchungen, Seltenerdmetalle auch aus Magnetmaterialien, die aus Motoren demontiert wurden, wiederzuverwerten, werden derzeit in Japan durchgeführt [7, 8] und könnten Alternativen zu den in China praktizierten Verfahren bieten. Die dafür verwendeten pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Prozesse setzen aber bereits hoch aufkonzentrierte Magnetwerkstoffe oder Seltenerdfraktionen voraus.

3. Wiederverwertungsstrategien

Je nach Situation und Möglichkeit können verschiedene Ansätze für das Recycling von Elektromotoren zur Anwendung kommen:

- die funktionelle Wiederverwendung, d.h. die Reparatur der Motorkomponenten, speziell des Läufers, und die Wiederverwendung des ganzen Motors, von Teilen oder zumindest der Magnete in einem anderen Motor,
- die werkstoffliche Wiederverwertung der Magnetmaterialien zur Herstellung neuer Magnete und
- die rohstoffliche Wiedergewinnung der Seltenerdmetalle aus vorsortiertem und geschreddertem Material.

Da bisher nur wenige Erfahrungen über den Langzeiteinsatz von Antriebsmotoren in Fahrzeugen zur Verfügung stehen, ist derzeit nicht zu entscheiden, welche dieser Vorgehensweisen für die industrielle Recyclingpraxis möglich und unter technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten am besten geeignet sind. Es ist davon auszugehen, dass für unterschiedliche Anwendungsgebiete mehrere Verfahrensoptionen zur Verfügung stehen müssen.

3.1. Funktionelle Wiederverwendung

Die funktionelle Wiederverwendung von Komponenten des Motors umfasst verschiedene Möglichkeiten:

- Reuse (Wiederverwendung nach Reinigung und Prüfung)
- Repair (Wiederverwendung nach Reparatur)
- Remanufacture (Wiederaufbau unter Verwendung gebrauchter Komponenten)

Welche dieser Optionen anwendbar ist, hängt davon ab, in welchem Alterungszustand ein Motor der Wiederverwendung zugeführt wird. So wird z.B. ein Motor aus einem Unfallfahrzeug mit relativ geringer Laufleistung direkt wiederverwendbar sein (Re-use), wohingegen von einem Motor aus einem Fahrzeug nach einer langen Lebensdauer nur Teile zum Wiederaufbau verwendet werden können. Bisher existieren aber noch nicht genügend Informationen über die maßgeblichen Alterungsmechanismen der Motorkomponenten und besonders der Magnetmaterialien, um zu entscheiden, ob Wiederaufarbeitungsmaßnahmen möglich bzw. sinnvoll sind. Die Entwicklungsaufgaben umfassen die Ableitung von Kriterien für die Bewertung von Altteilen und die Entscheidung über ihre Wiederverwendbarkeit. Eine weitere wichtige Frage ist die Sicherstellung der spezifizierten Lebensdauer reparierter bzw. wiederaufgebaute Komponenten. Dazu müssen zunächst die maßgeblichen Alterungsmechanismen identifiziert und entsprechende Vorhersagemodelle erstellt werden.

Eine weitere wichtige Maßnahme, um die Austauschbarkeit auch über mehrere Motor- generationen und verschiedene Hersteller hinweg zu gewährleisten ist, dass Schlüssel- komponenten wie z.B. die Magnete hinsichtlich ihrer Abmessungen und magnetischen Eigenschaften standardisiert werden.

Die funktionelle Wiederverwertung ist ein bevorzugtes Ziel, denn sie verspricht einen im Vergleich zu stofflicher Wiederverwertung geringeren Energie- und Prozessaufwand. Weiterhin spricht für diese Vorgehensweise, dass der Austausch von Altteilen gegen reparierte oder wiederaufgearbeitete Teile gerade im Fahrzeugbereich üblich ist.

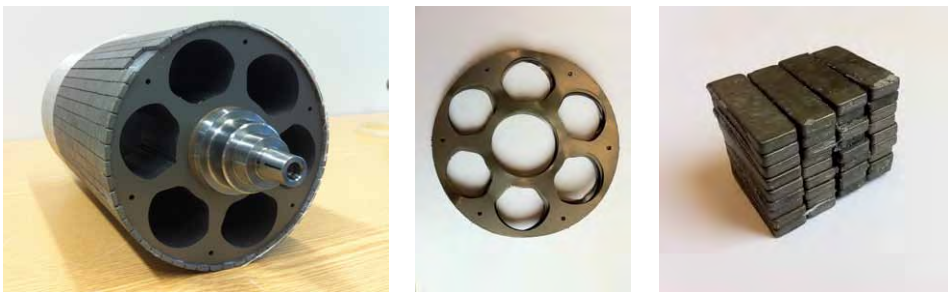


Bild 2: Rotor (links), Elektroleche (Mitte) und Magnete (rechts) eines Motors mit Oberflächenmagneten

3.2. Werkstoffliche Verwertung

Die werkstoffliche Verwertung kommt dann infrage, wenn die Komponenten, insbesondere die Magnete, für eine funktionelle Wiederverwendung zu stark geschädigt sind. Die Schädigung kann dabei durch Betriebsbeanspruchungen (z.B. Korrosion) bedingt sein oder auch durch den Demontagevorgang entstehen. So können Prozesse, die hohe Temperaturen erfordern, wie z.B. die thermische Entmagnetisierung, zur Schädigung des Materials durch Wasserstoffversprödung oder Sauerstoffkorrosion führen.

Zur Verwertung werden die Magnete sortenrein durch physikalische und chemische Verfahren so aufbereitet, dass das gewonnene Material in den Stoffkreislauf der Magnetproduktion zurückgeführt werden kann.

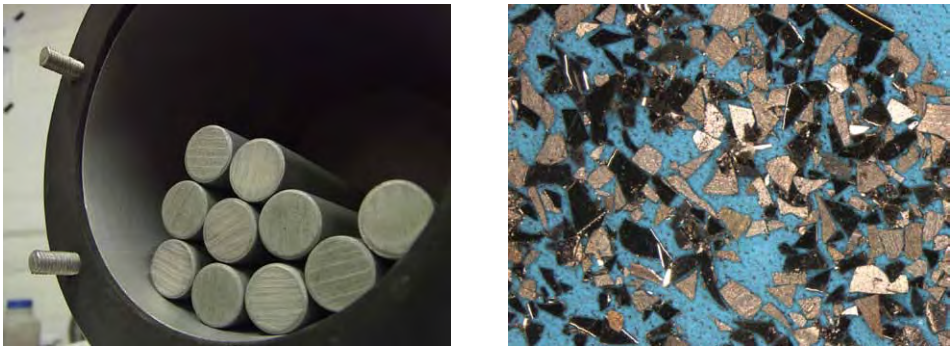


Bild 3: Stabmühle zur Zerkleinerung von Magnetmaterialien (links), Magnetpulver (rechts)

Hierzu müssen zunächst die Magnete von dem Läufer abgetrennt werden. Dann werden Beschichtungen und Klebstoffe von den Oberflächen entfernt. Anschließend werden die Magnete z.B. durch das Wasserstoff-Zerlegeverfahren zerkleinert und zu Pulvern zermahlen. Nach einer Nachbehandlung stehen Pulver zur Verfügung, die zur Herstellung neuer Magnete z.B. durch Sintern oder durch Polymerbindung verwendet werden können, wobei die pyrophore Eigenschaften der erzeugten Metallpulver zu berücksichtigen und zu beherrschen sind.

Eine wichtige Randbedingung für die Wirtschaftlichkeit dieses Vorgehens ist, dass die Eigenschaften der produzierten NdFeB-Magnetmaterialien durch die Beimischung von Recycling-Material nicht in unzulässiger Weise verschlechtert werden dürfen. Wie bisherige Erfahrungen zeigen, besteht die Gefahr, dass Remanenz und Koerzitivfeldstärke niedriger sind als bei Magneten, die aus Primärrohstoffen hergestellt wurden. Die genauen Mechanismen der Materialdegradation und ihre Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften sowie Verfahren zur Rekonditionierung sind Gegenstand von Untersuchungen.

3.3. Rohstoffliche Verwertung

Bei der rohstofflichen Verwertung werden nicht die Magnetmaterialien wiedergewonnen, sondern die Elemente der Seltenen Erden und weitere Metalle. Diese lassen sich dann in die Magnetproduktion zurückführen, können aber auch für andere Anwendungen eingesetzt werden.

Zur Extraktion der Seltenen Erden aus Schrott befinden sich vielversprechende Prozesse in der Entwicklung. Nach der mechanischen Zerkleinerung und metallurgischen Aufbereitung werden edlere Elemente wie Co, Ni und evtl. Cu in einem pyrometallurgischen Prozess in eine Legierungsphase überführt. Die Seltenen Erden sollen anschließend aus der Schlacke durch eine Kombination von mechanischer Aufbereitung (einschließlich Flotation) und hydrometallurgischen Prozessen aufkonzentriert und chemischen Prozessen extrahiert werden. Verfahren dieser Art wurden bereits erfolgreich für andere Materialsysteme wie z.B. Co aus den Kathoden von Li-Ionen-Batterien entwickelt.

Die rohstoffliche Verwertung ist dann eine Option, wenn die Magnete sehr stark geschädigt sind und/oder ein Ausbau aus dem Motor technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.

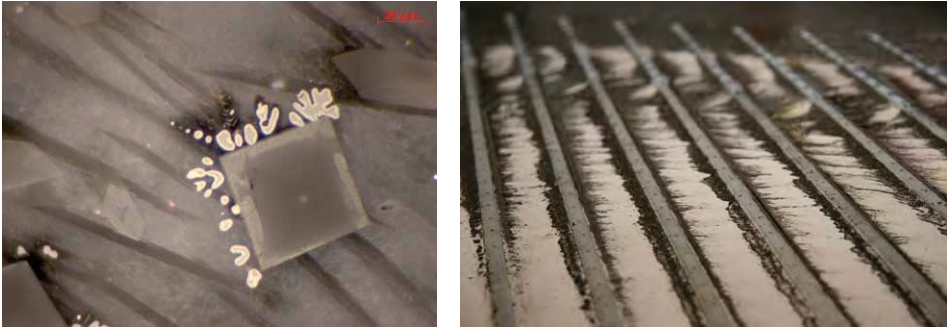


Bild 4: Ausscheidungen in einer Schlacke (links); Klassierung durch Nassherd (rechts)

4. Demontage

Die Demontage der einzelnen Komponenten spielt eine Schlüsselrolle für die Entwicklung von wirtschaftlich einsetzbaren Wiederverwendungs- und -verwertungsprozessen. Generell dient die Demontage dazu, Bauteile, die wertvolle Stoffe enthalten, abzutrennen und soweit wie möglich von Fremdmaterialien zu befreien. Sollen die Magnete direkt wiederverwendet werden, muss die mechanische Integrität dieser aus sprödem Material bestehenden Bauteile gewahrt werden, d.h. Brüche und Abplatzungen von Ecken oder Kanten sind zu vermeiden. Die Anforderungen an eine schonende Behandlung der Magnete sind hier am größten.

Im Fall der werkstofflichen Wiederverwendung spielen mechanische Beschädigungen eine untergeordnete Rolle, da die Bauteile sowieso einer mechanischen Aufbereitung, die auch eine Zerkleinerung umfasst, unterzogen werden. Kritisch kann hier aber eine Schädigung des Materials durch die oben beschriebenen korrosiven Degradationsmechanismen sein. Die thermische Entmagnetisierung muss deshalb so durchgeführt werden, dass die Schädigungen vermieden werden oder auf ein Minimum beschränkt bleiben. Auch bei der rohstofflichen Verwertung werden bei der Demontage bereits Komponenten mit unterschiedlichen Materialien weitgehend getrennt, um die in den folgenden Schritten erfolgende mechanische und metallurgische Aufkonzentration zu unterstützen.

Diese Demontageziele können nur durch eine weitgehende Mechanisierung der Prozesse z.B. zur Trennung von Rotor und Stator oder zur Magnetvereinzelung erreicht werden. Hierzu werden optimierte Werkstückträgerkonzepte und unterschiedliche Kinematiken mit passenden Greifersystemen sowie entsprechende Zuführeinrichtungen entworfen und aufgebaut [9, 10]. Ob eine weitgehende Automatisierung sinnvoll ist, hängt dabei zum einen stark von den zu erwartenden Stückzahlen, zum anderen von den zu erwartenden Designvarianten ab. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Tatsache dar, dass mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Größen und Bauformen von aus dem Feld zurückkommenden Motoren gerechnet werden muss. Dies gilt auch für die verwendeten Materialien, wie z.B. unterschiedliche NdFeB-Magnetlegierungen.

5. Recyclinggerechtes Design

Ein reparatur- und recyclinggerechtes Design der Antriebsmotoren ist eine wichtige Randbedingung zur Realisierung von Wiederverwendung im industriellen Maßstab.

Alternative Verbindungstechniken, wie beispielsweise neue Ansätze für die Fixierung der Magnete und Spulen, im Gegensatz zum heute verbreiteten Einkleben der Magnete, könnten die Entfernung der Magnete aus dem Rotor erleichtern. Ansätze zur Vereinheitlichung der Materialien und Designs mit dem Ziel, die Materialvielfalt zu reduzieren und evtl. Rohstoffe einzusparen, unterstützen sowohl die Demontage für die stoffliche Wiederverwertung und als auch die damit einhergehende Materialtrennung. Beim Remanufacture-Prozess trägt das Konzept eines standardisierten Modulsystems mit definierten Schnittstellen (z.B. Motor – Leistungselektronik) dazu bei, die Zahl der vorzuhaltenden Ersatzteile und damit die Lagerkosten erheblich zu senken. Daneben können eine große Variantenflexibilität erreicht und die Auf- und Abwärtskompatibilität der Produkte verbessert werden.

6. Versorgungssicherheit, Ökobilanz und Zweitmärkte

Die Verbesserung der Versorgungssicherheit an Hightech-Rohstoffen ist der primäre Nutzen der hier vorgestellten Recyclingverfahren. Zusätzlich werden positive Umwelteffekte erwartet, wie z.B. durch Energieeinsparung oder den Verzicht auf umweltschädliche Prozesse bei der Primärrohstoffgewinnung. Die Nachhaltigkeit dieser Verfahren muss aber noch explizit nachgewiesen werden. Die beschriebenen Ansätze werden deshalb durch die Erstellung von Ökobilanzen und Ökoeffizienzanalysen, die auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einschließen, bewertet. Dazu werden zunächst orientierende an EN ISO 14040/14044 angelehnte Ökobilanzen durchgeführt. Diese vereinfachte Bilanzierung liefert wichtige Rückschlüsse bzgl. der ökologischen Stärken und Schwächen der diversen Wiederverwendungs- und Recyclingvarianten. Anschließend werden Life Cycle Analysen für die zu entwickelnden Verfahren zur Wiederverwendung bzw. zur stofflichen Verwertung für die Komponenten und Materialien der Elektromotoren durchgeführt [11]. In Kombination von Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkung wird die Ökoeffizienz der System- bzw. Verfahrensalternativen verglichen.

Die erneute Verwendung gebrauchter Komponenten oder Materialien für einen anderen als den ursprünglichen Zweck (Weiterverwendung) bietet zusätzliche Chancen, Recyclingverfahren mit Geschäftserfolg zu betreiben. Nicht-automobile Zweitmärkte helfen, die Umsatz- und Erlössituation der rezyklierten Produkte auf allen Wertschöpfungsstufen zu verbessern. So könnten rezyklierte Magnete z.B. auch in Windkraftgeneratoren Anwendung finden. Das Potenzial, das Zweitmärkte bieten, muss deshalb analysiert und bewertet werden.

Die funktionelle und stoffliche Wiederverwendung und Weiterverwendung von Komponenten von Fahrzeugantriebsmotoren bieten einen Gewinn an Versorgungssicherheit mit wertvollen Rohstoffen und lassen großen ökologischen Nutzen und wirtschaftliche Vorteile erwarten. Diese Vorteile können aber nur genutzt werden, wenn Komponenten und Materialien aus Fahrzeugen in genügender Menge zur Verfügung stehen. Dies ist nur in einem geschlossenen Kreislauf ohne signifikanten Abfluss gewährleistet. Die Entwicklung interessanter und profitabler Geschäftsmodelle, die z.B. die Schaffung verstärkter Anreize zur Rückgabe des Fahrzeugs oder das Angebot attraktiver Leasingmodelle zum Inhalt haben, ist zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft erforderlich.

7. Fazit

Besonders im Bereich der Seltenerdmetalle, die für Hochleistungsmagnete verwendet werden, ist eine kritische Rohstoffsituation absehbar. Ein Verbund von Industrieunternehmen und Forschungsinstituten arbeitet deshalb im Rahmen eines vom Bundesministerium für

Bildung und Forschung geförderten Projekts an einer Wiederverwendungs- und Wiederverwertungsstrategie für die Magnetmaterialien aus elektrischen Fahrtriebmotoren. Die Arbeiten umfassen nicht nur technologische und Prozessentwicklungen, sondern auch Nachhaltigkeits- und Wirtschaftlichkeitsbewertungen und Fragen der Kreislaufwirtschaft. Damit wird ein umfassendes Konzept erstellt, das über die wissenschaftlich-technischen Aspekte deutlich hinausreicht.

Es wird erwartet, dass die Projektergebnisse folgenden Nutzen für Industrie und Gesellschaft haben werden:

- Erhöhung der Versorgungssicherheit bei Hightech-Rohstoffen,
- Sicherung kontinuierlicher industrieller Produktion,
- Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit,
- Schonung natürlicher Ressourcen.

8. Literatur

- [1] European Commission, Enterprise and Industry: Critical raw materials for the EU, Brüssel, 2010
- [2] Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F. et al.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2009
- [3] Patent No. RU 2369561 (10.10.2009): Method of extracting rare earth metal oxides from grinding wastes of permanent magnet manufacturing
- [4] Liu, Z.; Chen, H.: The industrial practice of recycling rare earth from NdFeB scraps. Cailiao Yanjiu Yu Yingyong, 2009, pp. 134-137
- [5] Zakotnik, M.; Devlin, E.; Harris, I. R.; Williams, A. J.: Hydrogen Decrepitation and Recycling of NdFeB-type Sintered Magnets. Proc. 19th Int. Workshop Rare Earth Permanent Magnets and their Applications, Beijing, 2006, p. 289
- [6] dt. Patent DE 10255604: Verfahren zur Herstellung eines anisotropen Magnetpulvers und eines gebundenen anisotropen Magneten daraus
- [7] Takeda, O.; Nakano, K.; Sato, Y.: Resource recovery from waste of rare earth magnet by utilizing fluoride molten salts. Yooyuen oyobi Koon Kagaku, 2009, pp. 63-70
- [8] Koyama, K.; Kitajima, A.; Tanaka, M.: Selective leaching of rare earth elements from an Nd-Fe-B-magnet. Kidorui, 2009, pp. 36-37
- [9] Junker, S.: Technologien und Systemlösungen für die flexible automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2007
- [10] Feldmann, K.; Junker, S.: Rationelle Läuferproduktion durch automatische Magnetmontage. In: ZWF 102 (2007), Nr. 3, München: Hanser Verlag, 2007, S. 139-144
- [11] Wegener, D.; Finkbeiner, M.; Holst, J.-C.; Olsen, S. I.; Walachowicz, F.: Improving Energy Efficiency in Industrial Solutions – Walk the Talk. Proc. Of Riso, International Energy Conference 2011, p. 187-196

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 5

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012

ISBN 978-3-935317-81-8

ISBN 978-3-935317-81-8 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 2012

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: Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

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 Funksendung, 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.