

# Recycling von Selten-Erd-Permanentmagneten für eine resiliente und nachhaltige Energie- und Mobilitätswende

Mario Schönfeldt, Konrad Opelt, Jürgen Gassmann und Oliver Gutfleisch

*Der Bedarf an Selten-Erd-Magneten im Energie- und Mobilitätssektor steigt und die Versorgung mit diesen Rohstoffen ist anhaltend kritisch. Angesichts dessen werden in diesem Artikel unterschiedliche Recyclingansätze und deren aktuelle Marktsituation vorgestellt sowie im Anschluss daran der Einfluss des pulvermetallurgischen Recyclings verschiedener End-of-Life-Magnete auf unterschiedliche Materialeigenschaften untersucht. Schließlich demonstriert ein mit recycelten Magneten aufgebauter Pedelec- und e-Scooter-Motor die praktische Anwendung.*

## Notwendigkeit eines industriellen Magnetrecyclings

Hochleistungspermanentmagnete auf der Basis von Nd-Fe-B sind seit ihrer Entdeckung 1983 nach wie vor das Magnetmaterial mit der höchsten Energiedichte bei Raumtemperatur. Aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften finden diese Magnete in zahlreichen Schlüsseltechnologien wie Generatoren von Windkraftanlagen, Traktionsmotoren von Elektrofahrzeugen oder Industriemotoren und der Unterhaltungselektronik Anwendung. Laut der European Raw Material Alliance (ERMA) nutzen weltweit 95 % aller Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen Selten-Erd-(SE)-Magnete. Der benötigte jährliche Bedarf in diesem Sektor wird von 5 kt in 2019 auf bis zu 70 kt im Jahre 2030 zunehmen [1].

Weiterhin wird bis 2027 der weltweite jährliche Bedarf an SE-Magneten im Windenergiesektor auf 15 kt pro Jahr steigen. Hier finden SE-Magnete vor allem in den getriebelosen Offshore-Anlagen Verwendung. Allein in Deutschland ist mit einem Ausbau der Windenergie bis 2030 auf über 15 GW zu rechnen, wobei mehr als ein Drittel der Kapazität durch Offshore-Anlagen abgedeckt wird [2]. Zur Abschätzung des notwendigen Bedarfs an SE-Magneten kann hier mit einem Wert von 250-650 kg/MW gerechnet werden.

Trotz dieser essentiellen Wichtigkeit von Permanentmagneten im Energie- und Mobilitätssektor sind Deutschland und die Europäische Union weiterhin auf Importe dieser strategischen Materialien angewiesen, wovon 98 % (16 kt) in einem einzigen Land (China) produziert werden. Die Folgen einer marktbeherr-

schen Monopolposition wurden im Jahre 2011 sehr deutlich, als durch die Ankündigung von Exportzöllen, die Rohstoffpreise der für die Magnetproduktion notwendigen Seltenen Erden um ein Vielfaches erhöht wurden.

Neben diesen ökonomischen Faktoren ist die derzeitige Primärproduktion der Seltenen Erden und damit auch der Selten-Erd-Magnete mit negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen verbunden, welche die Kritikalität der Rohstoffe weiter erhöhen und die Nachhaltigkeit der daraus hergestellten Magnete und ihrer Anwendungen reduzieren. Zu den ökologischen Auswirkungen zählen beispielsweise die Zerstörung von Lebensräumen durch den Bergbau, sowie damit verbundene Umweltbelastungen. Es werden bei der Produktion von 1 t Seltener Erden bis zu 1,4 t radioaktiver Abfall, 1.000 t Abwasser und 2.000 t giftiger Abraum produziert [3].

Neben der Entwicklung von ressourcenoptimierten Herstellungsverfahren und der (teilweisen) Substitution der kritischen Elemente [4] stellt das Recycling eine weitere

Möglichkeit dar, um den Einsatz SE-haltiger Permanentmagnete nachhaltiger zu gestalten. Der Aufbau eines industriellen Magnetrecyclings in Europa und die Verwendung recycelter Magnete würde Abhängigkeiten entlang der gesamten Lieferkette reduzieren, den Markt vielseitiger gestalten und damit die Resilienz gegenüber äußeren Einflüssen verbessern.

## Recyclingtechnologien und -markt

Das Fraunhofer IWKS und die TU Darmstadt haben sich aus diesen Gründen in den letzten 12 Jahren, nach der sogenannten Selten-Erd-Krise, mit der Entwicklung von unterschiedlichen Technologien für das Recycling von SE-Magneten intensiv befasst. Aufgrund ihrer Verbreitung und hohen Kosten fokussieren sich die Verfahren auf das Recycling, der Rückgewinnung und Wiedernutzbarmachung von End-of-Life (EoL)-Magneten auf der Basis von Nd-Fe-B, sowie den bei der Primärproduktion entstehenden Produktionsabfällen.

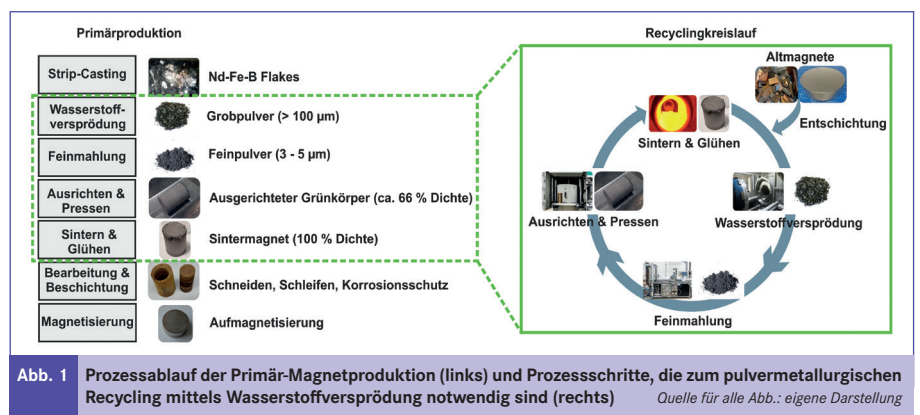


Abb. 1 Prozessablauf der Primär-Magnetproduktion (links) und Prozessschritte, die zum pulvermetallurgischen Recycling mittels Wasserstoffversprödung notwendig sind (rechts)

Die existierenden Recyclingtechnologien lassen sich in zwei Gruppen einteilen, dem Elementaren Recycling (auch indirektes Recycling oder long loop Recycling genannt) und dem Funktionalen Recycling (auch direktes Recycling oder short loop Recycling genannt). Kennzeichen der erstgenannten Verfahren ist die Zerlegung der Magnete in die individuellen chemischen Elemente und Separation der enthaltenen Seltenen Erden wie Neodym, Praseodym, Dysprosium oder Terbium, welche einer Magnetproduktion wieder zugeführt werden können. Dies erfolgt durch pyrometallurgische, hydrometallurgische oder elektrochemische Verfahren.

Beim Funktionalen Recycling wird der Magnet ohne eine Zerlegung in die einzelnen Elemente recycelt. Die Magnetlegierung, die funktionale, hartmagnetische Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Phase, wird dabei als Ganzes verwendet, wobei geringe Gehalte an Additiven für eine Optimierung der Eigenschaften zugegeben werden können. Das Funktionale Recycling kann pulvermetallurgisch unter Verwendung einer Wasserstoffatmosphäre oder schmelzmetallurgisch erfolgen und hat das Ziel, gesinterte, kunststoffgebundene oder heißumgeformte Recyclingmagnete herzustellen. Vorteile des Funktionalen Magnetrecyclings sind geringere Investitionskosten aufgrund ähnlicher Prozesse zur Primärproduktion (vgl. Abb. 1), sowie ein deutlich verringerter Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck [5].

Trotz der teilweise bereits seit einigen Jahren vorhandenen Recyclingtechnologien ist ein industrielles Magnetrecycling auf europäischer Ebene erst im Entstehungsprozess. Bisher werden weniger als 1 % der SE-Magnetabfälle in Europa recycelt. Gründe hierfür sind u.a. die teilweise immer noch sehr geringen und subventionierten Preise von chinesischen Primärmagneten. Weiterhin sind konstante Altmagnet-Stoffströme in ausreichender Menge und Qualität notwendig, was neben der Sammlung auch effiziente Demontage- und Sortierprozesse von EoL-Magneten beinhaltet. Auch die teilweise stark unterschiedlichen Lebensdauern von 2-3 Jahren im Bereich der Unterhaltungselektronik bis hin zu 20-30 Jahren bei Windturbinen haben einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der SE-haltigen Stoffströme.

Regulative Unterstützung kommt jüngst von Seiten der Europäischen Union durch politische Maßnahmen wie dem Critical Raw Materials Act, einer neuen Ökoprodukttrichtlinie oder der Altfahrzeug-Verordnung, welche zum Ziel haben, die Kreislaufwirtschaft strategischer Rohstoffe zu erhöhen. Forschungseinrichtungen und Universitäten arbeiten parallel dazu an der Weiterentwicklung der Technologien, um die Eigenschaften recycelter Magnete für den Einsatz in unterschiedlichen Anwendungen zu optimieren. Ein besseres Materialverständnis während des Recyclingprozesses sowie die Nutzbarmachung unterschiedlicher Stoffströme durch innovative und automatisierte Demontageprozesse können ebenfalls dazu beitragen, ein industrielles Recycling von SE-Magneten zu fördern.

### Funktionales Recycling von Nd-Fe-B-Magneten am Fraunhofer IWKS

Als Ausgangsmaterial wurden Magnete aus diversen Anwendungen wie Magnetresonanztomographen (MRT) oder Pumpen verwendet. Nach der Entfernung der Korrosionsschutzschicht wurden die Altmagnete unter 5 bar Wasserstoff versprödet und anschließend für 3 h unter Vakuum teildehydriert. Das resultierende Grobpulver (D<sub>50</sub> > 100 µm) wurde anschließend mit einer Gegenstrahlmühle (100 AFG, Hosokawa Alpine AG) unter Stickstoff auf Sintergröße (D<sub>50</sub> < 6 µm) gemahlen. Das erhaltene Feinpulver wurde schließlich in einer Transversalpresse unter Argon durch Anlegen eines externen magnetischen Feldes von 2,5 T ausgerichtet und zu anisotropen

Grünkörpern verpresst. Die Presslinge wurden in Mo-Boxen und Quarzglas-Rohröfen unter Vakuum (10<sup>-6</sup> mbar) bei Temperaturen zwischen 1.030 °C und 1.100 °C gesintert und anschließend bei 500 °C und 900 °C für 1 h gegläht.

Zur Herstellung der Demonstrator-Magnete wurden mehrere 350 g schwere anisotrope Magnete unter einem gepulsten externen Magnetfeld mit 9 T ausgerichtet, mittels kaltisostatischer Presse unter 500 kN für 3 min gepresst und anschließend in einem Kammerofen unter Vakuum gesintert und gegläht. Die finalen Recyclingmagnete wurden zum Schluss aus den größeren Magnetblöcken mittels Funkenerosion auf Endkontur geschnitten.

### Einfluss des Recyclingprozesses auf die resultierenden Eigenschaften

Nichtmetallische Verunreinigungen sind bekannt für ihren negativen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften und können während der Nutzungsphase oder dem Recyclingprozess vom Magneten bzw. dem Magnetpulver aufgenommen werden. Um den Einfluss mehrerer Recyclingzyklen auf das Materialverhalten zu untersuchen, wurden die MRT-Altmagnete dreimal pulvermetallurgisch recycelt. Dabei zeigte sich eine Aufnahme des Verunreinigungsgehaltes an den leichten Elementen Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff (vgl. Abb. 2). Dennoch weisen alle Magnete auch nach drei Recyclingzyklen Verunreinigungsgehalte auf, die mit den verwendeten Anlagen und Prozessen vergleichbar mit Magneten aus der Primärproduktion sind. Der Anstieg

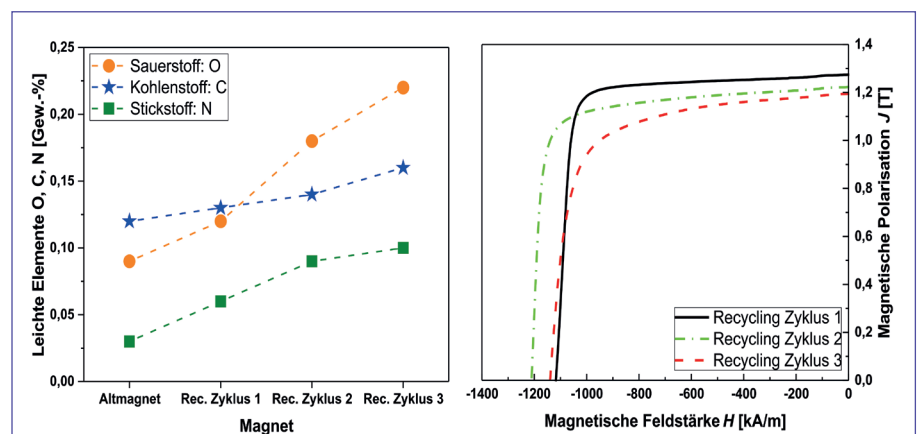


Abb. 2 Einfluss der Anzahl an Recycling-Zyklen auf den Gehalt an Verunreinigungen (links) und auf die resultierenden magnetischen Eigenschaften (rechts)

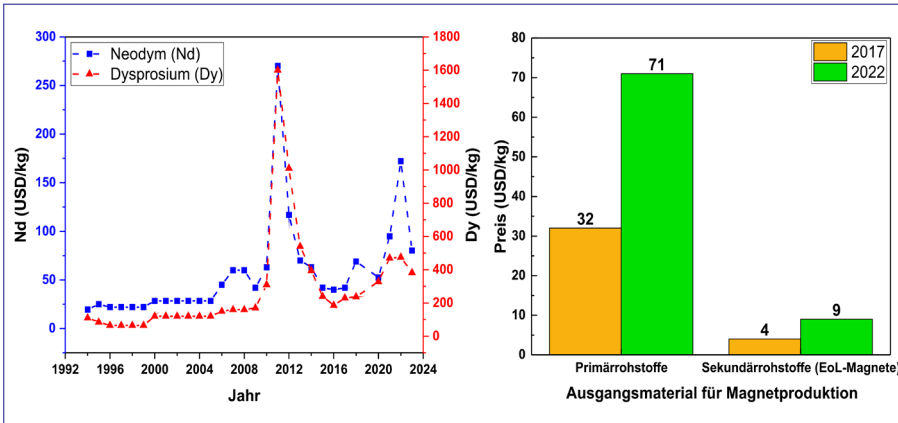


Abb. 3 Preisentwicklung der Seltenen Erden Neodym und Dysprosium (links) und kalkulierte Rohstoffpreise aus Primär- und Sekundärrohstoffen, welche für einen typischen Nd-Fe-B-Magneten notwendig sind (rechts). Bei beiden Materialien kam es im betrachteten Zeitraum zu einem Preisanstieg von 125 %

des Sauerstoff- oder Stickstoffgehaltes von 0,09 auf 0,22 Gew.-% bzw. von 0,03 auf 0,10 Gew.-% resultiert unter anderem in einer Abnahme der remanenten Polarisierung.

Ebenso kommt es zu einer Beeinflussung der Mikrostruktur des Magneten durch die wiederholten Wärmebehandlungen beim Sintervorgang und einer veränderten Kornausrichtung im Gefüge. Durch Anpassung der Sinterparameter und Zugabe geringer Mengen an Nd-Hydrid war es dennoch möglich, volllichte dreifach recycelte Magnete herzustellen, deren Eigenschaften vergleichbar zu Primärmagneten sind [6]. Werden die Rohstoffkosten von Primärmaterial (SE-Elemente) und Sekundärmaterial (Rezyklat) verglichen, so wird deutlich, dass durch den Einsatz von Rezyklaten das Potential besteht, Materialkosten in der Produktion zu reduzieren (vgl. Abb. 3).

### Einsatz recycelter Magnete in Anwendungen der Elektromobilität

Um die praktische Einsatzfähigkeit recycelter SE-Magnete zu demonstrieren, wurden verschiedene Elektromotoren mit primären und recycelten Magneten aufgebaut und vergleichend charakterisiert [7]. Beide Motoren erzeugen vergleichbare induzierte Spannungen über den gesamten getesteten Drehzahlbereich (vgl. Abb. 4). Im eher unwahrscheinlichen Idealfall könnten Magnete durch ein Re-use direkt wiederverwendet werden. Hierfür muss die Identifikation der Altmagnetströme mit einem Produktpass erfolgen. Daraufhin können Magnete direkt in eine neue Form geschnitten und im Produkt eingesetzt werden. Dies konnte anhand eines Pedelec-Motors erfolgreich demonstriert werden.

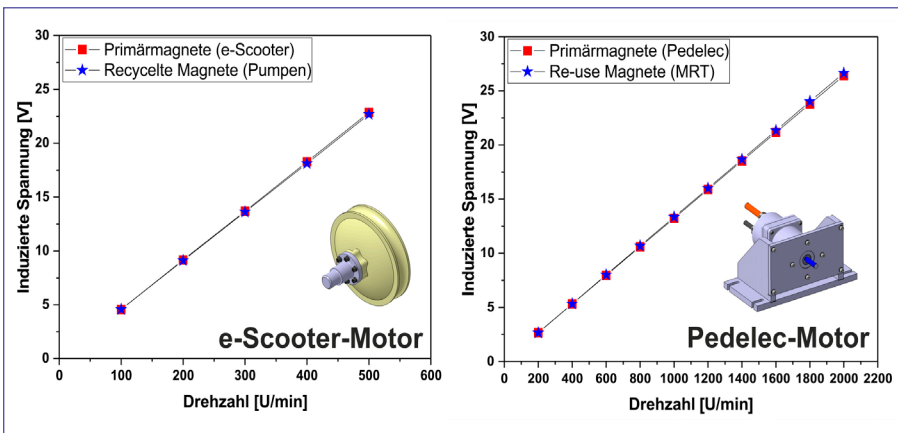


Abb. 4 Motorkennlinien eines e-Scooter-Motors (links) und eines Pedelec-Motors (rechts), welche mit primären und sekundären Permanentmagneten bestückt wurden

## Fazit

Magnete aus unterschiedlichen Stoffströmen konnten erfolgreich funktional recycelt werden. Eine vollständige Pilotanlage im 50-kg-Technikums-Maßstab ist dafür am Fraunhofer IWKS im Betrieb. Durch Anpassung der Prozessparameter war es möglich, negative Effekte und Qualitätseinbußen zu minimieren. Recycelte Magnete bieten das Potential, die Nachhaltigkeit und den ökologischen Fußabdruck ihrer Anwendungen massiv zu verbessern sowie das Versorgungsrisiko und Materialkosten zu reduzieren.

## Literatur

- [1] R. Gauß et al., Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance, Berlin, (2021).
- [2] Global Wind Energy Council, Global wind report (2023).
- [3] Y. Geng et al., Nature 619 (2023) 248-251.
- [4] K. Opelt et al., Adv. Eng. Mater. (2021) 2100459.
- [5] O. Diehl et al., J. Sustain. Metall. 4 (2018) 163-175.
- [6] M. Schönfeldt et al., Journal of Alloys and Compounds 939 (2023) 168709.
- [7] M. Schönfeldt et al., Adv. Eng. Mater. (2024), to be published.

M. Schönfeldt, K. Opelt, J. Gassmann, Magnetwerkstoffe, Fraunhofer IWKS Hanau; Prof. Dr. O. Guifleich, Functional Materials, Technische Universität Darmstadt

Kontakt:

mario.schoenfeldt@iwks.fraunhofer.de

## Hinweis

Diese Arbeit wurde teilweise im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft (Fördernummer SME 600 004) und des Förderprogramms Elektromobilität in Hessen (HA-Projekt-Nr.: 845/20-05) gefördert.