

Recycling von NdFeB-Magneten aus elektrischen Antrieben – das Projekt MORE –

Gabriele Hörnig

1.	Motivation.....	220
2.	Projekt-Ansatz.....	221
3.	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.....	222
3.1.	Stofffluss und Rückgewinnungs-Technologien.....	222
3.2.	Industrielle Demontage-Techniken für Elektromotoren.....	222
3.3.	Funktionelle Wiederverwendung.....	224
3.4.	Recycling des Magnetmaterials (NdFeB).....	225
3.5.	Rückgewinnung der Rohstoffe (Selten-Erd-Oxide).....	225
3.6.	Ökologische Bewertung.....	227
3.7.	Entwicklung eines Closed-Loop-Szenarios.....	228
4.	Ausblick.....	230
5.	Literatur.....	231

Das vom BMBF im Rahmen des Programms *Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)* geförderte Projekt *MORE (Motor Recycling) – Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben* (Förderkennzeichen: 03X4622) wurde von einem Konsortium aus Industrie und Forschung unter Federführung der Siemens AG durchgeführt. Die Partner im Forschungsverbund waren die Firmen Daimler AG, Umicore AG & Co. KG und Vacuumschmelze GmbH & Co. KG sowie die Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik), die Technische Universität Clausthal (Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik), das Öko-Institut e.V. Darmstadt und das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung Karlsruhe.

Gemeinsam wurde an dem Ziel gearbeitet, spezifische und innovative Wiederverwendungs- bzw. Recyclingkonzepte und -technologien für Komponenten und Materialien des Antriebsstrangs von Elektro- und Hybridfahrzeugen zu entwickeln. Im Mittelpunkt stand die Rückgewinnung von Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten (NdFeB) bzw. der darin enthaltenen Seltenen Erden.

Verschiedene Stufen des Recyclings, d.h. sowohl die Wiederverwendung von Komponenten als auch die stoffliche Verwertung der in Elektromotoren enthaltenen Magnete, wurden untersucht, um für jeden Anwendungsfall die ökologisch und wirtschaftlich

besten Lösungen zu finden. Die Prämisse lag dabei auf industriell umsetzbaren Lösungen, d.h. wirtschaftlichen und für große Stückzahlen einsetzbaren Prozessen. Die Entwicklung eines das Recycling unterstützenden Designs und die Mechanisierung der Prozesse waren deshalb weitere Projektziele.

Zur Absicherung der Nachhaltigkeit der Ergebnisse wurden die Prozesse hinsichtlich Ökologie und Wirtschaftlichkeit bewertet. Der Nutzen der Projektergebnisse liegt in folgenden Aspekten:

- Nutzbarmachung von Sekundärrohstoffen in einer Kreislaufwirtschaft,
- Erhöhung der Versorgungssicherheit und der Kostensicherung,
- Verbesserung der Ressourceneffizienz und der Klimaschonung,
- Abfallvermeidung als Bestandteil nachhaltiger industrieller Produktion.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse des Projektes, wie sie im gemeinsamen Projekt-Abschlussbericht der Partner ebenfalls dargestellt sind [2].

1. Motivation

Zu Projektbeginn wurde eine zukünftig stark zunehmende Stückzahl im Bereich von Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeugen angenommen. Angesichts dieser steigenden Nachfrage wurde auch ein extrem starker Anstieg des Bedarfs an Selten-Erd-Metallen für den Antriebsstrang prognostiziert. Dies liegt daran, dass Seltene Erden (SE) unverzichtbare Bestandteile von Hochleistungsmagnetwerkstoffen, insbesondere von NdFeB-Magneten, sind, die für kompakte und leichte Synchronmotoren benötigt werden. Zusätzlich nimmt der Bedarf für diese Materialien auch für andere Anwendungen zu. Ein Beispiel hierfür sind getriebelose Generatoren von Windturbinen, die bei Anwendung im MW-Bereich mehrere Tonnen dieses Magnetmaterials benötigen.

Die Rohstoffsituation in Deutschland ist bei den SE-Metallen durch eine fast vollständige Abhängigkeit von Importen gekennzeichnet. Derzeit stammen über 90 Prozent der Seltenen Erden aus China. Zu Beginn des Projektes wurden Exportzölle auf die SE-Metalle erhoben sowie jährliche Exportquoten festgelegt. Daher wurde eine Rohstoffverknappung und infolgedessen eine entsprechende Preissteigerung für diese Metalle erwartet, die dann in den Jahren 2011 und 2012 auch eintrat.

Dies führte weltweit zu systematischen Untersuchungen zur Versorgungssicherheit bzgl. dieser Materialien. Zudem wird die Primärproduktion der Seltenen Erden und ihrer Verbindungen in der Volksrepublik China häufig im Zusammenhang mit erheblichen Umweltbelastungen diskutiert [13]. Im Rahmen des Projektes sollten daher Lösungen zur Reduktion des Versorgungsrisikos und zur Sicherung des Zugangs zu sekundären Rohstoffen durch Rückgewinnung von Seltenen Erden aus NdFeB-Magneten erarbeitet werden.

Zudem ist die Automobilindustrie verpflichtet, die Vorgaben der Altfahrzeug-Verordnung einzuhalten, die für die Verwertung von Hybrid- bzw. Elektro-Altfahrzeugen die gleichen Regeln wie für konventionelle Altfahrzeuge vorschreibt. So müssen in der EU

seit dem Jahr 2015 alle Fahrzeuge zu 95 Gew.-Prozent verwertet werden. Eine stoffliche Recyclingquote von 85 Gew.-Prozent ist dabei einzuhalten [6].

Altfahrzeuge stellen schon lange eine Quelle für Sekundärrohstoffe, z.B. Stahl oder Aluminium, dar. In einer permanenterrregten Synchronmaschine, wie sie heutzutage typischerweise in Hybridfahrzeugen eingesetzt wird, sind zudem etwa 3 kg Permanent-

Tabelle 1: Materialzusammensetzung eines typischen Elektromotors für Hybridfahrzeuge (Drehmoment 50 Nm, Leistung 10 kW, Stromstärke 20A)

Gesamtgewicht	40 kg
Stahl	26
Kupfer	5
Aluminium	5
Magnete (NdFeB)	3
Rest	1

magnete enthalten, vgl. Tabelle 1. Diese Magnete bestehen zu etwa 30 Prozent aus den Selten-Erd-Metallen Neodym (Nd) und Praseodym (Pr) mit Zusätzen der schweren SE Dysprosium (Dy), und Terbium (Tb), deren genaue Zusammensetzung abhängig vom Einsatzbereich variiert. Dieses Material geht derzeit bei der Verwertung von Altfahrzeugen verloren, da das Material keiner getrennten Verwertung zugeführt wird.

2. Projekt-Ansatz

Das Projekt MORE verfolgte durch seine Struktur einen umfassenden Ansatz (Bild 1). Neben den technischen Aspekten wurden auch ökologische und ökonomische Gesichtspunkte der entwickelten Technologien und Prozesse betrachtet. Im Detail bedeutet dies, dass durch die Partner die Rohstoff- und Technologiesituation analysiert, Technologien und Prozesse für Demontage und Recycling entwickelt, Ökoeffizienz- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vorgenommen und Kreislaufwirtschaftssysteme skizziert wurden.

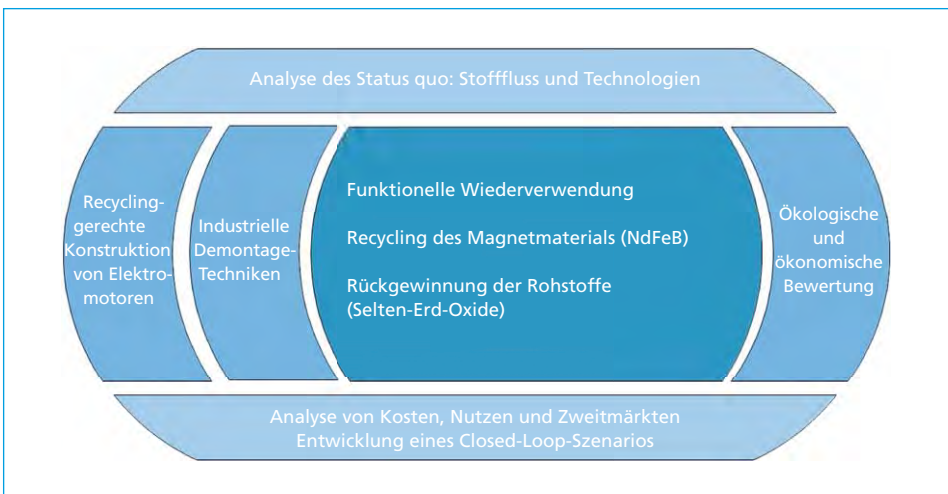


Bild 1: Schema des umfassenden Projektansatzes – Betrachtung technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1. Stofffluss und Rückgewinnungs-Technologien

Zur Abschätzung der künftigen Versorgungslage mit Seltenen Erden wurden die aufgrund der Verteuerung dieser Rohstoffe ausgelösten Bergbauaktivitäten außerhalb Chinas systematisch erfasst und hinsichtlich ihres zukünftigen Beitrags zur Versorgung des Weltmarkts bewertet. Zudem wurde die globale Bedarfsentwicklung von Neodym und Dysprosium aus allen bekannten Applikationen abgeschätzt und mit der erwarteten globalen Produktion verglichen, um drohende Versorgungsengpässe aufzuzeigen. Das Recycling und die Gewinnung von Sekundärrohstoffen wurden in die Betrachtungen einbezogen [1, 12, 14].

Die Analyse der Rohstoffströme zeigte, dass die Verwendung von Nd und Dy in Magneten den größten Bedarf erzeugt. Über die Einbindung des bei einem Projektpartner entwickelten *Global Mobility Model (GLOMO)* [9] wurde die Berücksichtigung des weltweiten Fahrzeugbestandes in der Prognose der Rohstoffnachfrage möglich.

Es zeigte sich, dass für Neodym ab 2020 eine Versorgungslücke erwartet werden muss. Recycling muss zunehmend zur Deckung des Bedarfs und zur Schließung dieser Versorgungslücke beitragen. Für Dysprosium wird eine starke Unterversorgung erwartet, da die Fördermengen insgesamt geringer sind, jedoch ein starker Verbrauchsanstieg erwartet wird.

In den letzten Jahren wurden verschiedenste Projekte in Industrie und Wissenschaft zum Thema Recycling von Seltenen Erden aus den unterschiedlichsten funktionellen Material-Anwendungen wie z.B. Magneten, Leuchtstoffen oder Batterien durchgeführt. Obwohl z.B. für Leuchtstoffe geeignete Verfahren entwickelt und in die Praxis umgesetzt werden konnten, steht derzeit in Europa noch kein umweltfreundliches großtechnisches Verfahren zur Rückgewinnung der Seltenen Erden aus Magneten zur Verfügung [3, 8, 11].

3.2. Industrielle Demontage-Techniken für Elektromotoren

Bei Industriemotoren ist die Art der Entsorgung abhängig vom Einsatz der Motoren. In Maschinen integrierte Motoren werden in der Regel mit der gesamten Maschine verschrottet. Dabei werden die Anlagen an einen Recyclingbetrieb abgegeben, der mit der ihm zur Verfügung stehenden Infrastruktur meist nur die Wertstoffe Aluminium, Kupfer und Stahl nach dem Stand der Technik voneinander trennt und an die entsprechende Aufbereitung weiterverkauft. Dazu wird der Schrott zerkleinert und dann entweder von Hand oder mittels Magnetscheider bzw. Wirbelstromsortierung in Eisenmetall- und verschiedene Nicht-Eisenmetall-Fractionen aufgetrennt.

Werden Industriemotoren bei einer Überholung oder Wartung der Anlage ausgetauscht oder defekte Motoren durch neue Motoren ersetzt, so werden meist Rotor und Stator voneinander getrennt und in zwei unterschiedlichen Schrottfractionen gesammelt. Die Statoren enthalten einen großen Anteil des werthaltigen Rohstoffes Kupfer, die

Rotoren hingegen zählen zum sogenannten Mischschrott. Diese Fraktionen werden ebenfalls an einen Recyclingbetrieb abgegeben, bei dem die weitere Auftrennung in die unterschiedlichen Metalle erfolgt, ehe die Sekundärrohstoffe an die Schmelzbetriebe weiterverkauft werden. Da es bislang keinen industriellen Prozess, mit dem in Motoren verbaute Magnete wieder nutzbar gemacht werden können, gibt, gelangen die Rotoren in der Mischschrottfraktion in den Kreislauf des Stahlrecyclings. Die in den Motoren eingesetzten Selten-Erd-Magnete werden nicht aus dem Mischschrott abgetrennt und gehen somit für ein Recycling verloren.

Ähnliches gilt auch für die Verwertung von Altfahrzeugen. Daher wurden im Projekt auf Basis von Szenarien entsprechende Strategien und Konzepte für nicht-zerstörende Trenn- und Demontage-Verfahren entwickelt, die eine wirtschaftliche Reparatur der elektrischen Fahrtriebe zulassen. Darüber hinaus wurde durch die gewonnenen Erkenntnisse eine geeignete Prozesskette zur Demontage und Wiederverwendung der strategisch wichtigen Materialien entwickelt. Es zeigte sich, dass die bisher bestehende Demontage-Kette bei der Altfahrzeugverwertung erweitert werden muss (Bild 2).

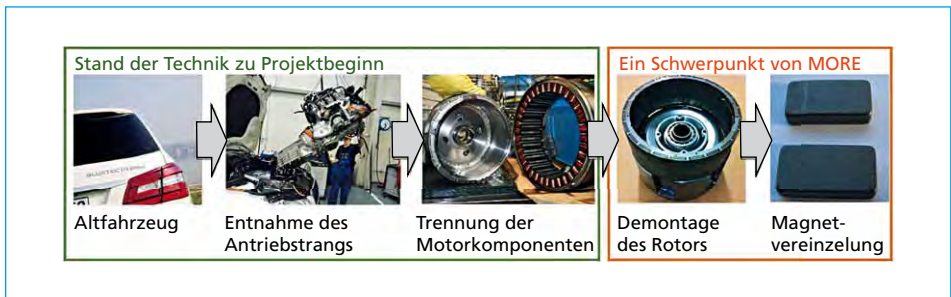


Bild 2: Darstellung der erweiterten Demontagekette für die Rückgewinnung von einzelnen Magneten aus dem Elektromotor eines Altfahrzeugs

Bislang wird in dezentral angesiedelten Demontagebetrieben meist der Antriebsstrang entnommen und anschließend werden die verschiedenen Komponenten (Motor, Getriebe) voneinander getrennt. Die Elektromotoren werden weiter zerlegt und Rotor und Stator getrennt verwertet. Aus dem Stator wird der Kupferdraht entnommen und dem Kupfer-Recycling zugeführt. Der Stator wird mitsamt den enthaltenen Magneten als Mischschrott entsorgt.

Durch zentralisierten Einsatz stark automatisierter Techniken zur Abtrennung der Magnete aus den Rotoren kann zukünftig eine kosteneffiziente Demontage des Magnetmaterials für eine weitere Aufbereitung ermöglicht werden. Im Rahmen von MORE wurde dazu ein mechanisiertes System für die zerstörungsfreie Demontage von Magneten entwickelt. Mit Hilfe einer Demonstrator-Anlage konnte gezeigt werden, dass die Demontage sowohl von vergrabenen als auch von oberflächenmontierten Magneten, auch ohne vorangehende Entmagnetisierung, möglich ist. Eine nach der Demontage stattfindende thermische Entmagnetisierung ist in der Regel erforderlich, bietet aber gleichzeitig Vorteile in Bezug auf Handhabung und durch geringeren Energieverbrauch.

Durch die während des Projektes entwickelten Demontage-Verfahren stehen nun verschiedene Lösungen zur Verfügung, das Magnetmaterial aus Altfahrzeugen nachfolgend einer geeigneten Aufbereitung zuzuführen. Für die Verwertung stehen mehrere verschiedene Routen zur Verfügung, die unterschiedliche Stufen der Recyclinghierarchie abdecken. Im Folgenden sind drei vielversprechende untersuchte Konzepte und die Aussichten bzgl. deren erfolgreichen Umsetzung beschrieben.

3.3. Funktionelle Wiederverwendung

Bei der funktionellen Wiederverwendung werden Motoren, deren Komponenten oder Subkomponenten erneut nutzbar gemacht durch:

- Reuse: Wiederverwendung von (Sub-)Komponenten nach Inspektion und Reinigung,
- Repair: Wiederverwendung von (Sub-)Komponenten nach Reparatur oder
- Remanufacture: Fertigung neuer Komponenten unter Verwendung von gebrauchten, aufgearbeiteten Teilen.

Aufgrund der Eignung für den industriellen Einsatz und der Tatsache, dass ähnliche Prozesse im automobilen Umfeld bereits etabliert sind (vgl. beispielsweise Ersatzteile-Service verschiedener Fahrzeughersteller) stellt die funktionelle Wiederverwendung von Motoren oder Komponenten, wie z.B. Rotoren, eine besonders ressourcenschonende Lösung dar, die besonders geeignet ist für. Diese Art des erneuten Einsatzes stellt gleichzeitig die höchste Stufe der Recyclinghierarchie dar.

Für die Wiederverwendung der Subkomponente *Permanentmagnet* sind die grundsätzlichen Anforderungen (keine Beschädigungen der Oberfläche durch Korrosion, Demontage, Handhabung oder Reinigung sowie keine Veränderung der physikalischen Eigenschaften) erfüllbar. Langzeitversuche im Fahrzeug-Betrieb zeigten, dass die Magnete im Betrieb nicht beschädigt oder entmagnetisiert werden. Wenn keine Beschädigungen an den Magneten auftreten, erscheint eine Wiederverwendung technisch möglich. Aufgrund der Langlebigkeit der Produkte, die Permanentmagnete enthalten und der fortlaufenden Weiterentwicklung der Elektromotoren sowie der Magnetmaterialien wird dieser Recyclingweg aber als unwahrscheinlich erachtet, da die verschiedenen eingesetzten Geometrien und Legierungen zukünftig kaum Anwendung finden dürften.

In einer weiteren Betrachtung wurden Zweitmärkte für die Magnete und die darin enthaltenen Selten-Erd-Elemente analysiert. Es wurde festgestellt, dass eine direkte Wiederverwendung der Magnete auch in diesem Szenario aus den oben genannten Gründen nicht sinnvoll erscheint. Zudem sind für die Seltenen Erden Neodym, Dysprosium, Terbium und Praseodym kaum alternative Anwendungsgebiete vorhanden. Daher würde bei einem stofflichen Recycling das Magnetmaterial wieder (fast) vollständig in die Herstellung neuer Magnete zurückfließen und kann so einen eventuellen Bedarfsengpass abdecken. Folgerichtig lag ein weiterer Schwerpunkt des Projektes auf der Entwicklung von geeigneten Verfahren für das stoffliche Recycling von NdFeB-Magneten. Hier kann zwischen einer werkstofflichen sowie einer rohstofflichen Aufbereitung unterschieden werden.

3.4. Recycling des Magnetmaterials (NdFeB)

Voraussetzung für das werkstoffliche Recycling des Magnetmaterials ist die Gewinnung kompakter, von Oberflächenbeschichtungen und Klebstoffen befreiter, sortenreiner, nicht oxidierter Magnetstücke. Dies konnte gewährleistet werden durch die Entwicklung des oben erwähnten Demontageverfahrens sowie durch Abtrag der Beschichtungen und Klebstoffe von den Oberflächen. Der so zurückgewonnene Werkstoff kann direkt wieder in den Stoffkreislauf der Magnetproduktion eingeführt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden ein Verfahren angewandt, bei dem aufzubereitendes Magnetmaterial mittels Wasserstoffversprödung zerkleinert und anschließend zusammen mit Primärrohstoffen wieder zu Magnetmaterial verarbeitet wurde (Bild 3). So wurde ein NdFeB-Magnetmaterial aus 70 Prozent primären Rohstoffen und 30 Prozent Recycling-Material hergestellt. Somit konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von Magneten mit Recycling-Material, z.B. aus Motoren ausgebaute und gereinigte Magneten, prinzipiell durchführbar ist.



Bild 3: Verfahren für das werkstoffliche Recycling von NdFeB-Magneten

Durch anschließende Bestimmung der magnetischen sowie weiterer einsatzrelevanter Eigenschaften dieses so gefertigten Magnetwerkstoffs wurde dessen Eignung für den Einsatz in elektrischen Fahrantrieben evaluiert. Es wurde festgestellt, dass die Eigenschaften dieser Magnete den Spezifikationen von Motormagneten entsprechen. Allerdings büßen die so entstehenden Magnete bei einem Anteil von 30 Prozent rezykliertem Material etwa drei Prozent ihrer Remanenz-Induktion ein.

Da für die Elektromobilität aus Platz- und Gewichtsgründen Magnete mit höchster Energiedichte (Remanenz) gefordert werden, ist es eher fraglich, ob Magnete aus diesem Recyclingprozess Einzug in dieses Segment finden werden, da zudem, wie in diesem Projekt ebenfalls gezeigt werden konnte, die Kosten für die Demontage, das Reinigen und das thermische Entmagnetisieren nicht unerheblich sind.

3.5. Rückgewinnung der Rohstoffe (Selten-Erd-Oxide)

Für das rohstoffliche Recycling wurden zwei unterschiedliche Verfahren untersucht. Bei der zunächst getesteten pyrometallurgischen Aufbereitung wurde das Magnetmaterial eingeschmolzen. Dabei sammelten sich die enthaltenen Seltenen Erden in der entstehenden Schlacke, wie es bei der Rückgewinnung von Eisen aus Mischschrotte ebenfalls geschieht. Die Untersuchungen zur Schlacke-Aufbereitung zeigten jedoch, dass die geringe SE-Konzentration in der Schlacke eine anschließende Abtrennung der Selten-Erd-Oxide erheblich erschwert.

Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf eine hydrometallurgische Aufbereitung der NdFeB-Magnete gelegt. Das entwickelte Verfahren (Bild 4) weist eine ähnliche Prozessführung auf, wie die Prozesse, welche für die Selten-Erd-Extraktion aus Erzen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die im Vergleich zum pyrometallurgischen Prozess insgesamt deutlich kürzere Prozesskette.

Zur Rückgewinnung der Selten-Erd-Oxide aus einer Lösung wurden verschiedene Verfahren in Betracht gezogen. Eine mögliche Variante des Prozesses (Lösen der Magnete in Salzsäure, Abtrennung von Eisen, Kobalt und anderen störenden Stoffen, Abtrennung der Selten-Erd-Oxide durch Fällung) wurde bereits von [4] veröffentlicht.

Da das größte Potenzial zur Trennung der Oxide in Leichte und Schwere Seltene Erden der Solvent-Extraktion zugeschrieben wurde, wurde ein entsprechender zwölfstufiger Prozess unter Verwendung des Extraktionsmittels PC-88A ausgelegt. Damit gelang die Auftrennung in ein Nd/Pr- sowie ein Dy/Tb-Konzentrat mit einer Reinheit von jeweils > 99,99 Prozent (4N) hergestellt werden [5].

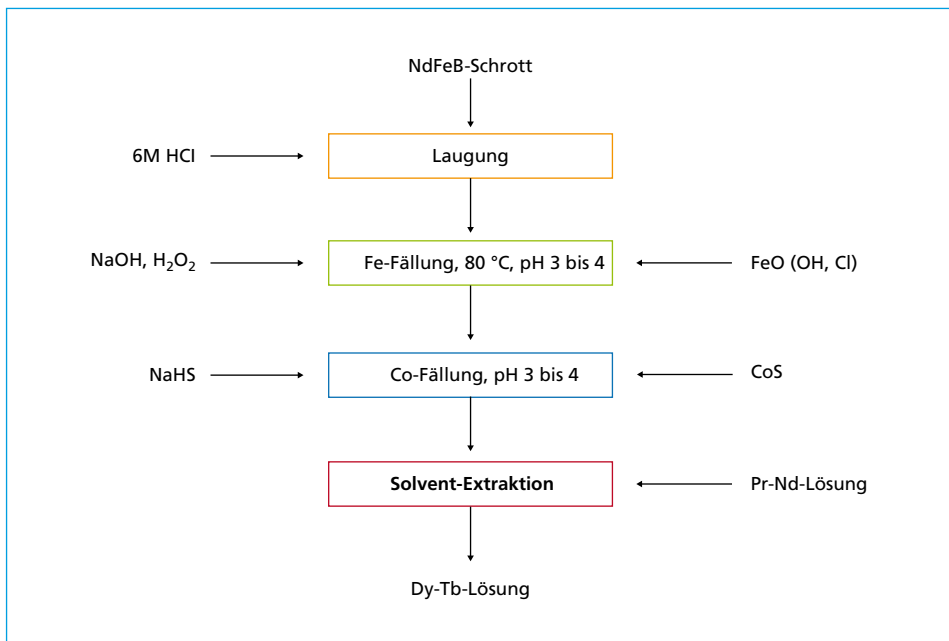


Bild 4: Vereinfachtes Prozessschema für die hydrometallurgische Rückgewinnung von Selten-Erd-Oxiden

Quelle: nach Elwert, T.; Goldmann, D.: Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete, Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 147–159

Diese Trennung der Selten-Erd-Elemente ist im Vergleich zum in der Primärproduktion eingesetzten Prozess mit deutlich geringerem verfahrenstechnischen Aufwand möglich. Dies liegt zum einen an der begrenzten Anzahl an Elementen, zum anderen an der

Lücke von vier Elementen zwischen 60^{Nd} und 65^{Tb} , die in der Natur nicht vorkommt, und die Trennung aufgrund des relativ großen Unterschieds in den Ionenradien der dreiwertigen Lanthanoide im Vergleich zu direkt benachbarten Elementen deutlich erleichtert. Ein weiterer Vorteil ist die Abwesenheit radioaktiver Elemente wie Thorium und Uran.

Im Projekt gelang die Rückgewinnung von Seltenen Erden in Form von Oxiden. Für den Einsatz in Magneten werden jedoch die entsprechenden Metalle benötigt. Die Reduktion der Oxide zu den Metallen wurde im Rahmen des Projektes nicht weitergehend untersucht. Die erzeugten Konzentrate können aber mit den heute kommerziell eingesetzten Prozessen zu Metallen reduziert werden.

3.6. Ökologische Bewertung

Ergänzend zur technischen Entwicklung der verschiedenen Recycling- und Aufbereitungs-Verfahren für Motoren und Magnete wurde begleitend eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt. Die LCA-Arbeiten orientierten sich an den in ISO 14040/14044 festgelegten vier Phasen einer Ökobilanz: der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung. Zudem wurden für zuvor ermittelte aussichtsreiche Detailvarianten der Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die weitere Erkenntnisse für die Optimierung der Verfahren für das Gesamtprojekt lieferten. Weiterhin wurde unter Einbindung eines unabhängigen Experten ein Critical Review nach EN DIN ISO 14040 im Rahmen eines begleitenden Review-Prozesses für die Ökobilanzen durchgeführt.

Die ökologische Wirkung der drei Wiederverwendungs- und Recyclingkonzepte (funktionelle Wiederverwendung, Recycling des Magnetmaterials sowie Rückgewinnung der Rohstoffe) wurde jeweils mit dem Fußabdruck der jeweiligen Primär-Produktion (NdFeB-Magnete bzw. Selten-Erd-Oxide) verglichen. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen konnte kein direkter Vergleich der Konzepte untereinander vorgenommen werden.

Es stellte sich heraus, dass die drei Verfahren hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks in den betrachteten Wirkungskategorien (Kumulierter Energie-Aufwand, Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs, Treibhauspotenzial, Eutrophierung, Versauerung, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial) besser abschneiden als die entsprechende Primär-Herstellung. Die Richtungssicherheit der jeweiligen Ergebnisse ist hoch. Die jeweilige Wahl des Verfahrens in der Praxis wird vom Verschmutzungsgrad der Magnete und der Marktnachfrage abhängen. Die Ergebnisse basieren (Ausnahme Recycling des Magnetmaterials) jedoch überwiegend auf Laboraten. Skaleneffekte bei Automatisierung und Upscaling, d.h. Minderungspotenziale sind ebenso denkbar wie auch ggf. erhöhte Aufwendungen für die Motordemontage und Magnetabtrennung im Falle einer Automatisierung. Die Ergebnisse der Ökobilanzen sind jedoch so robust, dass von einer Richtungssicherheit, d.h. ökologischen Vorteilhaftigkeit der Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren sicher ausgegangen werden kann.

Die Wirkungskategorie Strahlenbelastung wurde aus methodischen Gründen und Datengründen heraus nicht in den Ökobilanzen quantifiziert. Ungeachtet dessen besteht hier ein weiterer großer ökologischer Vorteil im Falle der Wiederverwendung bzw. dem werkstofflichen oder rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten gegenüber der Primärroute. Die vielversprechenden Ergebnisse legen nahe, die entwickelten Verfahren weiter zu entwickeln und möglichst zur industriellen Reife zu bringen. Die detaillierten Ergebnisse sind in [15] dokumentiert.

3.7. Entwicklung eines Closed-Loop-Szenarios

Eine Aufgabe des Projektes war die Entwicklung eines ganzheitlichen Recyclingkonzepts für Elektromotoren am Ende des Ersteinsatzes. Die Rückgewinnung der Rohstoffe wurde als der vielversprechendste Weg für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgewählt, da die oben vorgestellten Ergebnisse eine direkte Wiederverwendung (ReUse) praktisch ausschließen. Zur Entwicklung des ganzheitlichen Recyclingkonzepts (Closed-Loop) wurden neben den Aufbereitungsverfahren auch die entsprechenden Demontage- und Logistikketten betrachtet. Diese bilden eine Voraussetzung für ein erfolgreiches Recycling.

Zunächst wurde eine Marktanalyse zur Ermittlung der in Zukunft für das Recycling zur Verfügung stehenden Menge an Magnetmaterial durchgeführt. Grundlage der Berechnungen bildete das bereits erwähnte GLOMO [9]. Dieses prognostiziert die Anzahl an Elektrofahrzeugen, die zwischen 2012 und 2030 in Europa auf den Markt kommen und am Ende ihres Lebenszyklus potentiell für ein Recycling zur Verfügung stehen werden. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeuge von 15 Jahren [7] und der Annahme, dass durchschnittlich 32,4 Prozent der Fahrzeuge pro Jahr den Betrachtungsraum Europäische Union verlassen werden [10] ergibt sich ab dem Jahr 2027 eine kontinuierlich wachsende Menge an Elektrofahrzeugen und somit an verwertbarem Magnetmaterial.

Anschließend wurde das folgende Closed-Loop-Szenario detailliert betrachtet: Den Beginn der Demontage- und Logistikkette stellt ein Altfahrzeugverwerter dar. Bei diesem werden aus dem Altfahrzeug der Elektromotor bzw. das Hybrid-Getriebe (mit integriertem Elektromotor) demontiert. Wie in anderen Branchen auch, steht bei der Altfahrzeugverwertung der Materialerlös den Demontagekosten gegenüber. Für sortenreine Metalle wie Aluminium, Magnesium oder Kupfer sind deutlich höhere Erlöse pro Kilogramm erzielbar als für ein Kilogramm gemischten Pkw-Schrott. Daher werden heute bereits Fahrzeugkomponenten mit einem höheren Anteil an Leicht- oder Buntmetallen demontiert, um auf diese Weise höhere Erlöse zu erzielen. Daher sind die aus dem Elektro/Hybrid-Fahrzeug ausgebauten Komponenten *Getriebe* und *Stator* wirtschaftlich rezyklierbar. Bis zu diesem Demontagestand angefallene Kosten müssen nicht durch im Rotor enthaltene Bestandteile getragen werden.

Für anschließende Demontageschritte sind weitere Demontageakteure und unterschiedliche Szenarien denkbar. Durch eine Spezialisierung auf die Magnetdemontage und eine Zentralisierung der notwendigen Arbeiten entstehen Kostenvorteile. Das im Projekt als kostengünstigstes identifizierte Szenario sieht vor, dass die Demontage des Getriebes,

des Elektromotors und die Trennung von Rotor und Stator beim Altfahrzeugverwerter durchgeführt werden. Der Rotor wird unabhängig von seiner Bauart anschließend zu einer zentralen Demontageanlage transportiert und dort demontiert, ehe der Transport der Magnete zu einer zentralen Magnetaufbereitungsanlage erfolgt. In dieser Anlage werden die Magnete mit einem Prozess wie in Kapitel 3.5. beschrieben aufbereitet.

Kosten entstehen also für Transport, Demontage, Personal sowie die hydrometallurgische Separation, die sich wiederum zusammensetzen aus Investitions-, Personal- sowie Chemikalienkosten. Ausgehend von den im Projekt entwickelten Prozessen für Demontage und Aufbereitung wurden diese Kosten abgeschätzt und den möglichen Erlöse, die aus den Altmagneten erzielt werden können, gegenübergestellt. Daraus wurde deutlich, dass mit dem aktuellen Stand der Technik theoretisch Gewinne erzielt werden können, die jedoch sehr stark abhängig von dem Anteil der hochwertigen schweren SE Dysprosium und Terbium in den Magneten und der generellen Preisentwicklung der Seltenen Erden sind.

Obwohl weltweit Aktivitäten zum Recycling von Seltenen Erden stattfinden, unterliegt die Rückgewinnung der Selten-Erd-Metalle aus Magneten v.a. in Deutschland derzeit noch vielen Hemmnissen. Dazu gehören u.a. die folgenden Punkte:

- End-of-Life-Produkte werden vielfach in Drittländer exportiert und stehen damit für ein Recycling im Ursprungsland der Produktion nicht zur Verfügung. Dies gilt insbesondere für Gebrauchtwagen, die schon vor endgültigem EoL einen Käufer als zweite Hand im Ausland finden.
- Die Verfügbarkeit von Produkten mit großen Anteilen an rezyklierbaren Seltenen Erden ist aufgrund der hohen Lebenserwartung (z.B. Magnetmaterial in Windturbinen) gering. Der Magnetanteil in kleineren mit kürzerer Lebensspanne ist hingegen oft sehr gering (z.B. 2 g Magnet/Festplatte). Die Demontage für die gezielte Rückgewinnung dieser Magnete ist daher oft unverhältnismäßig aufwändig.
- Es existiert bisher nicht die benötigte Infrastruktur mit effizienten Sammelsystemen oder Demontage- und Weiterverarbeitungsanlagen für eine großtechnische Umsetzung [3, 13]. Da keine Recyclingkette etabliert ist, gibt es auch keine Abnehmer für die Schrotte und daher gibt es bislang auch wenige Bemühungen, die Sammelmenge zu erhöhen.
- Von der Entsorgungswirtschaft wird der Wert von Magnetschrott aufgrund der hohen Rohstoffpreise oft überbewertet. Im Gegensatz zu Metallen wie Kupfer, die in großem Maßstab wieder aufbereitet werden, kann für das Magnetschrottmaterial aufgrund der aufwändigeren Aufbereitung kein Schrottpreis geboten werden, der bei 90 Prozent des Materialneupreises liegt.
- Schon während des Sammelns muss eine Unterscheidung der Magnetarten (NdFeB, SmCo, Ferrite) erfolgen, um Abnehmer für den Magnetschrott zu finden, weil die momentan erforschten Aufbereitungsverfahren sortenreine Magnetschrottströme voraussetzen. Da die Magnete nicht gekennzeichnet sind, erfordert die Unterscheidung technische Analyseverfahren.

- Die Kosten für Sammlung und Schrottaufbereitung sind derzeit höher als die Preise für die primären Rohstoffe.
- Es bestehen noch keine Märkte für durch Recycling gewonnene Sekundärrohstoffe.

4. Ausblick

Im Projekt-Konsortium besteht Einigkeit darüber, dass das Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben in Zukunft weiter vorangetrieben werden sollte. Dies gilt insbesondere für die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium, die von entscheidender Bedeutung für die Herstellung von Magneten in den Elektromotoren sind. Obwohl sich die Preise der Seltenen Erden, die zu Beginn des Projektes stark angestiegen waren, inzwischen wieder auf einem relativ niedrigen Niveau eingependelt haben, und auch die chinesischen Exportbeschränkungen aufgehoben wurden, sehen die Partner noch weiteren Forschungsbedarf.

Zum einen sollte die Datenlage zum Einsatz von Neodym und Dysprosium verbessert werden. Die während des Projektes erarbeiteten Ergebnisse zur Ökobilanzierung geben bereits erste Impulse für die Verbesserung bzw. Aktualisierung der Datenlage zur Primärherstellung von Seltenen Erden in den nächsten Jahren.

Zum anderen müssen die Bedingungen für eine Kreislaufführung gerade im Hinblick auf Selten-Erd-Magnete verbessert werden: Während innerhalb des Automobilssektors durch die gesetzlichen Regelung schon ein hochwertiges Verwertungsregime vorliegt, in dem die Materialien eines jeden Motors bekannt sind, ist das bei den meisten anderen Produkten nicht der Fall.

Die Absicherung der Versorgung mit Rohstoffen gewinnt für die in Fahrzeugen eingesetzten Materialien zunehmend an Bedeutung. Für das Recycling der Fahrzeuge an ihrem Einsatzende besteht aus ökologischer und ökonomischer Sicht ein hohes Potential, um den Grad der Rohstoff-Absicherung zu erhöhen. Für die Seltenen Erden, die in den Hochleistungsmagneten von elektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden, konnte im Projekt ein ganzheitliches Recyclingkonzept entwickelt werden. Zudem erscheint es möglich, dass eine Übertragung der in diesem Projekt gewonnenen Recyclingtechnologien und Konzepte auf andere Einsatzfälle von hocheffektiven Magneten (z.B. Generatoren von Windkraftanlagen, Antriebe für Traktionsmotoren außerhalb des PKW-Sektors, Stellmotoren in Fertigungsanlagen und Anwendungen im Medizintechnikbereich) im Erfolgsfall stattfinden kann.

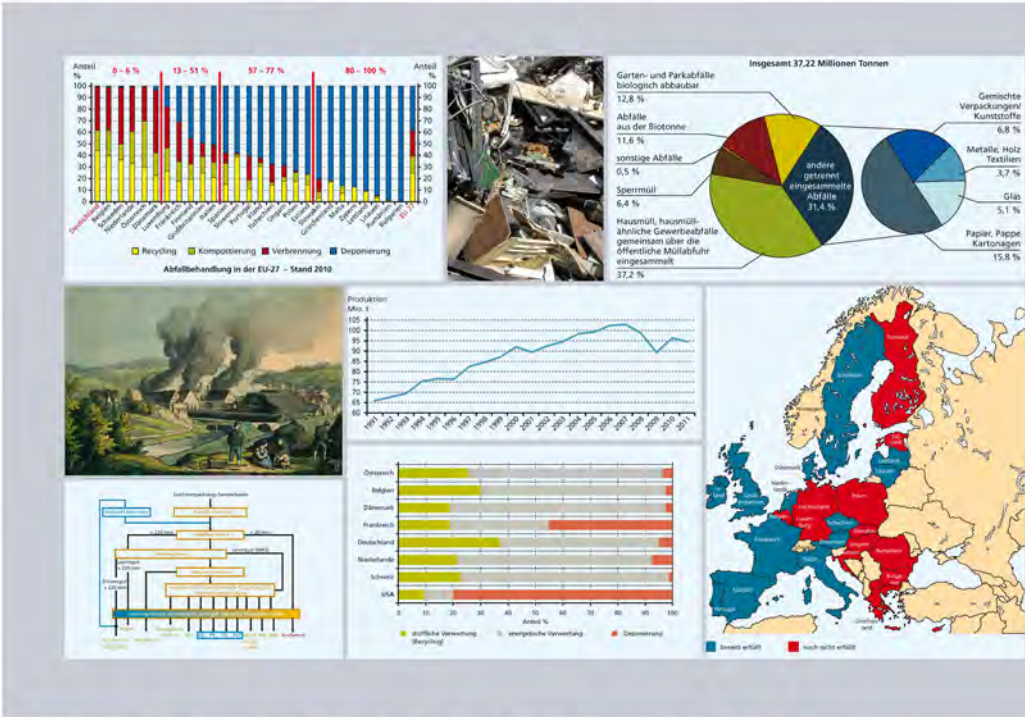
Danksagung

Das Projekt Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben – MORE wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziell gefördert. Der Dank der Autorin gilt allen beteiligten Kollegen und Projektpartnern für die hervorragende Zusammenarbeit und die großzügige Bereitstellung von Inhalten und Abbildungen.

5. Literatur

- [1] Angerer, G.: Abschätzung der globalen Angebotsentwicklung von ausgewählten Metallen der Seltenen Erden für Magnetwerkstoffe. Teilbericht im Rahmen des MORE-Projektes, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2012
- [2] Bast, U.; Blank, R.; Buchert, M.; Elwert, T.; Finsterwalder, F.; Hörnig, G.; Klier, T.; Langkau, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Müller, J.-O.; Thürigen, Ch.; Treffer, F.; Walter, T.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben – MORE (Motor Recycling), Abschlussbericht, TIB Hannover, Veröffentlichung geplant
- [3] Binnemans, K.; Blanpain, B.; Buchert, M.; Gerven, T.; Jones, T.; Walton, A.; Yongxian, Y.: Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, S. 1–22, 2013
- [4] Elwert, T.; Goldmann, D.: Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete, Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 147–159
- [5] Elwert, T.; Goldmann, D.; Römer, F.: Separation of lanthanides from NdFeB magnets on an mixer-settler plant with PC-88A. *World of Metallurgy – Erzmetall*, Band 67, Nr. 5, S. 287-296, 2014
- [6] EU-Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge
- [7] Höpfner, U.; Hanusch, J.; Lamprecht, U.: *Abwrackprämie und Umwelt – eine erste Bilanz*, IFEU Heidelberg, Heidelberg, 2009
- [8] Kaindl, M.; Poscher, A.; S. Luidold, S.: Kreislaufschließung beim Recycling von Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 321–339
- [9] Kühn, A.; Novinsky, P.; Schade, W.: *GLOMO – Global Mobility Model – Beschreibung und Ergebnisse*, 2014
- [10] Merz, C.; Mehlhart, G.: *Import und Export von Gebrauchtfahrzeugen in Europa*. Öko-Institut, Darmstadt, 2012
- [11] Otto, R.; Wojtalewicz, A.: Verfahren zur Rückgewinnung Seltener Erden aus Leuchtstofflampen. Deutschland Patent DE 10 2006 025 945 A1. 2007
- [12] Roskill, *Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015*. Fourteenth Edition, Roskill Information Services Ltd., London, 2011
- [13] Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: *Study on Rare Earths and Their Recycling*, Öko-Institut, 2011
- [14] Technology Metal Research: *TMR Advanced Rare-Earth Projects Index*, : <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/>. Zugriff am 13. 03. 2013
- [15] Walachowicz, F.; March, A.; Buchert, M.; Sutter, J.; Merz, C.: *Abschlussbericht: Verbundprojekt: Recycling von Elektromotoren – MORE Teilprojekt: Ökobilanz der Recyclingverfahren*, Berlin, Darmstadt, 2014

Kostenfreie Artikel



Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky • Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

WIE FINDE ICH DIE FÜR MICH INTERESSANTEN FACHARTIKEL?

www.vivis.de

Möglichkeit 1: Fachartikel-Suche nach Thema

Wenn Sie Artikel zu einem bestimmten Thema suchen, dann beachten Sie bitte den Bereich auf der linken Seite. Hier sind die Oberbegriffe alphabetisch aufgelistet. Teilweise untergliedern Sie sich noch in Unterthemen. Wenn Sie eines dieser Themen anklicken, finden Sie die dazu passenden, bei uns verfügbaren Beiträge mit den zugehörigen bibliographischen Angaben.

Möglichkeit 2: Fachartikel-Suche nach Tagung

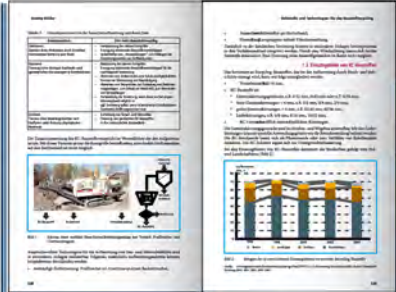
Wenn Sie Artikel zu einer bestimmten Konferenz/aus einem bestimmten Tagungsband suchen, gehen Sie in den Bereich Fachbücher. Dort sind die im TK Verlag erschienenen Bücher – thematisch geordnet – zu finden. Haben Sie das gesuchte Buch gefunden, folgen Sie dem Link Inhaltsverzeichnis. Durch klicken auf den Beitragstitel öffnet sich ein Fenster mit dem gesuchten Beitrag im PDF-Format. Dieser kann einfach und schnell heruntergeladen werden.

Möglichkeit 3: Fachartikel-Suche nach Autor

Wenn Sie Artikel von einem bestimmten Autor suchen, nutzen Sie das Suchfeld rechts oben. Kostenfreie Artikel sind dadurch zu erkennen das links neben dem Ergebnis das Zeichen [PDF] zu finden ist.

Zurzeit befindet sich die Seite noch im Aufbau.

Sollten Sie Interesse an mehreren Beiträgen aus dem gleichen Buch haben, bietet es sich an dieses direkt bei uns zu bestellen. Bei Fragen wenden Sie sich gern an uns.



Dorfstraße 51
 D-16816 Nietwerder-Neuruppin
 Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
 E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky