

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben

Kennwort: MORE (Motor Recycling)



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FKZ: 03X4622

Projekträger: PTJ, Jülich

**Berichtszeitraum: Gesamtlaufzeit
01.05.2011 bis 31.08.2014**

Autoren:

U. Bast¹, R. Blank⁴, M. Buchert⁷, T. Elwert⁶, F. Finsterwalder², G. Hörnig¹, T. Klier⁵,
S. Langkau⁸, F. Marscheider-Weidemann⁸, J.-O. Müller¹, Ch. Thürigen², F. Treffer³,
T. Walter²

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zuwendungsempfänger:

¹ Siemens AG, Corporate Technology, Otto-Hahn-Ring 6, 81379 München (Federführung)

² Daimler AG, Stuttgart

³ Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang

⁴ Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau

⁵ Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Erlangen

⁶ Technische Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Clausthal-Zellerfeld

⁷ Öko-Institut e.V., Darmstadt

⁸ Fraunhofer -Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe

Inhalt

1.	Zusammenfassung	1
2.	Zielstellung und der Beschreibung des Vorhabens	3
3.	Struktur des Projekts und Zusammenarbeit der Partner.....	7
4.	Wissenschaftliche und technische Arbeitsergebnisse des Vorhabens.....	8
4.1	AP 1 Rohstoff-, Stoffstrom- und Technologieanalysen	8
4.1.1	AP 1.1 Rohstoffanalysen	8
4.1.2	AP 1.2 Stoffstrom- und Technologieanalysen.....	13
4.2	AP 2 Reparatur- und recyclinggerechtes Design des elektrischen Antriebsstranges.....	22
4.3	AP 3 Demontage und Wiederverwendung – funktional	23
4.3.1	AP 3.1 Befundung und Diagnose	23
4.3.2	AP 3.2 Reparatur- und Wiederverwendung von Elektromotoren.....	30
4.3.3	AP 3.3 Demontageverfahren und Vereinzelung von Magneten aus Elektromotoren sowie deren Entmagnetisierung	31
4.3.4	AP 3.4 Konzeptentwicklung und Demonstratoren für Automatisierungslösungen.....	39
4.3.5	AP 3.6 High-End-Analytik	46
4.4	AP 4 Stoffliche Verwertung.....	48
4.4.1	AP 4.1 Werkstoffliche Verwertung.....	48
4.4.2	AP 4.2 Rohstoffliche Verwertung	53
4.5	AP 5 Wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen.....	75
4.5.1	AP 5.1 Ökobilanzen und Ökoeffizienzanalyse.....	75
4.5.2	AP 5.2 Untersuchung von Zweitmärkten für rezyklierte Produkte	78
4.5.3	AP 5.3 Gewinn an Versorgungssicherheit	80
4.6	AP 6 Entwurf zukunftsfähiger Kreislaufwirtschaftsstrukturen	82
4.6.1	AP 6.1 Ganzheitliches Recyclingkonzept	82
4.6.2	AP 6.2 Geschäftsmodelle und Verwertungskette.....	98
4.6.3	AP 6.3 Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft.....	100
5.	Ausblick.....	104
	Literaturverzeichnis	106
	Anhang: Verzeichnisse	110
	Formeln	110
	Liste der Abkürzungen	110
	Abbildungsverzeichnis	111
	Tabellenverzeichnis	113

1. Zusammenfassung

Elektromobilität ist ein wichtiger Bestandteil des integrierten Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung. Viele Rohstoffe, die für die Elektromobilität benötigt werden, werden derzeit nur an wenigen Orten der Erde abgebaut. Dies gilt insbesondere für Selten-Erd-Metalle, die unverzichtbare Bestandteile der für kompakte und leichte Synchronmotoren benötigten Hochleistungsmagnetwerkstoffe sind. Die Rohstoffsituation in Deutschland ist aber bei den Selten-Erd-(SE)-Metallen, z.B. Neodym (Nd), Dysprosium (Dy), Praseodym (Pr) und Terbium (Tb) durch eine fast vollständige Abhängigkeit von Importen gekennzeichnet. Die Europäische Kommission hat im Juni 2010 den Entwurf ihres Berichts über kritische Rohstoffe vorgelegt. Die SE-Metalle wurden demnach in die Liste der kritischen Rohstoffe für die Europäische Union aufgenommen.

Aufgrund der erwarteten steigenden Nachfrage und Stückzahlen im Bereich von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird auch ein extrem starker Anstieg des Bedarfs an diesen Magnetmaterialien prognostiziert. Zusätzlich werden andere Anwendungen, wie z.B. Generatoren von Windturbinen sehr große Mengen dieser Materialien benötigen. Da derzeit über 90 % der Seltenen Erden aus China stammen und zu Beginn des Projektes die chinesische Regierung Exportzölle erhob sowie eine Exportbeschränkung angekündigt hat, wurde eine Rohstoffverknappung und eine entsprechende Preissteigerung im Bereich dieser Metalle erwartet. Dies führte weltweit zu ernsthaften Debatten über die Versorgungssicherheit bzgl. dieser Materialien. Zudem ist die Primärproduktion der Seltenen Erden und ihrer Verbindungen in der Volksrepublik China häufig im Zusammenhang mit ernststen Umweltbelastungen zu sehen.

Dem erheblichen Wettbewerbsnachteil der deutschen Industrie im globalen Markt aufgrund geringer Rohstoffvorkommen im eigenen Land soll zunehmend mit Recycling entlang der kompletten Wertschöpfungskette begegnet werden. Im Falle der Elektromobilität sind die Hersteller der Magnete sowie die Motoren- und Fahrzeughersteller betroffen. Durch die große Hebelwirkung besteht ein Gefährdungspotenzial nicht nur für mehrere Schlüsselindustrien der deutschen Wirtschaft (Automobil, Elektrotechnik), sondern auch für die in diesem Bereich typische große Zahl von mittelständischen Zulieferbetrieben. Die Wiederverwendung und -verwertung (Recycling) von E-Motoren und deren Komponenten sowie der enthaltenen wertvollen Magnetwerkstoffe ist somit eine vordringliche Aufgabe. Entsprechende Technologien standen zum Projektbeginn aber noch nicht zur Verfügung.

Während des Projektes wurde die Wiederverwendung von Motoren untersucht. Es zeigte sich, dass Schäden, die bei Motoren auftreten, bereits jetzt repariert werden. Zudem werden in Zukunft keine Anwendungsfälle für die direkte Motorenwiederverwendung erwartet, die einen Austausch der Magnete erforderlich machen. Langzeitversuche im Betrieb bei Daimler konnten zeigen, dass die Magnete im Betrieb nicht beschädigt werden. Des Weiteren wurde geprüft, ob eine Wiederverwendung der Magnete selbst möglich ist. Es wurden Verfahren entwickelt, die eine zerstörungsfreie Demontage von sowohl vergrabenen als auch oberflächenmontierten Magneten ermöglichen. Nach einer Entmagnetisierung und Entfernung von auf der Magnetoberfläche befindlichen Klebstoffresten können die Magnete prinzipiell wieder eingesetzt werden. Aufgrund der verschiedenen eingesetzten Geometrien und Legierungen sowie der fortlaufenden Weiterentwicklung der Magnetmaterialien wird dieser Recyclingweg aber als unwahrscheinlich erachtet.

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 eher auszuschließen ist. 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) komplett in die Herstellung neuer Magnete zurückfließen und kann so einen eventuellen Bedarfsengpass abdecken.

Folgerichtig lag ein weiterer Schwerpunkt des Projektes auf dem stofflichen Recycling der in Elektromotoren eingesetzten Magnetmaterialien. Hier kann zwischen einer werkstofflichen sowie einer rohstofflichen Aufbereitung unterschieden werden. Es zeigte sich, dass das werkstoffliche Recycling, bei dem das aufzubereitende Magnetmaterial mittels Wasserstoffversprödung zerkleinert und anschließend zusammen mit Primärrohstoffen wieder zu Magnetmaterial verarbeitet wird, prinzipiell möglich ist. Allerdings büßen die so entstehenden Magnete ca. 3 % ihrer Remanenz ein, so dass die Chancen, ein derartiges Material zu vermarkten, als sehr gering bewertet werden.

Für das rohstoffliche Recycling stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Bei der pyrometallurgischen Aufbereitung wird das Magnetmaterial eingeschmolzen und die enthaltenen Seltenen Erden sammeln sich in der entstehenden Schlacke. 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 bevorzugt die hydrometallurgische Aufbereitung der Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) Magnete untersucht. Nach dem Lösen der Magnete in Salzsäure wurden Eisen, Kobalt und andere störende Stoffe abgetrennt. Zur Rückgewinnung der Selten-Erd-Oxide wurden verschiedene Verfahren in Betracht gezogen, wobei das größte Potenzial zur Trennung in Leichte und Schwere Seltene Erden der Solvent-Extraktion zugeschrieben wurde. Mit dieser Methode konnten ein Nd/Pr- sowie ein Dy/Tb-Gemisch mit einer Reinheit von jeweils > 99 % hergestellt werden. Letztlich gelang die Rückgewinnung von Seltenen Erden in Form von Oxiden. Für den Einsatz in Magneten werden jedoch die Metalle der Seltenen Erden benötigt. Die Reduktion der Oxide zu den Metallen konnte im Rahmen des Projektes bzw. zum Zeitpunkt der Beantragung von keinem passenden Partner durchgeführt werden und wurde deshalb nicht betrachtet.

Ergänzend zur technischen Entwicklung der verschiedenen Recycling- und Aufbereitungs-Verfahren für Motoren und Magnete wurde eine Umweltbetrachtung (LCA) durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass sämtliche Wiederverwendungs- und Recycling-Verfahren hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks (GWP u.a.) besser abschneiden als die Primär-Gewinnung der entsprechenden Selten-Erd-Oxide bzw. der NdFeB-Magnete.

Abschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die favorisierte Recyclingroute, das rohstoffliche Recycling, durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass zukünftig große Mengen an Magnetmaterial aus der Elektromobilität für das Recycling zur Verfügung stehen werden. Die möglichen Erlöse, die aus den Altmagneten erzielt werden können, wurden berechnet und dienten als Grundlage zur Ermittlung der Marktgröße und der möglichen Erlöse des Magnetrecyclings. Es wurde deutlich, dass mit dem aktuellen Stand der Technik Gewinne erzielt werden können, die stark abhängig von dem Dysprosiumanteil in den Magneten und der Preisentwicklung der Seltenen Erden sind.

2. Zielstellung und der Beschreibung des Vorhabens

Das Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ geförderten Verbundvorhabens *MORE – Motor-Recycling* war die Entwicklung von spezifischen und innovativen Konzepten und Technologien für das Recycling von Komponenten und Materialien des Antriebsstrangs von Elektro- und Hybridfahrzeugen. Verschiedene Stufen des Recyclings, d.h. sowohl die Wiederverwendung von Komponenten als auch die stoffliche Verwertung, wurden erforscht, um für jeden Anwendungsfall die ökologisch und wirtschaftlich besten Lösungen zu bieten. Im Mittelpunkt stand die Rückgewinnung von NdFeB-Magneten bzw. der darin enthaltenen Seltenen Erden. 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 aus einer Kreislaufwirtschaft
- Erhöhung der Versorgungssicherheit und der Kostensicherung
- Verbesserung der Ressourceneffizienz und der Klimaschonung
- Abfallvermeidung als Bestandteil nachhaltiger industrieller Produktion.

Das Verbundprojekt MORE ist in sechs Arbeitspakete untergliedert, deren zeitliche Abfolge ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens:

AP Nr.	Arbeitspaket	Koordination / Aufwand d. Verbundes	Zeitplan (vereinfachtes Gantt Chart)															
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12				
1	Rohstoff-, Stoffstrom- und Technologieanalysen <ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffanalysen • Stoffstrom- und Technologieanalysen 	Fraunhofer ISI / 17,0 PM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
2	Recyclinggerechtes Design	Daimler / 36,5 PM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
3	Demontage und Wiederverwendung – funktional <ul style="list-style-type: none"> • Befundung und Diagnose • Reparaturverfahren • Demontageverfahren/ Vereinzeln von Magneten • Mechanisierung und Automatisierung • Demonstratoranlage • High-End-Analytik 	Siemens / 114,8 PM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	Stoffliche Verwertung	Umicore / 141,6 PM		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.1	Werkstoffliche Verwertung <ul style="list-style-type: none"> • Rückführung gebrauchter Magnetwerkstoffe in den Produktionsprozess • Oberflächenentschichtung von Magnetmaterial • Bestimmung der Eigenschaften von rezykliertem Magnetmaterial • Einsatz von Recyclingmaterial für elektrische Fahrtriebe 																	
4.2	Rohstoffliche Verwertung <ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung der Optionen für Aufbereitungsverfahren • Mechanische Grobaufbereitung von Motorenschrott • Mechanische Feinaufbereitung von Motorenschrott • Metallurgische Verfahren zur Verarbeitung von Metallmischkonzentraten • Rückgewinnung von SEM aus Stäuben und Schlacken • Prozessstudie zur Selten Erden Raffination 		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen <ul style="list-style-type: none"> • Ökobilanzen und Ökoeffizienzanalyse • Zweitmärkte für rezyklierte Produkte • Gewinn an Versorgungssicherheit 	Siemens / 47,9 PM			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	Entwurf zukunftsfähiger Kreislaufwirtschaftsstrukturen <ul style="list-style-type: none"> • Ganzheitliches Recyclingkonzept • Geschäftsmodelle und Verwertungskette • Roadmap für künftige Kreislaufwirtschaft 	Daimler / 18,5 PM	■	■			■	■			■	■			■	■	■	

AP 1 Rohstoff-, Stoffstrom- und Technologieanalysen

In diesem Arbeitspaket sollte die künftige Versorgungslage bei den Seltenen Erden abgeschätzt werden. Die aufgrund der Verteuerung dieser Rohstoffe ausgelösten Bergbauaktivitäten außerhalb Chinas sollten systematisch erfasst und hinsichtlich ihres zukünftigen Beitrags zur Versorgung des Weltmarkts bewertet werden. Zudem sollte die globale Bedarfsentwicklung von Neodym und Dysprosium aus allen Applikationen abgeschätzt und mit der erwarteten Weltproduktion verglichen werden, um drohende Versorgungsengpässe aufzuzeigen. Das Recycling und die Gewinnung von Sekundärrohstoffen wurden in die Betrachtungen einbezogen.

Um die aufzubauende Technologieentwicklung für die Kreislaufführung der Seltenen Erden in die bestehende Entsorgungslandschaft einzubetten, wurde die gegenwärtige Praxis der Entsorgung von Elektromotoren, die beteiligten Akteure und die eingesetzten Technologien erfasst und analysiert. Ziel war die Erstellung eines Fließschemas der Stoffströme in Deutschland und der globalen Entsorgungspraxis und eine grobe Abschätzung des Sekundärrohstoffaufkommens in der Welt. Der Stand der Technik zur Kreislaufführung von Komponenten, Werkstoffen und Rohstoffen sowie deren Applikation sollten erfasst werden. Zudem sollte die gegenwärtige wirtschaftliche Situation und Attraktivität sowie die Deckungsbeiträge der Wertstoffe abgebildet werden. Zudem war es Ziel, Treiber und Hemmnisse der Kreislaufführung herauszuarbeiten und die Einflüsse technologischer Trends zu ermitteln.

AP 2 Reparatur- und recyclinggerechtes Design des elektrischen Antriebsstranges

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung von reparatur- und recyclinggerechten Fertigungs-, Aufbau- und Verbindungstechniken für den Antriebsstrang von Fahrzeugen. Diese sollten zudem hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Durchführbarkeit und ihrer Auswirkung auf die Konstruktion untersucht werden. Ebenso wurde die Eignung für den Dauereinsatz in Fahrzeugen betrachtet. Hauptziel neben dem sicheren Betrieb über die erwartete Lebensdauer war eine problemlose Demontage, welche die Wiederverwendung intakter Komponenten mit möglichst geringem Zusatzaufwand erlaubt.

AP 3 Demontage und Wiederverwendung – funktional

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung von Strategien, Szenarien und Konzepten für nicht-zerstörende Trenn- und Demontage-Verfahren, die eine wirtschaftliche Reparatur der elektrischen Fahrtriebe zulassen. Darüber hinaus sollte durch die gewonnenen Erkenntnisse eine geeignete Prozesskette zur Demontage und Wiederverwendung der strategisch wichtigen Elektromotor-Materialien entwickelt werden. Des Weiteren wurden Schnittstellen zur stofflichen Wiederverwertung (s. AP 4) im Hinblick auf die Gesamtkette aufgezeigt. Ebenso sollten Design-Regeln für den elektrischen Antriebsstrang abgeleitet werden (vgl. AP 2).

AP 4 Stoffliche Verwertung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung von geeigneten Verfahren für das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling von NdFeB-Magneten. Die nötigen Voraussetzungen für eine direkte werkstoffliche Verwertung des Magnetmaterials (Gewinnung kompakter, von Oberflächenbeschichtungen und Klebstoffen befreiter, sortenreiner, nicht oxidierten Magnetstücke) mussten durch die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Abtrennung des Magneten bzw. von Teilen des Magneten aus dem Motor sowie durch Abtrag der Beschichtungen und Klebstoffe von den Oberflächen geschaffen werden. Der so zurückgewonnene Werkstoff sollte direkt wieder in den Stoffkreislauf der Magnetproduktion eingeführt werden. Anschließend sollten die magnetischen Eigenschaften des Magnetmaterials, das mit dem recycelten Werkstoff gefertigt wurde, bestimmt sowie dessen Eignung für den Einsatz in elektrischen Fahrtrieben evaluiert werden.

Zusätzlich sollte ein pyrometallurgischer Aufbereitungsprozess zur Rückgewinnung von Selten-Erd-Oxiden über die Erstellung einer Selten-Erd-reichen Schlacke untersucht werden. Die betrachteten Verfahren umfassen die mechanische Aufbereitung der Komponenten im Grob- und Feinbereich sowie metallurgische Prozessschritte und die Rückgewinnung aus Prozessschlacken und -stäuben.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der hydrometallurgischen Rückgewinnung und Trennung der Selten-Erd-Oxide. Die Reduktion dieser Oxide zu den Metallen wurde nicht betrachtet.

AP 5 Wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen

In diesem Arbeitspaket erfolgte im Rahmen einer begleitenden Untersuchung die Durchführung einer Ökobilanzierung (LCA) für die entwickelten Verfahren zur Wiederverwendung bzw. für das stoffliche Recycling der Komponenten und Materialien von Elektromotoren. 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.

Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspakets war die Identifikation möglicher (nicht-)automobiler Zweitmärkte, welche die Umsatz- und Erlössituation der rezyklierten Produkte aller Wertschöpfungsstufen verbessern können.

AP 6 Entwurf zukunftsfähiger Kreislaufwirtschaftsstrukturen

Aufgabe dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines ganzheitlichen Recyclingkonzepts am Ende des Ersteinsatzes (End of (first) life) der Elektromotoren, das nicht nur die stoffliche Verwertung der Permanentmagnete umfasst, sondern auch die Weiterverwendung des Elektromotors bzw. seiner Komponenten in ihrer Funktion. Dies entspricht einer umfassenden technischen, ökologischen und ökonomischen Betrachtung des Recyclings unter Berücksichtigung der realen Stückzahlen, der Ausfallszenarien und des tatsächlichen Bedarfs. Dabei kann weiter untergliedert werden in:

- ReUse: Wiederverwendung der Komponente ohne größere Aufbereitungsarbeiten.
- RePair: Tausch bzw. Reparatur defekter (Sub-)Komponenten.
- ReMan: Komplettzerlegung des Motors in Sub-Komponenten, die nach Begutachtung einem „Ersatzteillager“ zugeführt werden. Der anschließende Wiederaufbau des Motors erfolgt im Wesentlichen aus Altteilen unterschiedlicher Herkunft.

Alt- bzw. Defekt-Komponenten, die für eine Wiederverwendung nicht mehr in Frage kommen, werden als Ultima Ratio der stofflichen Verwertung (AP 4) zugeführt. Welche Art der Wiederverwendung bzw. stofflichen Verwertung in welchem Umfang zu bevorzugen ist, hängt von ökonomischen und ökologischen Randbedingungen ab und sollte in diesem Arbeitspaket näher untersucht werden.

Die erwarteten Zwischenergebnisse des Projektes sind in Tabelle 2 gelistet. Aufgrund der tatsächlich erarbeiteten Ergebnisse ergaben sich jedoch geringfügige Änderungen in der Zielstellung während der Projektlaufzeit. Zum Einen wurde von der Konzeption eines standardisierten Modulbaukastens für die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (E-Maschine und Schnittstellen mit angrenzenden Komponenten wie z.B. Leistungselektronik) abgesehen. Bei Beantragung des Projektes wurde erwartet, dass durch eine begrenzte Anzahl von Standard-Subkomponenten maximale Variantenfähigkeit bei den verschiedenen Motormodellen ermöglicht würde und somit insbesondere beim Remanufacturing-Prozess dazu beitragen könnte, die Zahl der vorzuhaltenden Ersatzteile und damit die Lagerkosten erheblich zu senken. Daneben würde die Auf- und Abwärtskompatibilität der Produkte verbessert werden. Da die Projektergebnisse jedoch zeigten, Remanufacturing quasi nicht auftritt, wurde entschieden, dieses Projektzwischenresultat nicht weiter zu forcieren.

Eine weitere Änderung ergab sich für die metallurgische Aufbereitung der Magnetschrotte. Bei Beantragung des Projektes wurde davon ausgegangen, dass die Selten-Erd-Oxide in einem pyrometallurgischen Prozess aus der entstehenden Schlacke zurückgewonnen werden können. Die entsprechend durchgeführten Versuche sowie die zusätzlich durchgeführte hydrometallurgische Aufbereitung zeigten, dass das nasschemische Verfahren mehr Potential für eine effiziente

Rückgewinnung der Selten-Erd-Metalle birgt. Daher wurde im Konsortium beschlossen, dieses Aufbereitungsverfahren vertieft zu betrachten.

Nach 33 Monaten Projektlaufzeit traten im Projekt Zeitkonflikte auf, die zur Folge hatten, dass die Erstellung der Ökobilanzen und die kritische Durchsicht und Prüfung der Ökobilanzstudie durch einen externen Reviewer (AP 5) nicht mehr vor dem geplanten Projektende am 30.4.2014 abgeschlossen werden konnten. Die vorgelagerten Arbeitspakete, aus denen die Basisdaten für die Erstellung der Ökobilanzen entnommen werden, erforderten eine verlängerte Bearbeitungszeit. So war z.B., ein zusätzlicher Versuch zur Grobzerkleinerung der Motoren erforderlich, um auch diesen Recyclingweg endgültig bewerten zu können. Aufgrund dieser Tatsache wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung von 4 Monaten bis zum 31.08.2014 vom Projektträger genehmigt.

Tabelle 2: Liste der Zwischenergebnisse und Meilenstein

Zwischen- ergebnis	Fälligkeit	Beschreibung
T1-1	Mt. 12	Bericht über Rohstoffanalysen fertig
T1-2	Mt. 24	Bericht zu Stoffstrom und Technologieanalysen fertig
T2-1	Mt. 18	Richtlinien für demontage- und recyclinggerechtes Design liegen vor
T2-2	Mt. 30	Standardisierter Modulbaukasten konzipiert
T3-1	Mt. 18	Demontageverfahren zum Vereinzeln der Magnete entwickelt
T3-2	Mt. 32	Demonstratoranlage funktionsfähig
T4.1-1	Mt. 24	Fertigungsweg zum Einsatz demontierter Magnete entwickelt
T4.1-2	Mt. 24	Einfluss von rezykliertem Magnetmaterial auf die Magnetwerte und die Korrosionsstabilität ermittelt
T4.1-3	Mt. 30	Erster Magnet für den elektrischen Fahrentrieb hergestellt
T4.2-1	Mt. 18	Bewertung der Ergebnisse der Grobaufbereitung hinsichtlich der Einsatzfähigkeit der so rückgewonnenen Magnetmaterialien; Entscheidung über die Ausrichtung der weiteren Metallurgie- und Zerkleinerungsverfahren
T4.2-2	Mt. 30	Abschluss der metallurgischen Versuche; Definition der Materialqualitäten aus der Grob- und Feinaufbereitung für die stoffliche/metallurgische Weiterverarbeitung
T5-1	Mt. 18	Orientierende Ökobilanzen für verschiedene Verfahrensalternativen
T5-2	Mt. 30	Beleg umweltlicher und wirtschaftlicher Vor- bzw. Nachteile der entwickelten Verfahren im Vergleich
T6-1	Mt. 30	Methodik/Modell zur Ermittlung der optimalen Recycling-Strategie liegt vor
T6-1	Mt. 36	Roadmap zur Kreislaufführung strategischer Metalle für Elektromobilität liegt vor
Meilen- stein	Mt. 18	Status-Meeting zur Bewertung der erzielten Zwischenergebnisse und Festlegung aussichtsreicher Verfahrenswege für die weiteren Arbeiten, Entscheidung über Weiterführung des Vorhabens anhand der Kriterien: - Zwischenergebnisse für Monat 18 (s.o.) wurden erreicht - technisch - wirtschaftlich sinnvolle Lösungsansätze für die Erreichung des Gesamtprojekts liegen vor

3. Struktur des Projekts und Zusammenarbeit der Partner

Das vorgestellte Vorhaben ist eine strategische Kooperation zwischen Wissenschaft (Technische Universität Clausthal, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Öko-Institut e.V.) und Industrie (Siemens AG, Daimler AG, Umicore AG & Co KG, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG). Die beteiligten Partner ergänzten sich dabei in vielfältiger Weise. Die Struktur des Projektes und die Beteiligung der Partner an den verschiedenen Arbeitspaketen ist in Abbildung 1 dargestellt.

Regelmäßige, in kurzen Abständen stattfindende gegenseitige Arbeitstreffen dienten dem Erfahrungsaustausch sowie zur Abstimmung der nächsten Schritte in den einzelnen Arbeitspaketen. In verschiedenen Workshops wurden zudem wichtige Ergebnisse für das Projekt gemeinsam erarbeitet, wie z.B. die möglichen Zweitmärkte für Magnete und die Roadmap zur Kreislaufstruktur.

Halbjährliche Projekttreffen dienten dem gemeinsamen Austausch aller Partner mit dem Fördergeber. Nach der Hälfte der Projektlaufzeit fand im November 2012 ein Status-Meeting zur Bewertung der erzielten Zwischenergebnisse und zur Festlegung aussichtsreicher Verfahrenswege für die weiteren Arbeiten statt. Anhand des festgesetzten Meilensteins wurde über die Weiterführung des Vorhabens positiv entschieden, da die entsprechenden Kriterien erfüllt waren.

Zudem wurden monatlich Telefonkonferenzen abgehalten, die der Information der Partner und der kurzfristigen Absprache von Terminen dienten.

Aufgrund der hervorragenden Kommunikation und der engen Zusammenarbeit der Partner konnten frühzeitig eventuelle Stolpersteine und Verzögerungen abgesehen und aus dem Weg geräumt werden, so dass der Ablauf des Projektes zu keiner Zeit gefährdet war.

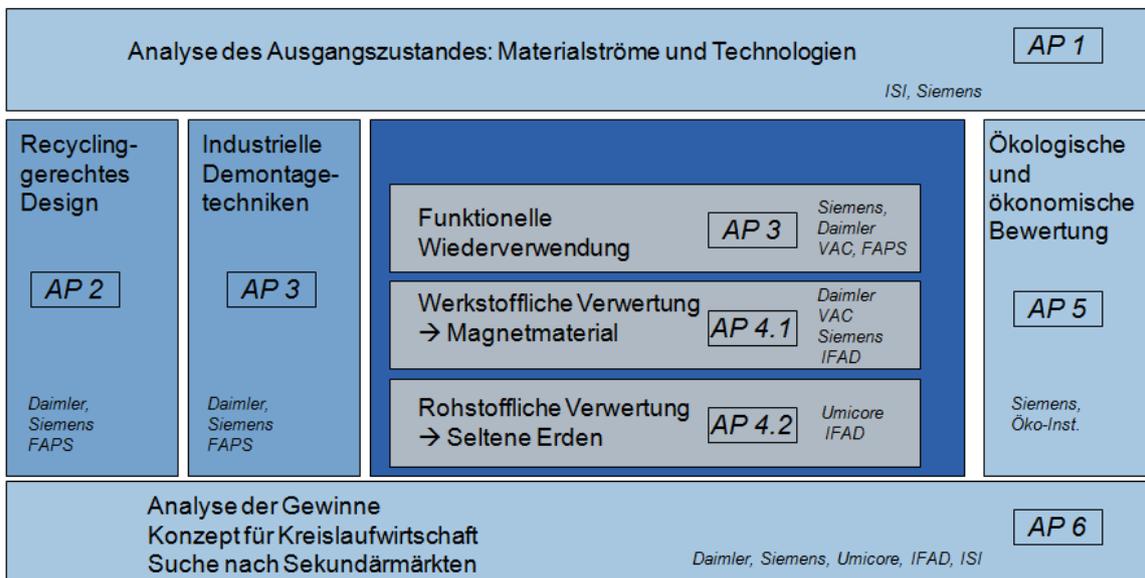


Abbildung 1: Struktur des Projektes MORE

4. Wissenschaftliche und technische Arbeitsergebnisse des Vorhabens

Die in der Beschreibung des Vorhabens sowie in Kapitel 2 definierten Arbeitspakete und die zugeordneten Meilensteine wurden bearbeitet. Die Ergebnisse wurden detailliert in den jeweiligen Zwischenberichten dokumentiert. In dem vorliegenden Abschlussbericht wird daher sehr kompakt auf die wichtigsten erreichten Ergebnisse (insbesondere Meilensteine) eingegangen.

4.1 AP 1 Rohstoff-, Stoffstrom- und Technologieanalysen

4.1.1 AP 1.1 Rohstoffanalysen

In diesem Arbeitspaket wurde eine ausführliche Analyse der globalen Produktionsentwicklung von Neodym und Dysprosium durchgeführt, um diese Mengen dann dem Verbrauch in den einzelnen Technologien gegenüberzustellen.

Das **Rohstoffangebot** wird durch eine Recherche nach Informationen über fortgeschrittene Minenprojekte außerhalb Chinas in über 50 Quellen analysiert und die damit verbundene Versorgungslage auf den Weltmärkten im Zeitverlauf prognostiziert. Hierzu wurden Berichte aus dem SEE-Bergbau, ausgewertet und die erhaltenen Abschätzungen mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover diskutiert. Von den identifizierten 58 fortgeschrittenen Minenprojekten außerhalb Chinas nehmen bis zum Prognosehorizont 2021 je nach Szenario zwischen 11 und 19 Projekte tatsächlich die Produktion auf.

Erst der starke Preisanstieg durch das knapper werdende Angebot hat die Bergwerksfirmen in den letzten Jahren veranlasst, Minenprojekte außerhalb Chinas in Angriff zu nehmen. Ihre Entwicklung zur produzierenden Mine erfordert je nach Ausgangsstatus 5 bis 15 Jahre. Der Kapitalbedarf liegt im Bereich von 0,5 bis zu mehreren Milliarden US Dollar. Die vorliegende Schätzung des künftigen SEE-Angebots beschränkt sich auf die kritische Wiederaufbauphase der SEE-Produktion außerhalb Chinas in den kommenden Jahren. Es wird davon ausgegangen, dass nach dem erfolgreichen Wiederaufbau der Minenproduktion das Angebot durch Kapazitätsanpassung der Nachfrage wieder folgen kann.

Es wurden zwei Szenarien gerechnet. Das Szenario „Operator“ stützt sich wesentlich auf die Aussagen der Minenbetreiber. Diese Quellen sind für die Schätzung des Start-up-Zeitpunkts der Projekte und deren geplante Produktionskapazität wertvoll. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Bergbauunternehmen erheblichen Kapitalbedarf für die Realisierung von Minenprojekten haben und ihre Veröffentlichungen auch der Akquisition von Investoren dienen. Der Projektfortschritt und der erwartete Start-up-Zeitpunkt werden deshalb tendenziell eher zu positiv dargestellt. Obwohl allzu offensichtlich unrealistische Erwartungen korrigiert wurden, bildet das „Operator“-Szenario aus heutiger Sicht die Obergrenze der tatsächlich in den kommenden Jahren denkbaren Entwicklung.

Das zweite Szenario „Investor“ gibt die Sicht der Investoren wieder. Sie stehen vor dem Problem, Finanzmittel im Milliardenbereich zu investieren, deren Tilgung erst mit dem Produktionsbeginn der Minen beginnt, der 10 Jahre in der Zukunft liegen kann. Entsprechend vorsichtig agieren die Investoren, und es wird nicht allen Projekten gelingen, Investoren zu gewinnen. Das Szenario „Investor“ bildet die untere Grenze der denkbaren zukünftigen Entwicklung. Ihre Annahmen stützen sich wesentlich auf die Einschätzung der Experten in der BGR.

Das Ergebnis der Szenarios für Neodym ist in Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die chinesische Produktionsmenge an Neodym außerhalb Chinas erst im „Operator“-Szenario übertroffen wird.

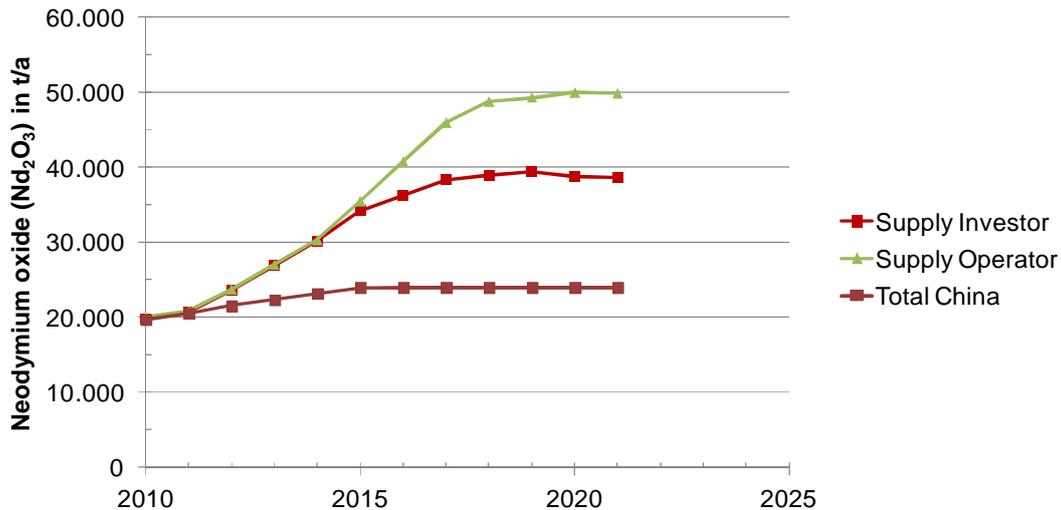


Abbildung 2: Ergebnisse der Szenarien „Investor“ und „Operator“ für Bergwerksproduktion von Neodymoxid

Der Verlauf der weltweiten Bergwerksproduktion in den Szenarien „Operator“ und „Investor“ ist für Dysprosium in Abbildung 3 dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien ist deutlich ausgeprägter als beim Neodym, aber auch beim Dysprosium gelingt es erst im „Operator“-Szenario, die Produktionsmenge in China zu erreichen.

Die **Nachfrageentwicklung** muss über den Zeitverlauf abgeschätzt werden. Hier findet als Foresightmethode ein Bottom-up Ansatz Verwendung. Das heißt, aus einer technisch-wirtschaftlichen Innovationsanalyse wurden die spezifischen Eigenschaften der Technologie, ihr Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik, die spezifischen Funktionen, welche die verwendeten Roh- und Werkstoffe zur Verfügung stellen, das mögliche Anwendungsspektrum und die potentiellen Märkte erschlossen. Aus dem gewonnenen Verständnis von Technologie und Markt wurden unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, darunter die Weltwirtschaftsentwicklung, Projektionen der künftigen Technologienutzung und des daraus resultierenden Rohstoffbedarfs hergeleitet. Zeithorizont des Foresights ist das Jahr 2050.

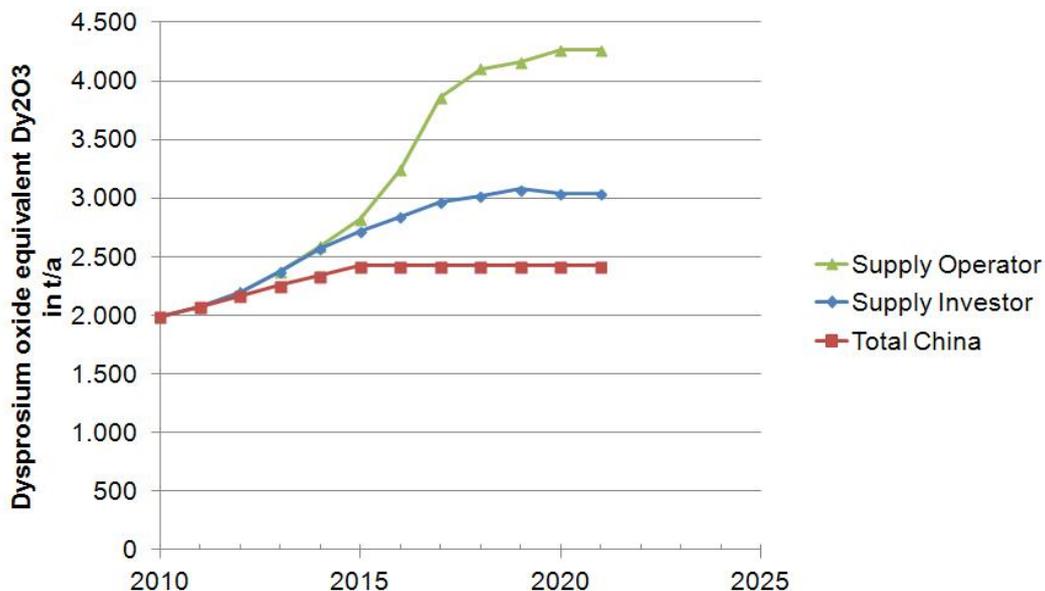


Abbildung 3: Ergebnisse der Szenarien „Investor“ und „Operator“ für Bergwerksproduktion von Dysprosiumoxid

Die Analyse der Stoffströme der betrachteten Rohstoffe zeigt, dass die Verwendung von Nd und Dy in Magneten, wie sie z.B. in Elektromotoren vorkommen, den größten Bedarf erzeugen. Die daraus resultierende wichtige Rolle des weltweiten Automobilmarktes macht eine tiefergehende Betrachtung der Nachfragedynamik notwendig. Über die Einbindung des am Fraunhofer ISI entwickelten „Global Mobility Model (GLOMO)“ wird die Berücksichtigung des weltweiten Fahrzeugbestandes in der Prognose der Rohstoffnachfrage möglich. Die zu erwartenden Stückzahlen an Elektro- und Hybridfahrzeugen aus dem GLOMO sind die Basis für das ganzheitliche Recyclingkonzept, das in Kapitel 4.6.1 beschrieben ist.

Insgesamt ändert sich das Nutzungsmuster des **Neodyms** über den Zeitverlauf: Während im Jahr 2010 noch der größte Verbrauch an Neodym für „andere Magnete“ benötigt wurde, werden mittelfristig bis 2030 mehr als 50 % des Neodyms in Elektromotoren für Elektroautos und E-Bikes verbraucht, vgl. Abbildung 4. Die Neodym-Verwendung in der Metallurgie beinhaltet den Einsatz als Legierungsmittel in einigen Speziallegierungen, wie beispielsweise Spezialstählen und in bestimmten Magnesium-Legierungen. Der Bereich Keramiken und Glas umfasst den Einsatz in Keramik-kondensatoren und in Spezialgläsern, wie beispielsweise Schweißbrillen. Eine relativ neue Nutzung von Neodym liegt in Ziegler-Natta-Katalysatoren zur Herstellung von Polybutadien-Kautschuk für besonders lärmarme Reifen. Auch in 3-Wege-Katalysatoren findet Neodym Verwendung.

Die Gegenüberstellung der Neodym verbrauchenden Technologien und der Szenarien für die Förderung und Produktion erfolgt in Abbildung 5. Im „Operator“- Szenario liegt das Angebot nach den Abschätzungen kurzzeitig über der Nachfrage, doch ergibt sich mittelfristig vor allem aus dem globalen Durchbruch der Elektromobilität ein hoher Bedarf. Diese Modellergebnisse lassen sich auf Grund von illegal geförderten Mengen und des Hortens von Seltenen Erden aus Spekulationsgründen nicht direkt in Marktpreise übersetzen.

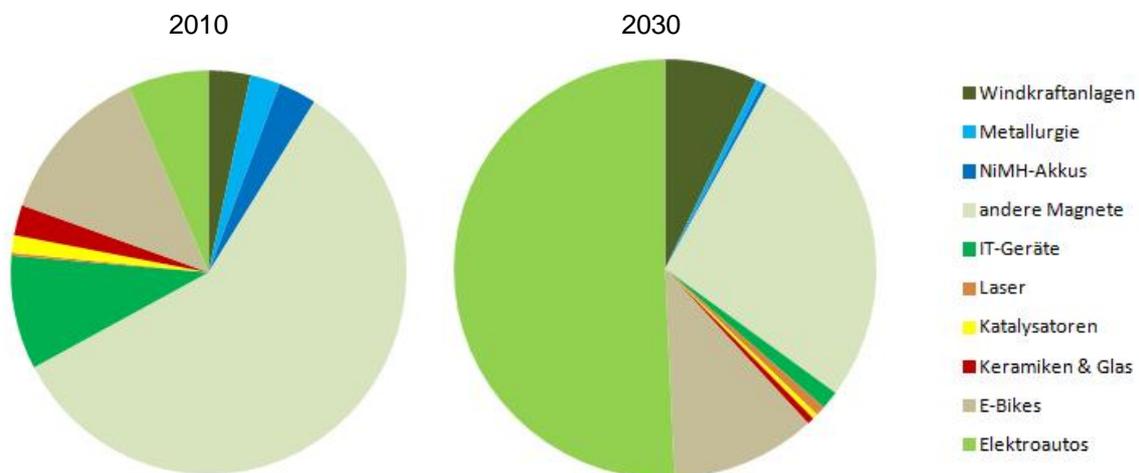


Abbildung 4: Vergleich der Nutzung von Neodym in den Jahren 2010 und 2030

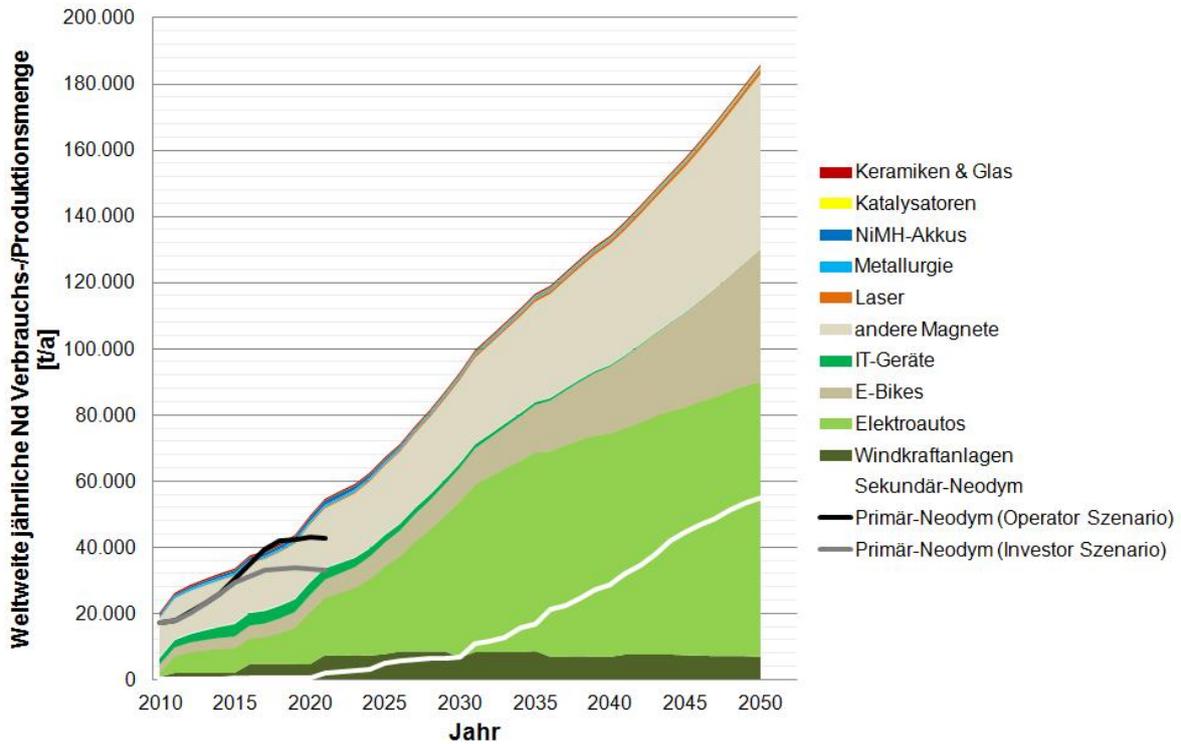


Abbildung 5: Jährliche Neodym-Verbräuche und Minenproduktionen weltweit.

Dysprosium wird im Wesentlichen in Permanentmagneten eingesetzt. Exotischere Anwendungsfelder sind der Einsatz als Dotierungsmaterial in Keramikvielschicht-Chipkondensatoren (MLCC: Multi-Layer Ceramic Capacitor) und als Legierungsbestandteil von Terfenol-D. Terfenol-D ist eine Legierung, die eine der größten Magnetostruktionsfähigkeiten aufweist, d.h. sie lässt sich durch Magnetfelder besonders leicht verformen.

Die Gegenüberstellung des Angebotes und der Nachfrage in Abbildung 7 zeigt die Unterversorgung mit Dysprosium auf. Aus der Darstellung geht hervor, dass Permanentmagnete für Windkraftanlagen und insbesondere für die Elektromobilität mit über 90 % der bei weitem größte Anwendungsbereich des Dysprosiums sein werden.

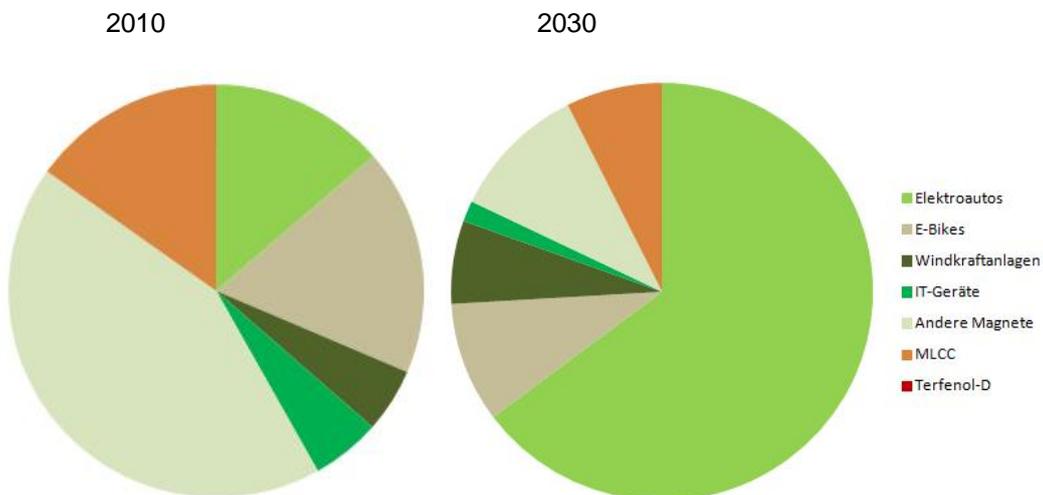


Abbildung 6: Vergleich der Nutzung von Dysprosium in den Jahren 2010 und 2030

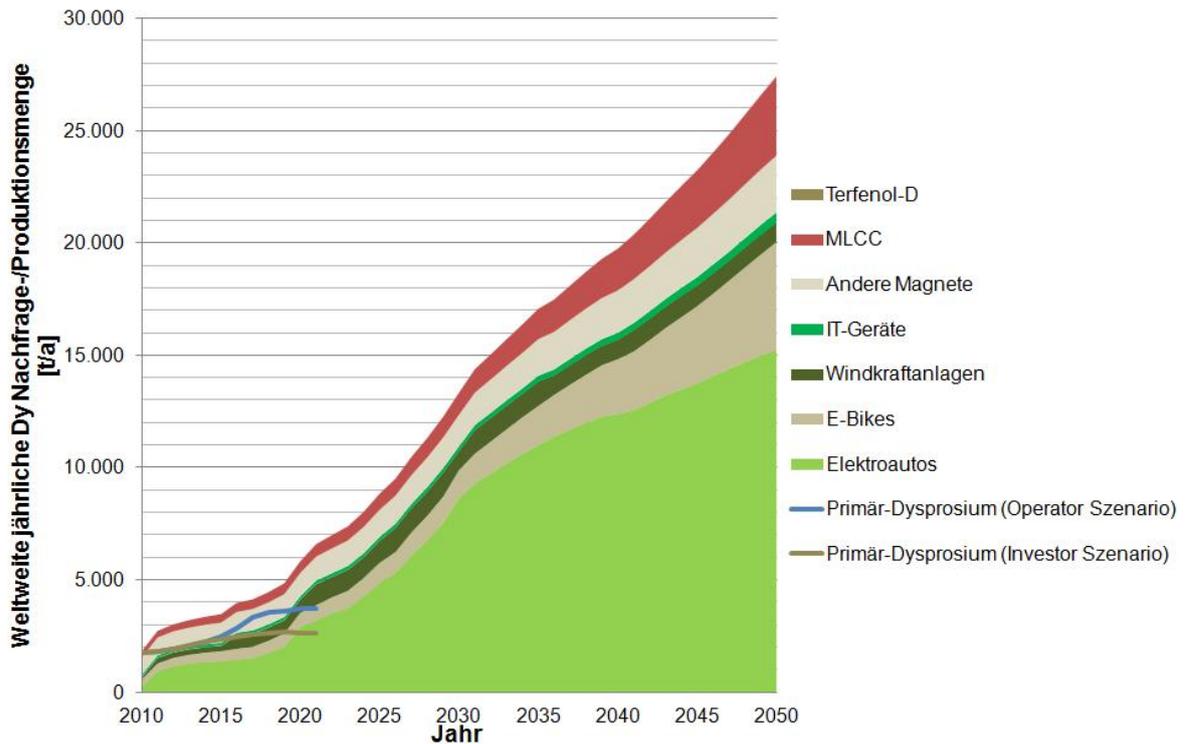


Abbildung 7: Jährliche weltweite Dysprosium Nachfrage- und Produktionsmengen

Um die stark steigende Dysprosium-Nachfrage befriedigen zu können, muss es rechtzeitig zum Ausbau der vorhandenen Minen- und Abbaukapazitäten kommen, andererseits sollte das kommerzielle Recycling von NdFeB-Magneten zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen etabliert werden.

In derzeit zum Teil noch laufenden Forschungsvorhaben wird versucht, den Anteil an Dysprosium in Magneten zu reduzieren, Hochleistungsmagnete nur mit leichten Seltenen Erden oder ganz ohne Seltene Erden herzustellen. Dies sind u.a. die EU-Projekte ROMEO (Replacement and Original Magnet Engineering Options) und REFREPERMAG (Rare-Earth Free Permanent Magnets), RESPONSE (hessisches Projekt: Ressourcenschonende Permanentmagnete durch optimierte Nutzung seltener Erden), die BMBF-Vorhaben REleaMag (Neue hartmagnetische Phasen mit hoher Energiedichte) und COMFEM (Computergestützte Multiskalenmodellierung zur Virtuellen Entwicklung Polykristalliner Ferroelektrischer Materialien) sowie das Leitprojekt „Kritikalität Seltene Erden“ der Fraunhofer Gesellschaft.

4.1.2 AP 1.2 Stoffstrom- und Technologieanalysen

In diesem Arbeitspaket sollten die gegenwärtige Praxis der Entsorgung von Elektromotoren, die beteiligten Akteure und die eingesetzten Technologien erfasst und analysiert werden. Dazu sollte ein Fließschema erstellt werden, das die entsprechenden Stoffströme in Deutschland darstellt. Literatur- und Internetrecherchen lieferten neben dem Stand der Technik im Bereich Elektromotorrecycling auch eine Übersicht über die weltweit am Recycling von Seltenen Erden beteiligten Firmen und Gesellschaften.

Angaben zum Stofffluss von Neodym in Deutschland

Während globale Zahlen für die Nutzung von Magnetwerkstoffen veröffentlicht sind, vgl. Tabelle 3, ist es schwierig, offizielle Zahlen für den Einsatz von Magnetwerkstoffen bzw. Seltenen Erden in Deutschland zu finden.

In Deutschland wurden im Jahr 2012 ca. 290 t Seltene Erden als Metalle und 4.155 t als Verbindungen importiert (vgl. Tabelle 4). Roskill nennt die Firmen Schott (Spezialgläser und Keramiken), Siemens (Generatoren und Motoren), BASF (FCC Katalysatoren), W.R. Grace & Co (FCC-Katalysatorhersteller in Worms), MS Schramberg GmbH & Co. KG (Magnethersteller bei Rottweil, Produktionskapazität von 20 Mio. Magneten pro Jahr) und Auer-Remy als Seltene-Erd-Händler in Hamburg. [4] nennt die Vaccumschmelze als wichtigsten Magnethersteller in Deutschland, der durch besonders hochwertige Magneten bekannt ist. Die Anlage in Hanau soll eine Produktionskapazität von 5000 t pro Jahr haben. Daneben gibt es noch ca. sechs andere kleinere Hersteller von Seltene-Erd-Magneten in Deutschland, u.a. die Fa. Max Baermann, die im Jahr etwa 50 t SE-Werkstoffe einsetzt.

Tabelle 3: Globale Produktionszahlen für SE-Magnete

Produktion [t]	Jahr	Quelle
62.246	2010	
49.980	2006	
99.000	2010	Schätzung,
~ 100.000	2013	

Tabelle 4: Deutsche Seltene-Erd-Importe und -Exporte 2009 – 2012 (ohne Halbzeug und Waren;)

Seltene Erden	2009	2010	2011	2012	Liefer- / Empfängerländer 2012 (Anteile > 10 %)
Metall [t]					
Import	113	465	264	290	China 90,9
Export	7	26	29	10	Saudi-Arabien 25,3 Tschechische Republik 19,2 Türkei 16,2 Ungarn 10,1 Belgien 10,1
Cer-Verbindungen [t]					
Import	450	1.023	914	553	China 37,7 Frankreich 28,0 Estland 13,8 Österreich 10,7
Export	367	323	330	165	Österreich 18,1 Italien 14,4 Korea, Rep. 10,1
anorganische und organische SEE-Verbindungen [t]					
Import	7.753	10.003	7.335	4.155	USA 52,6 China 20,3 Frankreich 12,0
Export	285	342	330	534	Österreich 75,0

Es ergab sich im Laufe des Vorhabens, dass es deutlich schwieriger als gedacht war, ein Stoffflussmodell von Magnetwerkstoffen zu erstellen. Grund war einerseits die schwierige statistische Abgrenzung, die sich z.B. nach dem Anschlussstrom und der Leistung der Motoren richtet, vgl. Tabelle 5, und andererseits die restriktive Informationspolitik der Seltene-Erd-verarbeitenden und -anwendenden Unternehmen. So war es auch im Konsortium nicht möglich, einschlägige Zahlen zu erheben.

Dieses Problem hatte auch das Öko-Institut in seiner jüngsten Studie zum Einsatz von Permanentmagneten in **Industriemotoren**, sog. synchronen Servomotoren. Bei der Flächenbefragung von Industrieunternehmen hat sich herausgestellt, dass in den meisten Betrieben sehr wenig Kenntnis und Erfahrung darüber vorhanden ist, ob überhaupt Elektromotoren mit NdFeB-Magneten in ihren Produktionsstätten zum Einsatz kommen. Wertvolle Informationen lieferten jedoch Motorenhersteller und Vertreter von Fachverbänden. Danach haben europäische Unternehmen im Jahr 2012 bis zu zwei Mio. Elektromotoren mit Permanentmagneten für industrielle Anwendungen hergestellt; davon wurde etwa die Hälfte in Deutschland produziert. Davon wiederum wird etwa die Hälfte der Motoren in Deutschland in Industrieanlagen eingesetzt, die andere Hälfte der Motoren wird entweder direkt oder als Teil von Maschinen und Anlagen ins Ausland exportiert. Die ca. 1.000.000 in Deutschland produzierten Servomotoren entsprechen bei einem durchschnittlichen spezifischen Magneteinsatz von rund 0,175 kg pro Servomotor dann rund 175 t NdFeB-Magneten, wovon 85-90 t in Deutschland verbleiben. Zum Recycling fallen zurzeit ca. 35 t NdFeB-Magnete an, allerdings gelangen viele Altgeräte bzw. -anlagen ins Ausland (Zweitware). Das Öko-Institut bezieht seine Erhebungen auf „synchronen Servomotoren“ (permanent-erregte Synchronmotoren, engl. permanent-magnet synchronous motor – PSM). Eine Studie für den Fachverband Antriebstechnik geht ihrerseits von einem spezifischen Bedarf von 0,250 kg Permanentmagnetwerkstoff pro Motor im Jahr 2009 aus.

Tabelle 5: Motorenproduktion in Deutschland

Melde Nr.	Bezeichnung	2011		2012		2013	
		St	1000 Euro	St	1000 Euro	St	1000 Euro
2711 10 100	E.Motoren mit einer Leistung < 37,5 W	32.631.614	479.871	31.486.975	454.321	34.796.831	460.844
2711 10 300	Gleichstrommotoren und -generatoren mit einer Leistung > 37,5 - 750 W zum Absatz bestimmt	71.601.637	1.087.365	62.429.338	978.187	46.606.982	817.479
2711 10 530	Gleichstrommotoren und -generatoren mit einer Leistung > 750 W-7,5 kW	42.901	35.584	38.061	32.139	34.556	28.119
2711 10 550	Gleichstrommotoren und -generatoren mit einer Leistung >7,5- 75 kW	83.912	46.956	95.306	53.513	76.696	55.766
2711 10 700	Gleichstrommotoren und -generatoren mit einer Leistung >75-375 kW	795	12.405	871	10.274	810	9.452
2711 10 900	Gleichstrommot. -generatoren, Leistung >375kW			131		161	53.512
2711 21 000	Allstrom-(Universal-)motoren mit einer Leistung >37,5 W zum Absatz bestimmt	326.649	60.119	285.493	54.632	270.250	
2711 22 301	Einphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 7,5 - 75 W zum Absatz bestimmt	1.084.547	34.096	941.989	34.639	863.383	33.180
2711 22 303	Einphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 75- 375 W zum Absatz bestimmt	2.561.123	150.417	2.500.431	150.222	1.286.831	72.301
2711 22 305	Einphasen Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 375- 750 W zum Absatz bestimmt	137.992	7.721	122.023	6.767	117.133	7.195
2711 22 500	Einphasen- Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 750 W zum Absatz bestimmt	86.850	10.644	79.096	8.634	118.331	16.870
2711 23 000	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung < 750 W	3.419.594					
2711 23 000	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung < 750 W darunter zum Absatz bestimmt	3.243.344	379.379	3.618.778	442.193	4.022.468	430.126
2711 24 031	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 750 W- 7,5kW ;Servomotoren	766.687	434.209	749.192	458.208	775.293	439.069
2711 24 039	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 750 W- 7,5 kW; andere	1.763.239	667.712	1.615.719	598.525	1.607.087	610.524
2711 24 050	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 7,5-37 kW	401.466	506.455	341.378	492.021	296.713	444.123
2711 24 070	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 37- 75 kW	27.481	89.612	23.568	81.051	23.323	80.745
2711 25 300	Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung von mehr als 75 kW; Fahrmotoren	5.334	117.926	5.630	115.247	6.557	130.754
2711 25 401	Andere Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung >75 kW-375 kW; Spannung <1000 V	17.555	156.027	16.664	150.460	15.932	150.754
2711 25 403	Andere Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung >75 kW-375 kW; Spannung >1000 V	1.356	37.209	1.299	35.235	1.477	38.389
2711 25 601	Andere Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung >375 -750 kW; Spannung <1000V	4.270	146.590	5.965	196.712	5.132	185.190
2711 25 603	Andere Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung >375 -750 kW ; Spannung >1000 V		98.214		96.451		84.675
2711 25 900	Andere Mehrphasen-Wechselstrommotoren mit einer Leistung > 750 kW	2.721	391.751	2.725	446.559	2.730	411.364
2711 26 100	Wechselstromgeneratoren; mit einer Leistung < 75 kVA	9.152	25.572	7.860	26.617	9.450	26.221
2711 26 300	Wechselstromgeneratoren; mit einer Leistung > 75- 375 kVA	409	11.726	394	12.046	332	9.740
2711 26 500	Wechselstromgeneratoren; mit einer Leistung >375- 750 kVA	84	2.366	99	4.320	144	5.559
2711 26 700	Wechselstromgeneratoren; mit einer Leistung >750 kVA	3.881	242.433	3.560	287.251	2.905	232.209

Neben den Magneten, die in Elektromotoren eingesetzt werden, fällt weltweit noch weiterer Magnetschrott an. Dabei handelt es sich u.a. um Magnete aus Festplattenmotoren, die in großer Stückzahl aber mit geringem Gewicht verbaut sind. Im Gegensatz zu den Motor-Magneten sind diese Magnete in der Regel verkapselt, z.B. mit einer Hülle aus Nickel, wodurch das Recycling dieser Magnete erschwert wird. Um die potentiellen Mengen von Magnetwerkstoffen in Altelektrogeräten zu bestimmen, wurden im Vorhaben einzelne Abfallarten untersucht, vergleiche Abbildung 8. Es zeigte sich aber in den während des Projektes durchgeführten Workshops, dass die Gesamtmenge aus diesen Anwendungen zurzeit viel kleiner als die potentielle Menge aus Schleifschlämmen der Magnethersteller ist.

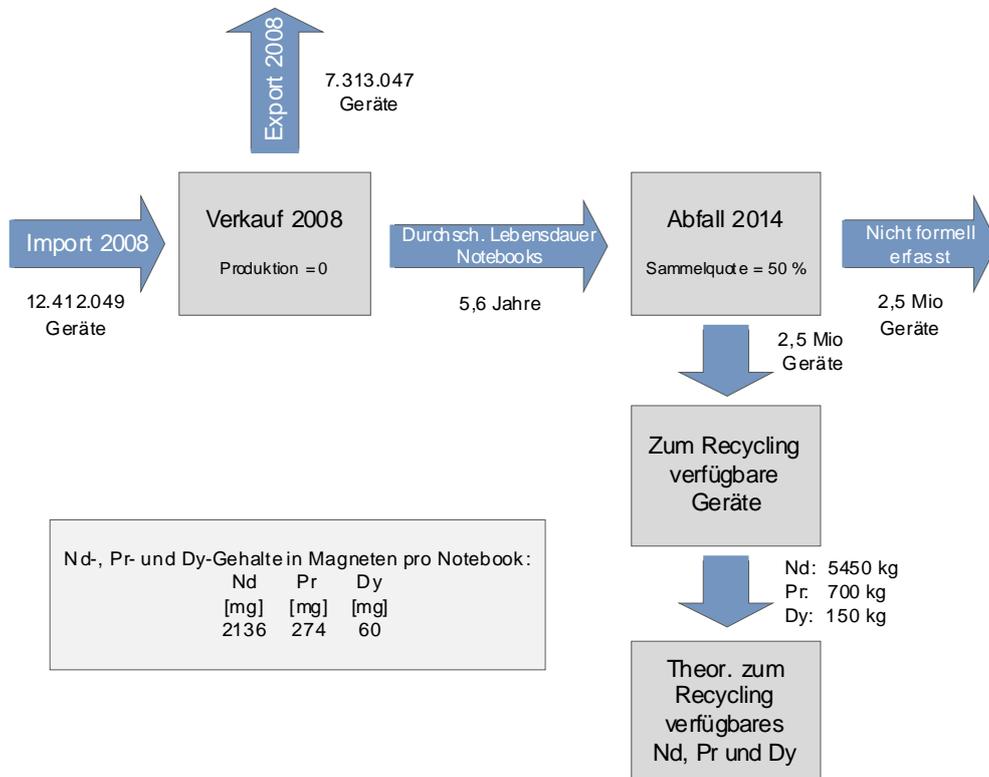


Abbildung 8: Stofffluss von Magneten in Computern , ,

Gegenwärtige Entsorgungspraxis von Elektromotoren und beteiligte Akteure

Zur Erfassung der gegenwärtigen Praxis der Entsorgung von Elektromotoren wurden Mitarbeiter aus der Motorenfertigung und dem entsprechenden Service bei Siemens befragt, da die Rücklaufquoten und somit auch die Entsorgung von Motoren aus der Elektromobilität während der Projektlaufzeit noch keine signifikante Bedeutung erlangt haben.

Bei der Verwertung von Hybrid- bzw. EV-Altfahrzeugen gelten die gleichen Regeln wie für konventionelle Altfahrzeuge. So müssen in der EU ab 2015 alle Fahrzeuge zu 95 Gew.-% verwertet werden. Eine stoffliche Recyclingquote von 85 Gew.-% ist dabei einzuhalten, vgl. Abbildung 9.

Bei Industriemotoren ist die Art der Entsorgung abhängig von der Verwendung 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 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 wertvollen Rohstoffes Kupfer, die Rotoren hingegen zählen zum sog. Mischschrott. Diese Fractionen 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 Mischschrottfraction 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.

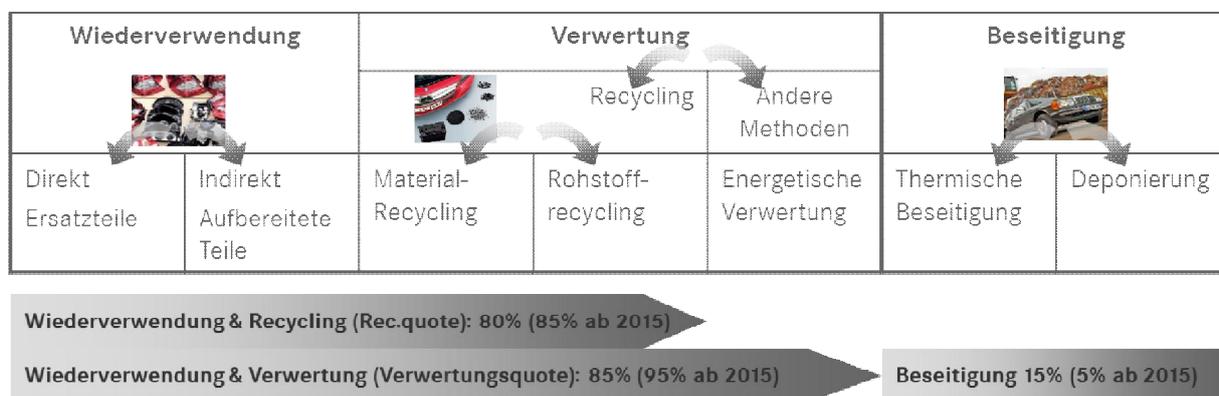


Abbildung 9: Gesetzliche Vorgaben zur Verwertung von Altfahrzeugen in der EU

Recycling von Seltenen Erden

Die stoffliche Wiederverwertung von SE-haltigen Abfallströmen ist nur in bestimmten Segmenten erforscht und umgesetzt. Im Bereich Produktionsabfälle können die Magnethersteller SE-haltige Schneidabfälle und Ausfallmagnete werkstofflich und Schleifschlämme rohstofflich in Produktionsprozesse für Primärrohstoffe zurückführen, . Dazu werden die Festanteile in Deutschland wieder eingeschmolzen bzw. aufgemahlen und die anfallenden Schleifschlämme durch Verbrennen oxidiert und die Seltenen Erden durch Schmelzelektrolyse in China aus dem Oxid wiedergewonnen.

Für Post-Consumer-Abfälle, also Abfälle aus End-of-Life-Produkten sind bisher nur sehr wenige Ansätze zur Rückgewinnung von SE-Metallen verfolgt worden. Für die in Leuchtstofflampen verwendeten schwereren SE-Metalle Eu, Gd, und Tb sowie zusätzlich Y und Ce aus Leuchtstofflampen und Kathodenstrahlröhren wurde am IFAD in Kooperation mit der Firma Osram und anderen Partnern ein Verfahren zur Rückgewinnung dieser Stoffe entwickelt. Für die Rückgewinnung von SE-Metallen aus NiMH-Batterien wurden ebenfalls erste Verfahrensansätze untersucht, allerdings sind auch hierfür im Wesentlichen chinesische Quellen zu nennen.

Die Magnete gehen während des Recyclings von Elektromotoren bislang verloren, da keine Prozesse für die Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden etabliert sind. Zwischen den Jahren 2000 und 2005 lag die weltweite Recyclingrate für die Selten-Erd-Elemente bei einem Wert von weniger als einem Prozent. Da Elektromotoren nicht die einzige Quelle für Selten-Erd-haltigen Magnetschrott sind und diese Magnete weltweit Verwendung finden, wurde im Rahmen des AP 1 nach den weltweiten Recyclingaktivitäten bzgl. Seltenen Erden recherchiert. Die Recherche zeigte, dass bisher Recycling von Magneten bzw. die Rückgewinnung der Seltenen Erden aus den Magneten nicht von der Industrie in Deutschland oder dem Rest der Welt in Eigenregie hinter verschlossenen Türen getrieben, sondern vorwiegend der universitären Forschung überlassen wurde. Die wichtigsten Aktivitäten werden im Folgenden kurz vorgestellt, allerdings waren zu den wenigsten Projekten detaillierte Informationen zu den entwickelten Prozessen zu finden.

Forschung

In **Deutschland** wurden parallel zum Verbundprojekt MORE an verschiedenen Forschungseinrichtungen weitere Vorhaben durchgeführt, die sich mit dem Recycling von Magneten beschäftigen. Dazu gehören vor allem die Technische Universität Hamburg-Harburg (Recycling von Festplattenmagneten), das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) (Entwicklung eines hocheffizienten Recycling-Prozesses für seltene Erden aus Magnetwerkstoffen) sowie die RWTH Aachen (Rare Earth Green Mining and Separation).

In **Großbritannien** hat eine Arbeitsgruppe der Birmingham University (Magnetic Materials Group) Recyclingverfahren für Selten-Erdmagnete entwickelt. Dabei werden u.a. gesinterte Magnete über eine Wasserstoffversprödung zerkleinert und das entstehende Pulver entweder wieder zu Magneten gesintert oder zu kunststoffgebundenen Magneten recycelt. Die dort entwickelten Technologien wurden aber bisher nicht großtechnisch zur Anwendung gebracht.

In **Belgien** gibt es an der Katholieke Universiteit Leuven die Forschungsplattform rare³: Research Platform for the Advanced Recycling and Reuse of Rare Earths, bei der 27 Industriepartner zusammen mit der Universität Recyclinglösungen für Seltene Erden entwickeln.

An der Montanuniversität Leoben, **Österreich**, werden Verfahren zum Recycling von Seltenen Erden aus Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren entwickelt.

In den **USA**, die der größte Abnehmer für NdFeB-Magnete weltweit sind, haben die Selten-Erd-Metalle strategische Bedeutung. Aus diesem Grund gibt es mehrere Forschungsverbände, die sich mit Hilfe staatlicher Förderungen mit dem Recycling von Seltenen Erden befassen. Zu den wichtigsten Forschungs-Verbänden zählen der Verbund aus Ames Lab (Iowa State University, gefördert vom Department of Energy), Worcester Polytechnic Institute und Colorado School of Mines, alle beteiligt am US National Research Center for Rare Earths and Energy (Critical Materials Hub) sowie die U.S. Rare Earth Industry and Technology Association (REITA), die im Center for Resource Recovery & Recycling CR³ in Zusammenarbeit mit der Industrie (z.B. BASF, General Electric Company, H.C. Starck, Rhodia) am Selten-Erd-Recycling forscht. Diese Forschungsverbände decken das gesamte Selten-Erd-Spektrum ab, nicht nur die Bestandteile aus Magneten.

Einige Untersuchungen, Selten-Erd-Metalle auch aus Motoren demontierte Magnetmaterialien zu recyceln, wurden in **Japan** durchgeführt , . Diese Arbeiten setzen jedoch auf bereits hoch aufkonzentrierten Magnetwerkstoffen bzw. SE-Fractionen auf und beschreiben pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozesse zur Abscheidung der Seltenen Erden in metallischer Form.

Ob in **China** noch am Recycling von Seltenen Erden geforscht wird, oder ob die Technologie bereits entwickelt ist und eingesetzt wird, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Es wird aber vermutet, dass Produktionsabfälle in China wieder aufbereitet werden. Das Recycling von Magneten aus Produkten ist fraglich.

Industrie

Während der Phase hoher Selten-Erd-Preise wurde in **Deutschland** angekündigt, dass das Recycling von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen und Magneten in den nächsten Jahren vorangetrieben werden soll, um zum Jahr 2015 deren Recyclingquote auf bis zu 10% zu erhöhen , ,.

Im Jahr 2011 wurden in **Japan** 650 Millionen US\$ bereitgestellt, um die Versorgung mit Seltenen Erden und anderen seltenen Mineralien durch die Entwicklung von alternativen Rohstoffquellen im Ausland, durch Recycling oder durch Substitution zu sichern . Verschiedene Firmen haben über Pressemitteilungen bekannt gegeben, dass sie sich in der Lage sehen, den zukünftigen Bedarf durch Recycling abzudecken. So will z.B. Shin-Etsu über eine Aufbereitungsanlage in Vietnam Selten-Erd-haltiges Magnetmaterial zurückgewinnen . Auch die Firmen Hitachi , SDK und Dowa-Holdings haben angekündigt, in Zukunft Seltene Erden zurück gewinnen zu wollen und entsprechenden Anlagen zu planen oder gar bereits in Betrieb genommen zu haben. Inwieweit diese Anlagen erfolgreich arbeiten und welcher Prozess genutzt wird, um die Seltenen Erden zurückzugewinnen, war durch die Recherche nicht in Erfahrung zu bringen.

Da **China** der weltweit größte Hersteller und Exporteur sowohl von Seltenen Erden als auch Selten-Erd-Magneten ist, wird davon ausgegangen, dass dort in jedem Fall entsprechende Schrotte und Produktionsabfälle recycelt werden. Allerdings liegen kaum Daten über die Mengen und Art der Recyclingprozesse vor .

Hemmnisse für das Recycling von Magneten

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, vgl. Tabelle 6 sowie Tabelle 7. Dazu gehören u.a. die folgenden Punkte:

- End-of-Life-Produkte werden vielfach ins Ausland exportiert und stehen damit für ein Recycling in Deutschland 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 recycelbaren Seltenen Erden ist gering aufgrund deren hohen Lebenserwartung (z.B. Magnetmaterial in Windturbinen). Der Magnetanteil in kleineren Produkten 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 , . 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 % des Materialneupreises liegt (vgl. Kapitel 4.4.1).

- 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

Tabelle 6: Möglichkeiten zum Recycling von Neodym(oxid) in unterschiedlichen Anwendungen und für das Recycling relevante Eigenschaften (grün = günstig, gelb = neutral, rot = ungünstig)

Anwendung	Anteil an Gesamtbedarf Nd-Oxid in t	Massenanteil Nd-Oxid im Produkt (ca.)	Produktgröße	Schlüsselbedingungen für Recycling	Recyclingbemühungen
Magnete	81 % (23076 t)	33 %	3 g – 3 t	Optimierte Sammlung, automatisierter Ausbau, praxistaugliche Magnetmaterialanalyse	In der Entwicklung (Jp: Hitachi, Showa Denko, Mitsubishi, Panasonic, Sharp, Shin-Etsu, Santoku)
Metallurgie ohne Batterien	8 % (2145 t)	< 0,1 % – 15 %	x g – x t	Sammlung/Ausbau Feuersteine aus Feuerzeugen	-
Batterien	4 % (1100 t)	0,7 %	1 g – 2 kg	Kombinierte Rückgewinnung mit anderen SE/anderen Inhaltstoffen	Recycling der Batterien etabliert, Rückgewinnung SE in der Entwicklung (Jp: Honda, Toyota, Santoku; EU: Umicore, Rhodia)
HL-Keramik	2/4 % (540/1000 t)	bis zu 35 %	x mg	Verbessertes Leiterplattenrecycling (kein Schreddern)	-
Glaszusätze	1 % (345 t)	< 0,05 % – 5 %	x g – xx g		-
Auto-Katalysatoren	1 % (165 t)	3,5 %	1,5 – 3,5 kg		Katalysatorenrecycling in EU (Umicore) etabliert, Rückgewinnung SE derzeit als nicht wirtschaftlich eingeschätzt

Tabelle 7: Möglichkeiten zum Recycling von Neodym in unterschiedlichen Magnetanwendungen

Magnetanwendung	Anteil an Gesamtbedarf NdFeB-Magneten in 2010	Magnetmasse pro Produkt	Recyclingbemühungen
Elektrische & Elektronische Geräte	Ca. 50 %	3 – xxx g	In der Entwicklung (Jp: Hitachi, Showa Denko, Mitsubishi, Panasonic, Sharp, Santoku)
Konventionelle Automobilanwendungen	20%	15 – 350 g pro Bauteil	-
Antriebsmotoren von E-bikes	5 %	300 – 350 g	-
Antriebsmotoren von Hybrid- und Elektroautos	1 %	1 – 1,5 kg	Forschungsprojekte
Klimaanlagen (Industriemaßstab)	x %	250 – 300 kg	In der Entwicklung (Jp: Hitachi, Showa Denko, Mitsubishi, Panasonic, Sharp, Shin-Etsu, Santoku)
Windkraftanlagen	x %	0,2 – 2,0 t/MW	Forschungsprojekte
MRT-Geräte	x %	1 – 3 t	-

Herstellerbefragung

Durch Befragung verschiedener SE-Hersteller sowie von Recyclingunternehmen in Europa sollte die derzeitige Lage auf dem Markt beschrieben werden. Für die Interviews wurde ein standardisierter Fragebogen erstellt.

Vor allem sollte die Frage geklärt werden, ob es zukünftig eine europäische Anlage zur Reduktion von Selten-Erd-Oxiden zu den Metallen geben könnte. Dazu wurden die einschlägigen Firmen angesprochen, um Interviewtermine zu vereinbaren. Die Gespräche haben mit Treibacher Industrie AG, Molycorp und Rhodia stattgefunden, mit Less Common Metals kam kein Interview zu Stande.

Treibacher-Interview: Treibacher produziert seit dem Jahr 1903 Seltene Erden, damals in Form von Mischmetall und Zündsteinen. Heute ist Treibacher Hersteller von Formulierungen, beispielsweise Pulvern für Keramiken, Katalysatoren, Hartmetalle, Energiespeicher, Wasserreinigung, Pigmente, Gläser u.a. 2013 wurde das Leuchtstoffwerk Breitung GmbH in Thüringen erworben. Sie stellen keine Endprodukte her.

Treibacher hat ca. 780 Mitarbeiter und macht dreiviertel des Umsatzes in Europa, und ca. 1/8 jeweils in Amerika und Asien. Die Firma kooperiert mit der ENEA zur Trennung von Schweren SE (Dysprosium, Scandium, Yttrium) und zur Extraktionstechnik (Ionentauscher, Solventextraktion, überkritisches CO₂). Derzeit läuft ein Forschungsvorhaben, welches von Österreich mit 2,5 Mio. Euro gefördert wird.

Ende 2013/Anfang 2014 lief bei Treibacher eine interne Machbarkeitsstudie zur Frage, ob man in das SE-Magnetrecycling einsteigt. Dabei wurde die Performance von „nasschemischer Aufbereitung“ gegenüber „Wasserstoffverfahren“ evaluiert, auch abhängig von der Frage, welche Qualitäten für Magnethersteller noch akzeptabel sind. Das Ergebnis war, dass Treibacher wegen der geringen Mengenströme nicht selber aktiv wird, sondern sich nach geeigneten Partnern umschaute.

Molycorp-Interview: Molycorp ist ein integrierter Hersteller von Metallen, Metalloxiden, -carbonaten u.a. sowie Zubereitungen für Magnete. Das Unternehmen ist weltweit aktiv, mit 26 Niederlassungen in 11 Ländern und insgesamt 2.700 Mitarbeitern. Der Umsatz betrug 2012 ca. 530 Mio. Dollar, davon 31 % in Japan, je 22 % in China und Europa, 20 % in Nordamerika und 5 % im Rest der Welt. 2012 wurden 19.050 t „rohes“ SEO gehandelt, 12.000 t SEO-Chemikalien, 9.250 t Magnetmaterialien und 700 t Ta, Nb u.a.

In der Mountain Pass Mine wurden erhebliche Umweltschutz-Investitionen getätigt und es werden alle Chemikalien im Kreislauf geführt. Ziel ist es, im Dauerbetrieb Kosten von 6 bis 7 \$ pro kg SEO zu erreichen. Molycorp hat neben Mountain Pass auch Aufarbeitungsanlagen in Estland und China. Es ist aber nicht ohne weiteres möglich, beispielsweise die Anlage von Silmet zur Trennung von rezyklierten Magnetwerkstoffen zu nutzen, da die Separationsanlagen auf einen definierten Input eingestellt sind.

Recycling von Magneten erlebt lt. Molycorp einen kleinen Boom und die Firma nimmt auch an Projekten teil, aber 1) es ist keine Nutzung als „Rohstoff“ in Separationsanlage möglich 2) es wird ein Mengenstrom mit charakterisierter Magnetzusammensetzung benötigt, beispielsweise durch Alautos und 3) sollte der Start mit möglichst viel HREE-haltigen Magneten erfolgen. Auf die Frage zu einer Recyclinganlage sieht Molycorp diese „in Europa auf gar keinen Fall“.

Rhodia-Interview: Rhodia gehört seit 2011 zu Solvay und heißt heute Solvay Rare Earth. Produkte sind Oxide in (Austausch-)Katalysatoren, Energiesparlampen und „Industrien mit hoher Wertschöpfung“ (Flachbildschirme, Präzisionsoptik etc.). Die Gruppe Rare Earth Systems hat einen Umsatz von ca. 434 Mio. EUR, 5 Produktionsstandorte und 1.120 Mitarbeiter.

Das Unternehmen betreibt ein Recycling von ca. 3.000 t Abfall-Energiesparlampen pro Jahr (dangerous waste; nicht nur europäische Abfälle). Die Aufbereitung der Leuchtmittel erfolgt zuerst in einer Anlage in Saint Fons, welche ein Selten-Erd-Konzentrat erzeugt, das dann in La Rochelle zu den Oxiden von Lanthan, Cer, Terbium, Yttrium, Europium und Gadolinium aufbereitet wird. Zusätzlich werden noch SEO aus dem Batterierecycling von Umicore übernommen.

Recyclinganlage: Die Selten-Erd-Preise sind wichtig für Rhodia, aber die Firma startete die Recyclingaktivitäten 2007, also lange vor der Hochpreisphase. Dies war damals eine „long term decision“. Rhodia könnte theoretisch Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus Magneten gewinnen, aber die Reduktion der Oxide zu Metallen ist zurzeit nicht geplant.

Less Common Metals (Recherche): Less Common Metals (LCM) ist eine Tochter der Great Western Minerals Group (GWMG). LCM ist Hersteller von Seltenen Erden (mit einer Kapazität von ca. 2000 t NdFeB, SmCo und verschiedener Dy, Tb, La & Y-basierter Legierungen)

LCM ist auf dem Wege, ein vertikal integriertes Unternehmen zu werden. LCM kann dabei auf die zu 74 % im Besitz von GWMG liegende Mine Steenkampskraal zugreifen. In dieser ehemaligen Thorium-Mine sollen ca. 5.000 t SEO im Jahr produziert werden (DERA, 2014). 2012 wurde ein neues Joint Venture Unternehmen zwischen GWMG (75 %) und einer chinesischen Firma (Ganzhou Qiandong Rare Earth Industry Group, 25 %) zum Bau und Betrieb einer Solvent-Extraktionsanlage gegründet. Die Separationsanlage soll in Vredendal in Südafrika errichtet werden .

Zum letzten noch fehlenden Produktionsschritt, der Reduktion zu den Metallen, gab GWMG am 11. Juli 2013 eine Pressemitteilung heraus, in welcher mitgeteilt wurde, dass LCM erfolgreich metallisches Neodym durch einen Elektrolyseprozess hergestellt hat; dabei wurde die Elektrolysezelle „in full production mode meeting all environmental, health and safety compliance standards“ eingesetzt .

4.2 AP 2 Reparatur- und recyclinggerechtes Design des elektrischen Antriebsstranges

Mit Hilfe der in den AP 3 und 4 gewonnenen Erkenntnisse zu Demontage und Magnetrecycling konnten Empfehlungen für das reparatur- und recyclinggerechte Design des elektrischen Antriebsstrangs abgeleitet werden. Die Ergebnisse sind in einem handlichen und eigenständigen Dokument zusammengefasst (vgl. Anhang), welches eine Entscheidungshilfe für den Konstrukteur darstellt, nicht ein verpflichtendes Regelwerk.

Das so entstehende handliche und selbsterklärende Dokument gibt Empfehlungen für ein recyclingfreundliches Motordesign mit dem Fokus auf der Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Permanentmagneten. Dabei werden die Schwerpunkte entsprechend der im Projekt als geeignetsten eingestuftten Recyclingverfahren gesetzt. So wird z.B. die direkte Wiederverwendung von Magneten derzeit als schwierig umzusetzen angesehen. Daher wird diese Recyclingroute nur am Rande betrachtet. Auf das werkstoffliche bzw. rohstoffliche Recycling wird dagegen vertieft eingegangen. Dabei handelte es sich während der Projektlaufzeit um ein sog. „lebendes Dokument“. Dieses untergliedert sich in die folgenden Abschnitte:

- **Motivation** für die Erstellung des Dokumentes.
- **Definition der betrachteten Recyclingstufen:** Die vom Konsortium definierten Begriffe für die gewählte Recyclingstufe (ReUse = Wiederverwendung nach Reinigung und Prüfung, RePair = Reparatur, ReMan = Zerlegung und Wiederaufbau unter teilweiser Verwendung gebrauchter Komponenten) wurden den in der VDI Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung“ verwendeten Verwertungsstufen zugeordnet (Wiederverwendung, Wiederverwertung, Weiterverwertung).
- Die **Rahmenbedingungen** für das Recycling von Selten-Erd-(SE)-Magneten werden ausführlich erläutert
- Die **Hinweise für ein reparatur- und recyclinggerechtes Motordesign** erläutern detailliert die Faktoren, die für die jeweilige angestrebte Recyclingstufe von permanenterregten Synchronmaschinen relevant sind. Die möglichst beschädigungsfreie Abtrennung der Magnete ist die wichtigste Voraussetzung für die angestrebte Wiederverwendung. Ein recyclinggerechtes Design muss zwangsläufig demontagegerecht sein. Diese Abhängigkeiten sind im Dokument berücksichtigt und dargestellt. Als Beispiel sei folgende Situation genannt: Für eine funktionelle Wiederverwendung der Magnete ist eine möglichst beschädigungsfreie Abtrennung der Magnete anzustreben, bei einer werkstofflichen Verwendung spielt dieser Aspekt eine untergeordnete Rolle.

4.3 AP 3 Demontage und Wiederverwendung – funktional

Grundsätzliche Beschreibung des Motorenaufbaus (oberflächenmontiert/vergraben):

Siemens stellt derzeit vorrangig Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten (SPM, surface mounted permanent magnet) her. Die Magneten werden mit Klebstoff auf das Blechpaket des Läufers aufgebracht und mittels einer harzgetränkten, glasfaserverstärkten Bandagierung fixiert (vgl. Abbildung 10). Die Magnete selbst sind nicht mit einer Beschichtung auf Kunststoff- oder Metallbasis versehen. Jedoch sind die Magnete an der Oberfläche zur Korrosionshemmung phosphatiert. Für das Verkleben der Magnete und der Bandagierung werden je nach Motortyp unterschiedliche Harze verwendet, die unterschiedliche Festigkeiten bzw. Flexibilität aufweisen.

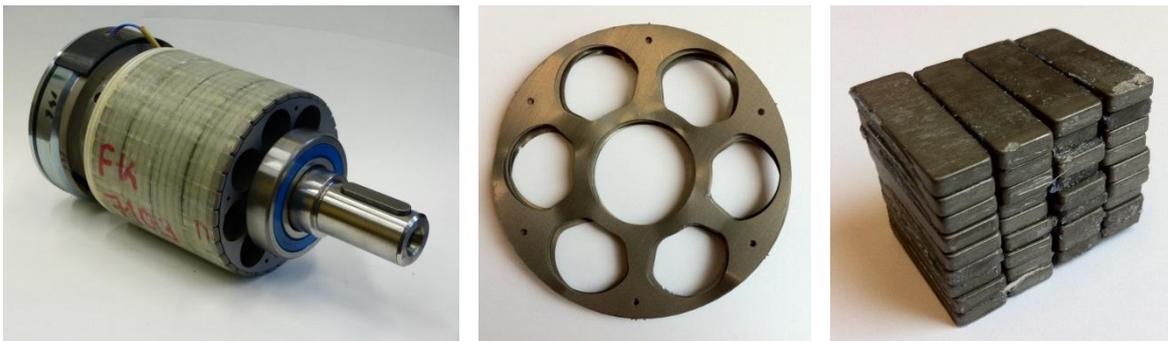


Abbildung 10: Rotor, Elektroblech und Magnete (v.l.) eines Motors mit Oberflächenmagneten

In elektrischen Motoren für Fahrzeugantriebe wird in vielen Fällen die Aufbauvariante mit vergrabenen Magneten (IPM, integrated permanent magnet, vgl. Abbildung 11) eingesetzt. Die Magneten werden in im Blechpaket des Rotors ausgesparte Taschen eingesetzt und mit Klebstoff oder durch Einspritzen von Kunststoff fixiert. Ein Fixieren der Magnete mittels Verstemmen wurde im Rahmen des MORE-Projektes untersucht.



Abbildung 11: Rotor, Rotorsegment und Magnete (v.l.) eines Motors mit integrierten Magneten

4.3.1 AP 3.1 Befundung und Diagnose

Ein Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung von Verfahren für die Demontage und Wiederverwendung von Elektromotoren bzw. deren Komponenten. Grundvoraussetzung für die Entwicklung geeigneter Verfahren sind Kenntnisse über den Zustand der Bauteile nach einem Einsatz im Fahrzeug oder Industrieanwendungen. Am Anfang des Verbundprojektes fand daher eine umfangreiche Befundung und Diagnose von Elektromotoren statt. Ein Teilaspekt war hierbei auch die eindeutige Bestimmung des Magnetmaterials (NdFeB, SmCo, AlNiCo, etc.).

Auswahl der Befundsobjekte

Für die Befundung von Rotoren mit **oberflächenmontierten Magneten** trafen über die Projektlaufzeit mehrere Lieferungen an Rückläufermotoren aus der Fertigung der Siemens AG ein. Da die Anzahl der Rückläufer an elektrischen Fahrtrieben aus dem Feld gering ist, wurden bauähnliche Synchronantriebe aus dem Portfolio der Siemens AG untersucht. Der Ausbau der Motoren aus dem Gehäuse und die Trennung von Rotor und Stator ist Stand der Technik, da solche Arbeitsabläufe im Servicebereich vorgenommen werden. Daher wurden nur vordemontierte Rotoren bei den Demontageuntersuchungen betrachtet.

Es wurden Rotoren unterschiedlichster Größe und Einsatzgebiete betrachtet, um eine Vielfalt an Schädigungen identifizieren zu können. Dabei wurde deutlich, wie sehr sich die verschiedenen Motoren in Größe, Gewicht und Geometrie voneinander unterscheiden. Ein einheitlicher Demontageprozess ist daher nur mit sehr hohem Aufwand zu verwirklichen, da die Werkzeuge den verschiedenen Bedingungen angepasst werden müssen.

Für die Demontageuntersuchungen von Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten im Rahmen des Projektes wurde deshalb beschlossen, nur Typen zu betrachten, welche die folgenden Kriterien erfüllen:

- Masse < 20 kg
- Magnetgröße: maximal 35 x 20 x 6 mm³, minimal 15 x 5 x 1 mm³

Für die Befundung von Rotoren mit **vergrabenen Magneten** wurden Elektromotoren aus Testläufen in Fahrzeugen und auf Prüfständen mit einer hohen Laufleistung von über 100.000 km bzw. hohen Drehmomentbelastungen, wie sie z. B. bei Fahrten abseits befestigter Straßen oder auf Gebirgsstraßen auftreten, ausgewählt. Die Rotoren dieser Antriebe haben typischerweise eine Masse von ca. 10 kg mit ca. 1,5 kg Magneten. Die Demontageverfahren sind im Kapitel 4.3.3 beschrieben.

Befundungsergebnisse

Unter den Rückläufer-Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten befanden sich auch solche, die äußerlich einen sehr schlechten Zustand aufweisen. Die Bauteile, besonders die Magnete, waren überzogen von Betriebsstoffen, Metallspänen und Rost. Bei Entfernung der Bandage zeigte sich jedoch bereits, dass die Magnete weniger stark angegriffen waren, als erwartet. Es wurden die Magnete von Blechen und Motorwelle getrennt. Anschließend wurden die einzelnen Teile gewogen und katalogisiert. Nach Demontage und Reinigung der Magnete wurde ersichtlich, dass die Magnete noch in gutem Zustand waren (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: links: stark verschmutzter Rückläuferrotor, rechts: Bruchfläche eines nur äußerlich verschmutzten Magneten dieses Rotors

Die Antriebs-Elektromotoren mit integrierten Magneten in Fahrzeugen sind in der Regel ein geschlossenes System, d. h., dass Medien wie z. B. Kühlmittel von außen nur kontrolliert in den Innenraum gelangen. Bei den untersuchten Elektromotoren zeigte sich bis auf den Außenmantel der Gehäuse keine Korrosion, vgl. Abbildung 13. Dies trifft insbesondere auch für die Magneten zu.



Abbildung 13: ausgebauter Rotor aus Fahrzeug-Dauerlauf (Laufleistung ca. 130.000 km)

Analyse der magnetischen Eigenschaften

Ein umfassendes Überprüfen der magnetischen Eigenschaften kann nur am ausgebauten Einzelmagnet erfolgen. Die Magnete müssen dafür möglichst zerstörungsfrei aus den Taschen bei Rotoren mit vergrabenen Magneten bzw. von der Oberfläche der Rotoren abgelöst werden. An den Magneten werden anschließend folgende Untersuchungen durchgeführt:

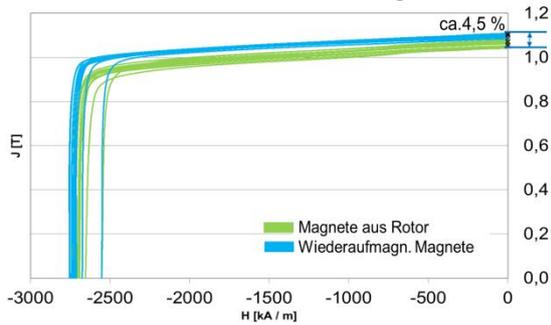
- Ermitteln des IST-Zustandes nach dem Ausbau:
 - Magnetisches Moment
 - J(H)-Kurve bei Raumtemperatur
- Vollständiges Nachmagnetisieren durch Impuls-Magnetisierungsanlage und Messung.
 - Magnetisches Moment
 - J(H)-Kurve bei Raumtemperatur

Bei der großen Vielfalt der Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten unterscheiden sich die Magnetisierungen und Temperaturstabilitäten der Magnete stark von Motor zu Motor. Das liegt an der großen Vielfalt der verwendeten Magnetlegierungen, selbst innerhalb der NdFeB-Familie. Weiterhin ist die Magnetisierung von der Position der Magnete auf dem Rotor abhängig; in der Nähe der Polübergänge ist die Magnetisierung geringer. Solche Einflussfaktoren müssen bei der Befundung und Diagnose der Antriebe berücksichtigt werden.

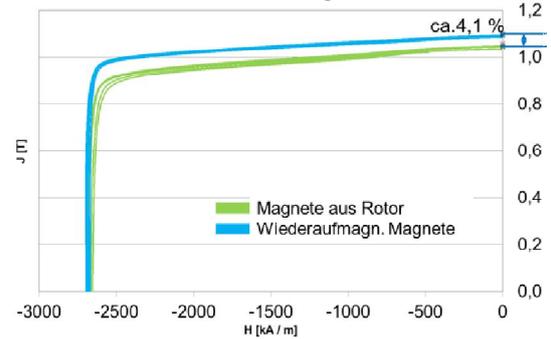
Messungen der magnetischen Eigenschaften der oberflächenmontierten Magnete belegen, dass sich die Eigenschaften der Magnete bei dieser Aufbauvariante ebenfalls im Betrieb nicht ändern.

Die Untersuchungen von Rotoren mit vergrabenen Magneten aus Fahrzeugen zeigen, dass sich die Magnete aus Elektromotoren mit hoher Kilometerleistung ähnlich verhalten wie die Magnete aus neuwertigen Elektromotoren (vgl. Abbildung 14). Die gebrauchten Magnete haben, bezogen auf ihre magnetischen Eigenschaften, im Prinzip Neuzustand. Durch die thermische Entmagnetisierung bei 350 °C erfolgt keine nachhaltige Schädigung des Magnetmaterials (vgl. Abbildung 15). Festgestellte leichte Defekte an der Oberfläche sind auf die Demontage zurückzuführen, jedoch nicht auf Korrosion. Eine irreversible Degradation der magnetischen Sättigung durch den Betrieb, auch bei hohen Belastungen, ist nicht zu erkennen. Die gemessenen Unterschiede in der Remanenz sind durch ein nicht vollständiges Aufmagnetisieren während der Produktion der Elektromotoren (Prototypen, keine Serienprodukte) zu erklären.

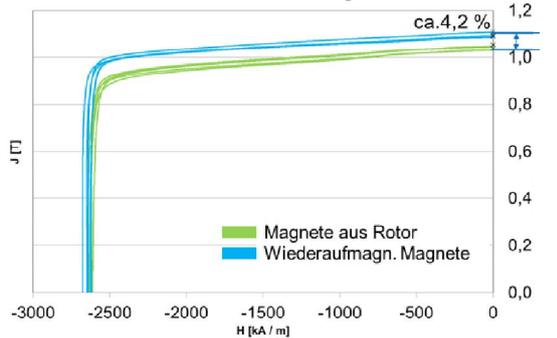
Rotor 2 mit 73700 km Laufleistung



Rotor 3 mit 0 km Laufleistung



Rotor 6 mit 0 km Laufleistung



Rotor 6 mit 0 km Laufleistung

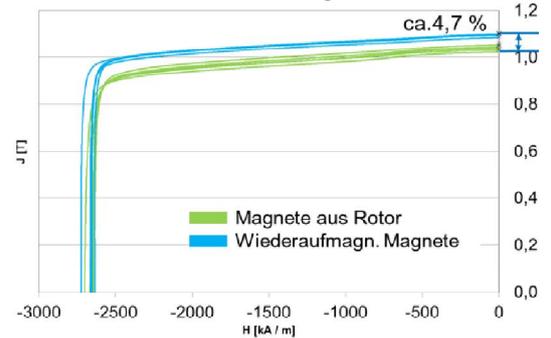


Abbildung 14: Vergleichende Diagramme der Messergebnisse (aus dem Rotor mit 70.000 km Laufleistung wurden 12 Magnete vermessen, aus den drei neuwertigen Rotoren wurden jeweils fünf Magnete vermessen), Quelle Daimler AG

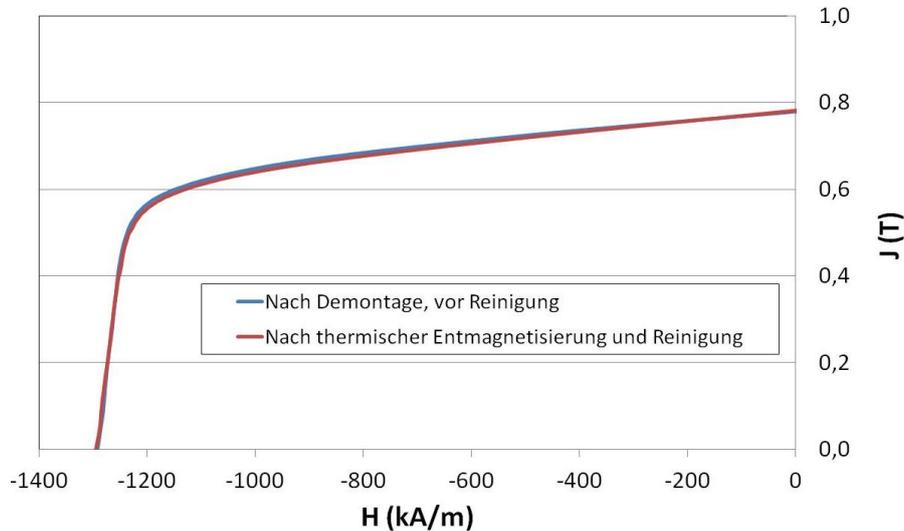


Abbildung 15: Hysteresekurven eines oberflächenmontierten Magneten direkt nach der Demontage sowie nach der thermischen Entmagnetisierung und Reinigung

Die sehr positiven Ergebnisse zeigen, dass eine direkte Wiederverwendung technisch möglich ist. Da jedoch alle Magnete eines Elektromotors in der Regel in Ordnung sind, ergibt sich kein Bedarf, diese Magnete als Ersatz für beschädigte Magnete zu verwenden. Die Möglichkeiten diese Magnete in weiteren Anwendungen einzusetzen werden im AP 5.2 (vgl. Kapitel 4.5.2) betrachtet.

Unterscheidung NdFeB/SmCo

Heutzutage werden in permanenterregten E-Motoren vorrangig NdFeB-Magnete eingesetzt. Je nach Anforderungsprofil wurden und werden jedoch auch andere Magnetmaterialien verwendet, z.B. SmCo-Legierungen. Für den Recyclingprozess ist aber eine Sortenreinheit des NdFeB-Materials eine wichtige Voraussetzung. Daher ist es notwendig, diejenigen Motoren-Rückläufer, welche mit anderen Magnetmaterialien bestückt sind, mittels einer schnellen, industriell einsetzbaren Methode zu identifizieren und einer anderen geeigneten Aufbereitung zuzuführen, so dass die Verunreinigung mit Fremdmaterial ausgeschlossen werden kann.

Zunächst wurde die Frage untersucht, ob ein potentieller Verwerter aus der Rückverfolgung über Hersteller und Motortyp ausreichend Informationen darüber erhalten kann, aus welchen Materialien die einzelnen Motorenkomponenten bestehen und wie eine sinnvolle Demontage erfolgen kann. Als Testfall wurde ein im Jahre 1986 gefertigter Siemens *Simodrive* aus der 1-FT Familie herangezogen. Montage- und Demontageanleitungen waren verfügbar, jedoch keine sog. Bill-of-Materials. Es ist dabei bekannt, dass für Synchronmotoren dieser Art bis ca. 1992 vorrangig SmCo-basierte Magnete verwendet wurden, aber nicht ausschließlich. Es kann in einigen Fällen bei permanenterregten Motoren auch mit dem Material AlNiCo gerechnet werden. Einige DC-Motoren besitzen auch Ferritmagnete. Letztlich zeigte sich, dass die Materialrückverfolgung über Herstellerangaben sehr aufwändig ist und auch eine Kennzeichnung der Materialien, vergleichbar mit der Kennzeichnung von Kunststoffen, aufgrund des hohen Aufwandes keinen Mehrwert für das Magnetrecycling besitzt.

Alternativ wurden zur Analyse der Materialzusammensetzung zwei unterschiedliche Verfahren getestet, die bereits in anderen Recycling-Anwendungen erfolgreich zur Trennung von Stoffgemischen eingesetzt werden. Da im Rahmen des Projektes eine schnelle Materialidentifizierung erreicht werden sollte, wurden tragbare Systeme für die Vor-Ort-Analyse getestet.

Energiedispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)

Bei dieser Methode werden die Atome des zu untersuchenden Materials durch Röntgenstrahlung angeregt. Durch Elektronensprünge in den Atomen entsteht eine charakteristische Fluoreszenzstrahlung, die mit Hilfe geeigneter Detektoren erfasst wird. So entstehen charakteristische Spektren, die eine Materialidentifizierung ermöglichen.

Die Messungen erfolgten an verschiedenen Magneten und Rotoren. Es zeigte sich, dass die Spektren der Materialien soweit variieren, dass SmCo und NdFeB zweifelsfrei voneinander unterschieden werden können (vgl. Abbildung 16). Auch eine Identifizierung durch die Magnet fixierende Glasbandage hindurch war möglich. Jedoch kann aufgrund der Überlappung der Spektrallinien von Eisen und Dysprosium der Dysprosium-Gehalt mit dieser Methode nicht quantifiziert werden. Dies ist nur mit Hilfe der empfindlicheren wellenlängendispersiven RFA möglich, das Verfahren ist jedoch nicht in einer tragbaren Variante erhältlich. Ein weiterer Nachteil bei der Nutzung tragbarer Röntgengeräte entsteht durch die Röntgenschutzverordnung, die intensive Schulung der Mitarbeiter und strenge Regeln bezüglich des Strahlenschutzes vorsieht.

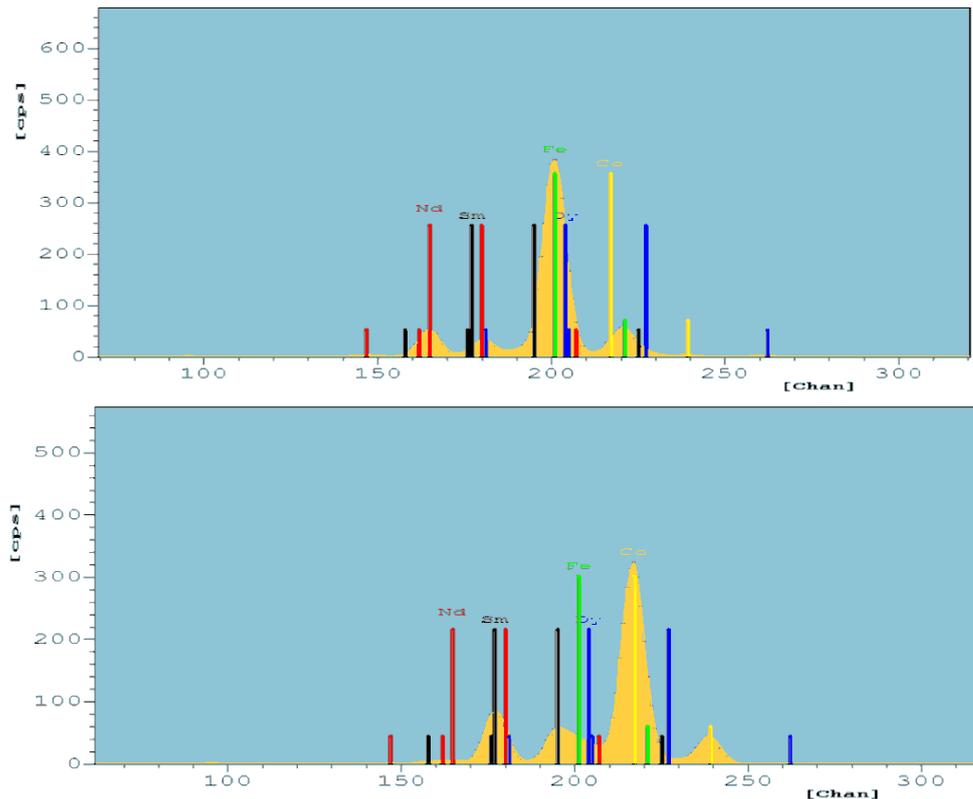


Abbildung 16: oben: RFA-Spektrum NdFeB; unten: RFA-Spektrum SmCo

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS).

Bei dieser Art der Laserspektroskopie wird durch einen intensiven Laserpuls Material von der zu prüfenden Oberfläche abgetragen. Dabei wird ein Plasma erzeugt, dessen Lichtemission charakteristisch für die atomare Zusammensetzung des Oberflächenmaterials ist. Ein geeignetes Spektrometer und die entsprechende Software erlauben nach einer Kalibrierung eine Identifikation verschiedenster Materialien.

Es konnte gezeigt werden, dass sich auch mit dieser Methode NdFeB und SmCo voneinander unterscheiden lassen (vgl. Spektren in Abbildung 17). Zudem kann nach einer entsprechenden Kalibrierung auch der Dysprosium-Gehalt ermittelt werden, was eine Vorsortierung des Magnetmaterials für ein werkstoffliches Recycling begünstigt. Da allerdings die Oberfläche des Metalls frei zugänglich sein muss, stört die evtl. vorhandene Bandage auf dem Rotor und muss vor der Prüfung auf jeden Fall entfernt werden. Zudem wird die Oberfläche der Magnete leicht beschädigt. Auch bei der Nutzung des Lasers gilt es, bestehende Sicherheitsvorschriften einzuhalten, diese sind aber im Vergleich zur Röntgentechnik wirtschaftlicher umsetzbar.

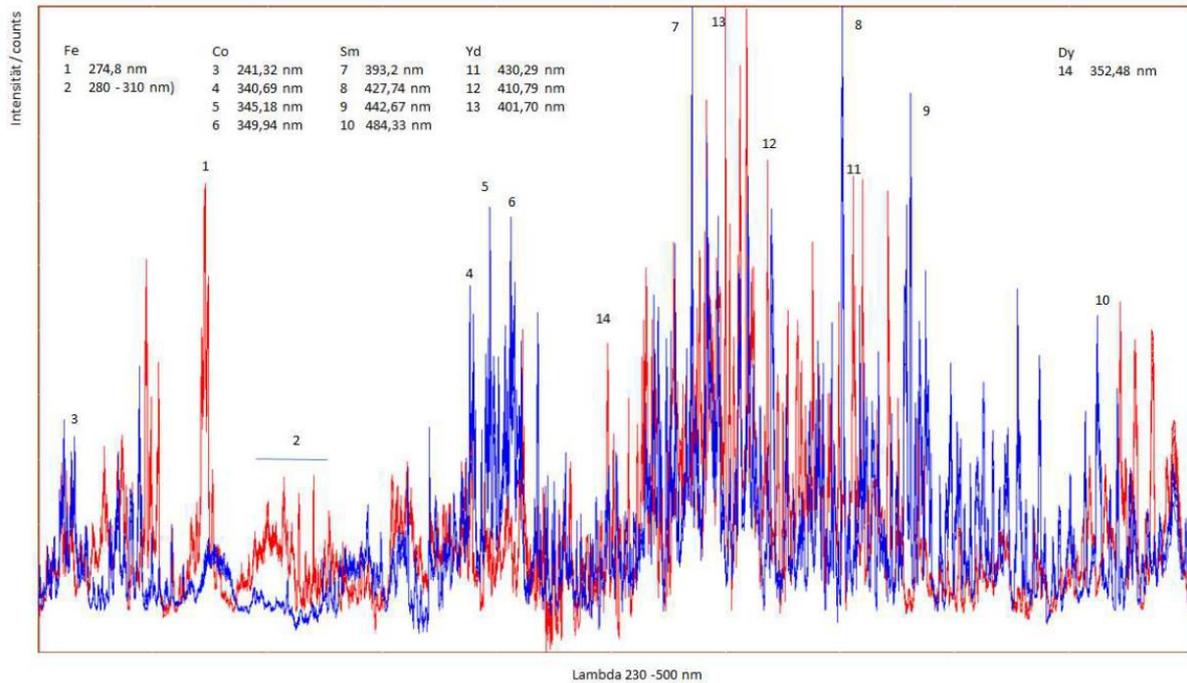


Abbildung 17: LIBS – Spektren von NdFeB (rot) sowie SmCo (blau)

Je nach gewünschter Sortierleistung eignen sich die beiden vorgestellten Methoden zur Unterscheidung der verschiedenen Magnetmaterialien. Bei der Auswahl des Verfahrens muss berücksichtigt werden, wie genau die Zusammensetzung bestimmt werden soll und welche Sicherheitsmaßnahmen einzuhalten sind. Zudem ist gegebenenfalls eine Vorbereitung der Rotoren durch Entfernung der stabilisierenden Bandage nötig. Dieser Schritt wird jedoch im Laufe des folgenden Recyclingprozesses immer erforderlich sein.

4.3.2 AP 3.2 Reparatur- und Wiederverwendung von Elektromotoren

Der in der Regel auftretende Reparaturfall bei Elektromotoren ist das Tauschen von Lagern. Bei Industrieanwendungen und insbesondere wenn es sich um Sonderbauformen handelt, wird die Kupferwicklung im Stator ausgetauscht. Ein Austausch der Magnete findet nicht statt.

Die Reparatur ist gemäß der VDI-Richtlinie 2243 ebenfalls der Wiederverwendung zuzuordnen. Im MORE-Projekt sind insgesamt drei Unterstufen dieser Recyclingstufe betrachtet worden. Es handelt sich im Einzelnen um die direkte Verwendung (ReUse) eines Motors oder einer seiner Hauptkomponenten (Stator und Rotor), die Reparatur (RePair) bzw. das Remanufacturing (ReMan).

Grundlegende Voraussetzung für die Reparatur und Wiederverwendung von Elektromotoren sind der zerstörungsfreie Ausbau aus der Anwendung z. B. Fahrzeug und die Demontage. Konstruktive Maßnahmen, die dieses Ziel unterstützen, sind in den Design-Empfehlungen (vgl. Anhang) aufgeführt. Die Demontageverfahren sind im nachfolgenden Kapitel 4.3.3 beschrieben.

Der erste Schritt bei der Reparatur und Wiederverwendung ist die Reinigung. Reste der Kühl- und Schmiermittel müssen entfernt werden. Ggf. magnetisch nach der ersten Reinigungsstufe noch anhaftende Metallspäne sind ebenfalls zu entfernen. Bei kleinen Stückzahlen und geringer Verschmutzung können diese mit einem Klebeband „abgetupft“ werden. Für den Fall, dass eine größere Stückzahl gereinigt werden muss, wurde der Prototyp eines Aufbaus zum Abschleudern der Metallpartikel erfolgreich getestet, vgl. Abbildung 18. Der Rotor dreht dabei an mindestens zwei Magnetleisten vorbei, die entweder den Nord- bzw. den Südpol auf den Rotor gerichtet haben. Die Metallpartikel sammeln sich auf diesen Magnetleisten oder liegen in der Aufnahme in Drehrichtung hinter den Magnetleisten.

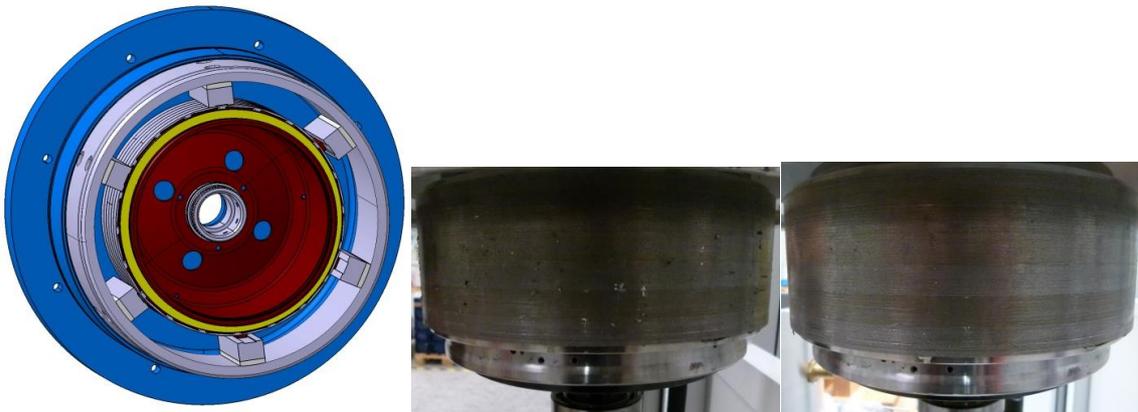


Abbildung 18: Abschleudervorrichtung für Metallpartikel und Versuchsergebnisse

Wegen des allgemein sehr guten Zustandes der Elektromotoren nach dem Einsatz ist eine direkte Wiederverwendung des Gesamtantriebs oder der Hauptkomponenten prinzipiell möglich. Standard-Verschleißteile wie z. B. Lager werden bei dem Vorgang routinemäßig ausgetauscht. Allerdings sind wegen des guten Zustandes der Elektromotoren die zu erwartenden Bedarfe sehr gering.

Dies gilt auch für die beiden weiteren möglichen Fälle RePair und ReMan. Für Rotoren mit vergrabenen Magneten wurde ein Remanufacturing im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführt. Dazu wurden drei Rotoren in die Einzelteile Rotorwelle (Topf) und Magnetringe zerlegt. Nach einer Überprüfung der Magnetringe auf Beschädigungen und Verzug wurde auf einer der Rotorwellen ein Rotor erfolgreich wieder aufgebaut, vgl. Abbildung 19.



Abbildung 19: links: Abpressen der Rotorsegmente, rechts: mit abgepressten Segmenten neu aufgebauter Rotor

4.3.3 AP 3.3 Demontageverfahren und Vereinzelung von Magneten aus Elektromotoren sowie deren Entmagnetisierung

Für die Demontage der Magnete aus den Rotoren wurden verschiedene Techniken getestet. Aufgrund der prinzipiellen Unterschiede im Aufbau von Rotoren mit oberflächenmontierten (SPM) und vergrabenen (IPM) Magneten werden die Typen getrennt betrachtet. Weiterhin werden in diesem Kapitel Entmagnetisierungsverfahren vorgestellt und bewertet.

Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten (SPM)

Manuelle/mechanische Demontage

Zunächst muss bei den oberflächenmontierten Magneten die fixierende Glasbandage entfernt werden. Diese Bandagierung lässt sich, abhängig vom verwendeten Harz, unterschiedlich leicht lösen. Teilweise ist die Haftung so gut, dass beim Entfernen der Bandage die fixierten Magnete aufgrund ihrer Sprödigkeit splintern, vgl. Abbildung 20. Diese Schädigung der Magnete verhindert die direkte Wiederverwendung und bedeutet zusätzlich, dass in Demontagebetrieben Vorsichtsmaßnahmen zur Wahrung der Arbeitssicherheit ergriffen werden müssen. Nach der Entfernung der Bandage verbleiben typischerweise Rückstände des Harzes auf den Magneten.

Die Magnete wurden anschließend meist durch Aufbiegen der Blechpakete und anschließendes Abhebeln entfernt. Alternativ konnte die Klebeverbindung durch einfaches Abmeißeln der Magnete gelöst werden. Diese Methode zeigt jedoch diverse Nachteile: Da kaum geeignete Angriffspunkte für Werkzeuge vorhanden sind und Kraft zum Lösen der Klebeverbindung aufgebracht werden muss, zeigen die Magnete leichte bis schwere Beschädigungen in Form von Abplatzungen bis hin zum Zerschlagen. Zudem bleiben die Magnete bei dieser Form der Demontage aufmagnetisiert, was weitere Bearbeitungsschritte unter Umständen erschwert. Generell muss davon ausgegangen werden, dass eine thermische Entmagnetisierung der Magnete vor der Weiterbehandlung erforderlich ist. Der Klebstoff, der für die Fixierung der Magnete verwendet wird, bleibt zunächst unverändert auf den Magneten zurück. Die Erkenntnisse dieser Demontageversuche dienten als Grundlage für die Entwicklung der automatisierten Demontagevorrichtung des FAPS.



Abbildung 20: oben: Rotor nach Bandageentfernung mit beschädigten Magneten, unten: Magnetrückstände auf abgewickelter Bandage

Da die Verwendung von Standardwerkzeug zu Beschädigungen der Magnetoberfläche oder sogar zur Zerstörung des spröden Körpers führt, wurden unterschiedliche Konzepte für Spezialwerkzeuge zum Abschneiden der Magnete untersucht, bewertet und ein geeignetes Verfahren (Abbildung 21) identifiziert.

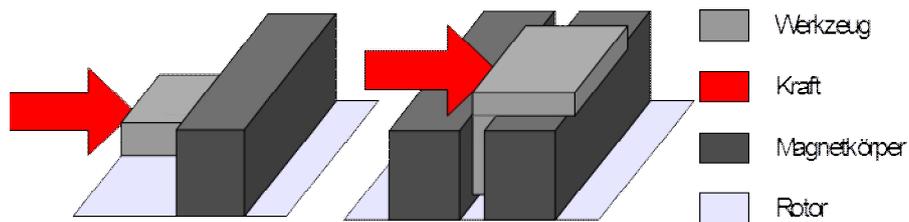


Abbildung 21: Prinzipskizze des Abscherprozesses für oberflächenmontierte Magnete

Nach der Auswahl des oben gezeigten Abscherprozesses wurde das zugehörige Werkzeug (Abbildung 22) gefertigt und diverse Vorversuche zur Umsetzbarkeit, zum benötigten Kraftaufwand für die Abschervorrichtung und zu möglichen Beschädigungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass mit dem ausgewählten Abscherprozess keine Beschädigung der Magnete auftritt.

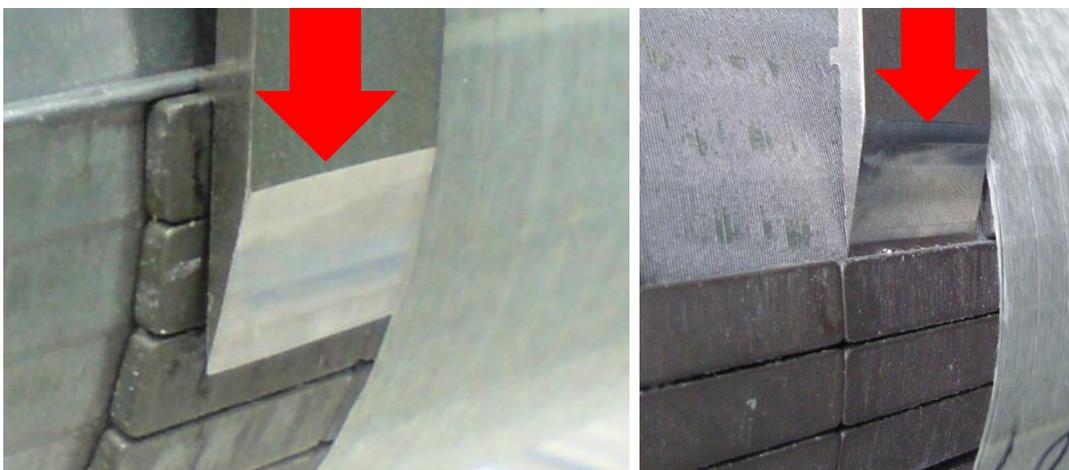


Abbildung 22: Werkzeug für Vorversuche hinsichtlich Umsetzbarkeit und Kraftaufwand

Thermische Vorbehandlung

Zudem legen die Ergebnisse der mechanischen Demontage die Schlussfolgerung nahe, dass eine thermische Vorbehandlung des Rotors zur Degradation der Klebstoffe und Harze in vielen Fällen unumgänglich ist. Bei der Pyrolyse der Klebstoffe wurde aber jedoch gleichzeitig die Gefahr gesehen, dass das Magnetmaterial mit freigesetztem Wasserstoff reagiert und dadurch geschädigt wird („Wasserstoffversprödung“). Da die Magnete vor einer weiteren Behandlung/Bearbeitung thermisch entmagnetisiert (oberhalb der Curie-Temperatur ($T_{\text{Curie}}(\text{NdFeB})$ ca. 350 °C)) werden müssen, lässt sich dieser Schritt in die thermische Vorbehandlung integrieren. Die Entmagnetisierung wird im nachfolgenden Kapitel detailliert dargestellt.

Bei Erhitzen eines Rotors zersetzen sich die verwendeten Klebstoffe mit zunehmender Temperatur. Wird genügend Klebstoff abgebaut, so lassen sich die Magnete nach dem Abkühlen des Rotors beschädigungsfrei auch ohne Einsatz von Werkzeug vom Rotor entfernen. Da sich der Klebstoff bereits bei Temperaturen um 200 °C zu lösen beginnt, kann die magnetische Abstoßungskraft zwischen den einzelnen Magneten größer werden als die Haftkraft. Dann kann es passieren, dass einzelne Magnete unkontrolliert vom Rotor weggeschleudert werden, was zu Schäden an den Magneten selbst sowie am Ofen führen kann. Daher wird während des thermischen Prozesses eine temporäre hitzebeständige Magnetfixierung, z.B. durch eine Lochblechhülse (Abbildung 23), benötigt. Zudem kann der sich zersetzende Klebstoff zu starker Rauchentwicklung führen. Eine geeignete Absaugung für die entstehenden Zersetzungsprodukte ist daher erforderlich.

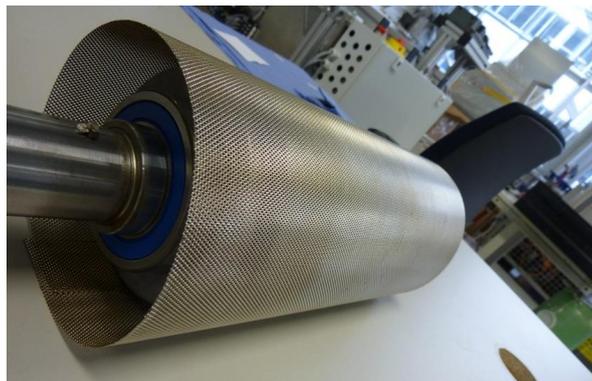


Abbildung 23: Rotor mit schützender Lochblechhülse

Im Rahmen der Demontageversuche wurden verschiedene Rotoren in einem Ofen bei 350°C in Luft entmagnetisiert (vgl. Abbildung 24). Ein Rotor wurde entmagnetisiert, nachdem die Glasbandage entfernt wurde. Nach der Entmagnetisierung und dem Abkühlen konnten die Magnete einfach vom Blechpaket gelöst werden, da sich der Klebstoff unter den Magneten ausreichend zersetzt hatte. Eine Sichtkontrolle ergab, dass die Magnete kaum beschädigt wurden, nur 10 % der vorhandenen Magnete wiesen minimale Abplatzungen auf. Diese Schäden sind so gering, dass die Magnete einer direkten Wiederverwendung zugeführt werden können.

Ein weiterer Rotor wurde entmagnetisiert, bei dem die Bandage erst nach der Behandlung im Ofen entfernt wurde. Dabei zeigte sich, dass der Klebstoff, der sich zwischen Blechpaket des Rotors und Magnet befindet, nur teilweise zersetzt wird. Die Klebstoff-Masse wird dabei zähflüssig und erstarrt wieder beim Abkühlen. Dadurch müssen die Magnete anschließend weiterhin mechanisch von den Rotoren entfernt werden.

Das Harz der Glasfaserbandage verhält sich ähnlich wie der Klebstoff unter den Magneten. So kann es bei der Entfernung der Bandage nach der Temperaturbehandlung zu einer solchen Schädigung der Magnetoberfläche kommen, dass eine Wiederverwendung der Magnete nicht mehr möglich ist. So wurden beim Abwickeln des Glasfaserbandes die Magnete z.T. stark beschädigt, beim Rest der Magnete war die Oberfläche leicht angegriffen. Daher wird dringend empfohlen, die Bandagierung vor einer thermischen Behandlung von Magneten und Rotoren vollständig zu entfernen.



Abbildung 24: Rotoren nach Entmagnetisierung im Ofen, teilweise mit Bandagierung

Klebstoffentfernung durch chemische Behandlung

Neben der thermischen Klebstoffentfernung wurde zudem eine Methode getestet, die mittels chemischer Behandlung sowohl die Entfernung der fixierenden Bandage als auch die Ablösung der Magnete vom Blechpaket gewährleisten sollte. Dazu wurden sowohl ein bei 350 °C in Luft thermisch entmagnetisierter sowie ein aufmagnetisierter Rotor wie folgt behandelt:

Entmagnetisierter Rotor: Die Klebstoffpolymere der Bandage sind bereits durch die Vorbehandlung der thermischen Entmagnetisierung zum Teil zersetzt worden. Bei der anschließenden mehrstündigen Behandlung (> 3 h) des Rotors in 1,5 molarer Natronlauge (NaOH) bei 120 °C - 130 °C werden die nicht zersetzten Anteile des Kondensationsklebstoffes hydrolysiert. Nach Abkühlung und Abspülen der Lauge mit Wasser lassen sich die Glasfasern der Bandage, einschließlich der meisten Magnete, mechanisch relativ leicht (z. B. durch Bürsten) entfernen. Auf den Magneten selbst finden sich jedoch noch Rückstände von verkoktem Kleber, die nur durch stärkere mechanische Maßnahmen (z.B. Schleifen) entfernt werden können.

Magnetisierter Rotor: Der Rotor wurde ohne weitere Vorbereitung der gleichen mehrstündigen Behandlung in 1,5 molarer NaOH bei 120-130°C ausgesetzt. Dabei werden ebenfalls die Kondensationsklebematerialien der Bandage hydrolysiert, so dass sich die Glasfasern der Bandage, nach Abkühlung und Abspülen der Lauge mit Wasser, mechanisch relativ leicht entfernen lassen, jedoch schwerer als mit Vorbehandlung. Die Magnete sitzen allerdings noch ziemlich fest auf dem Blechpaket. Dies ist nicht nur durch die magnetische Haftung bedingt, auch wurde der Klebstoff unter den Magneten nicht komplett gelöst (vgl. Abbildung 25). Um den restlichen Klebstoff zu lösen, wurde der Rotor für mehrere Stunden in siedendem Dimethylformamid behandelt, herausgenommen, abgespült und in einem Trockenschrank für 10 min bei ca. 250 °C erhitzt. Dabei bildete sich kein Rauch. Die Magnete konnten nach Abkühlung des Rotors leicht entfernt werden; die Magnetkraft musste dabei natürlich noch überwunden werden.

Aufgrund des enormen Aufwandes an Chemikalien, Heizenergie und Zeit sowie der weiteren erforderlichen Reinigungsschritte wurde diese Art der Demontage jedoch als nicht zielführend bewertet und daher nicht weiter untersucht.



Abbildung 25: Magnetisierter Rotor nach Behandlung in Natronlauge und Entfernung der Bandagierung

Torque-Motoren-Läufer

Neben den hauptsächlich betrachteten Synchronmaschinen mit oberflächenmontierten Magneten konnten auch Torque-Motoren, eine weitere Unterart der Elektromotoren, untersucht werden. Diese Motoren-Art wird nur in geringen Stückzahlen für Anwendungen in der Fertigungsindustrie produziert und findet keine Anwendung in der E-Mobilität. Daher wurde im Rahmen von MORE keine automatisierte Demontage entwickelt. Aufgrund des äußerst stabilen Aufbaus der Läufer (die Magnete sind auf der Läuferaußenseite verklebt, mit Epoxidharz verspachtelt und lackiert), gaben die Herausforderungen bei der Demontage jedoch nützliche Hinweise für die Vervollständigung der Design-Richtlinie (vgl. Kapitel 4.2).

Die Magnete konnten von Hand mit einem sehr hohen Kraftaufwand, der eine Beschädigung der Magnete nach sich zog, vom Blechpaket entfernt werden. Es wurde versucht, die Magnete im magnetischen Zustand zu reinigen. Lack und Kleber ließen sich mit Aceton entfernen, der Epoxid-Verguss konnte jedoch nicht chemisch oder mechanisch entfernt werden. Die Magnete wurden bei 350 °C in Luft entmagnetisiert. Dabei verkohlte das Epoxid unter erheblicher Rauchbildung und ließ sich so vom Magnet entfernen.

Demontagetechnologien für Rotoren mit vergrabenen Magneten

Wie auch im vorherigen Kapitel zur Wiederaufbereitung bzw. Wiederverwendung von Rotoren (Reman) müssen für die Demontage der Einzelmagnete zunächst die Rotorsegmente von der Welle bzw. einem Träger abgedrückt werden. Da die Magnete im Vorfeld nicht entmagnetisiert wurden, haften die Segmente (Ring) noch aneinander. Dies erfolgt im nachfolgenden Schritt. Abbildung 26 zeigt den prinzipiellen Ablauf in der Trennvorrichtung.

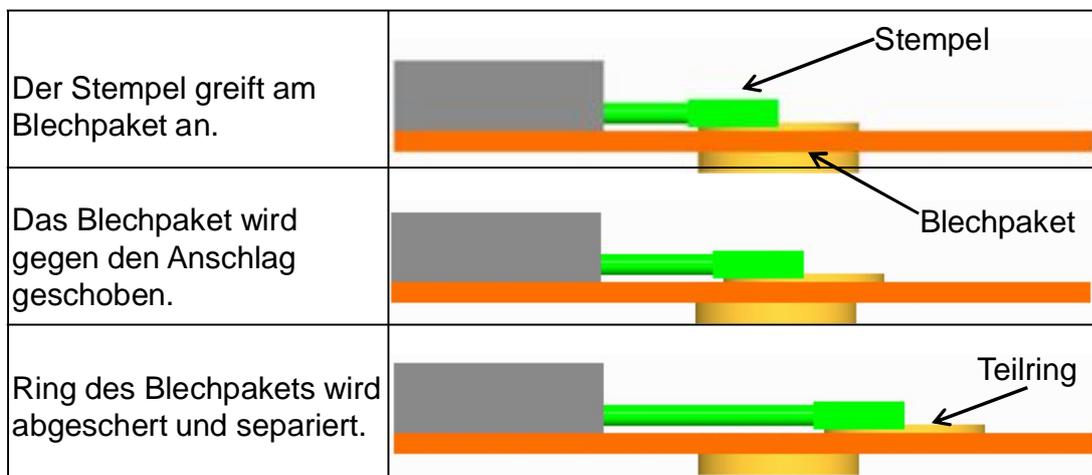


Abbildung 26: Abschieben einzelner Teilblechpakete

Liegt nun ein Ring des Rotorblechpakets vor, so ist vorgesehen, die Magnete ohne weitere Vorbehandlung mittels geeigneter Stempel und einer Pressvorrichtung (vgl. Abbildung 27) auszutreiben. Dabei ist die jeweilige Fixierung, wie Klebstoff oder Kunststoffumspritzung der Magnete im Blechpaket zu beachten. Der Auspressvorgang soll derart gestaltet werden, sodass alle Magnete eines Ringes mit einem Hub der Pressvorrichtung herausgedrückt werden. Dabei dürfen sich die Magnetkörper, insbesondere die benachbarten beim Herunterfallen nicht beeinflussen.

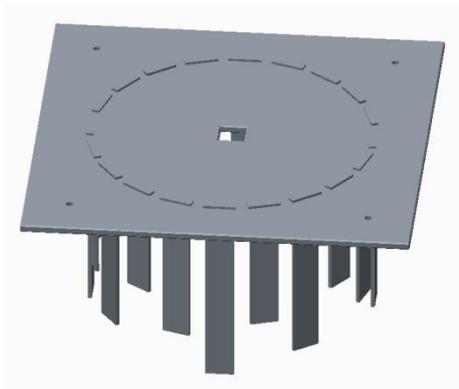


Abbildung 27: Auspressstempel mit Stempelinsätzen

Zerstörende Demontage

Für ein rohstoffliches Recycling können auch Schrottfractionen mit einem hohen Magnetanteil eingesetzt werden. Die Untersuchungen zu einer zerstörenden Demontage von Elektromotoren sind im Kapitel 4.4.2 beschrieben.

Entmagnetisierung von Selten-Erd-Magneten

Für das Recycling von Magnetmaterial ist in den meisten Fällen eine Entmagnetisierung für den Versand, eine sichere Demontage oder eine nachfolgende Wiederaufbereitung unumgänglich. Eine Entmagnetisierung kann zum einen im eingebauten Zustand, nach dem Trennen der Teilblechpakete oder nach dem Demontieren der Magnete erfolgen. Die nachfolgend aufgeführten Prozesse sind mit jeweiligen Anpassungen sowohl für den gesamten Rotor als auch einzelne Magneten umsetzbar. Die verschiedenen Anforderungen an die Entmagnetisierungsprozesse sind in Abbildung 28 zu erkennen. Als Beispiel kann hier ein klassischer Muffelofen angeführt werden, in den bei geeigneter Größe der Rotor selbst und natürlich auch die Einzelmagnete gelegt werden können.



Abbildung 28: Anforderungen an geeignete Entmagnetisierungsverfahren

Das Entmagnetisieren ist über eine Vielzahl thermischer Verfahren möglich. Gemeinsam haben dabei alle die Erwärmung des Magnetkörpers auf die Curie-Temperatur, bei der die Magnetisierung nicht mehr bestehen kann. Die spezifische Curie-Temperatur für die untersuchten NdFeB-Magnete ($T_{\text{Curie}}(\text{NdFeB})$) beträgt ca. 350°C.

Eine Variante zum Erreichen der Curie-Temperatur stellt die Konvektion und Wärmeleitung dar. Die Magnete oder auch ganze Rotoren können in Öfen über Konvektion und Wärmeleitung auf 350°C erwärmt werden. Insbesondere bei demontierten Magneten ist ein Durchlaufofen bei einer automatisierten Demontagelinie einsetzbar (siehe Abbildung 29).

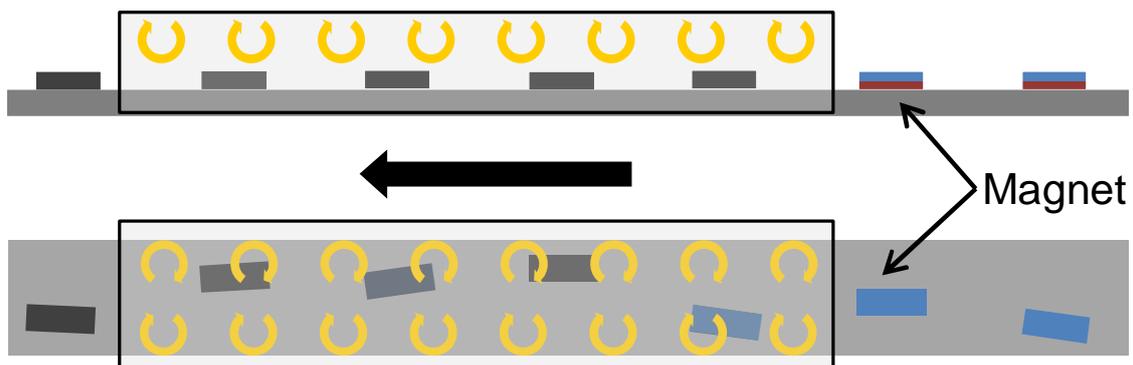


Abbildung 29: Erwärmung im Durchlaufofen

Abbildung 30 zeigt eine Möglichkeit der Erwärmung mittels Strahlung. Im angeführten Fall besteht die Strahlungsquelle aus Infrarotstrahlern, welche die einzelnen Magnete bestrahlt und damit erwärmt. Um diese Variante für eine Automatisierungslösung einsetzen zu können, sollten die Strahler über einem Förderband, auf dem sich die Magnete bewegen angeordnet werden.

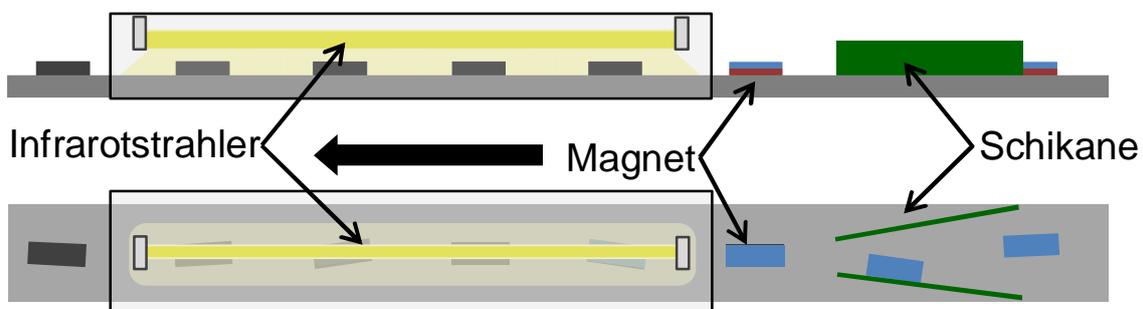


Abbildung 30: Erwärmung durch Infrarotstrahlung

Als weitere Variante kann die elektrische Leitfähigkeit der Magnetmaterialien für das Erwärmen genutzt werden. Wird ein Magnet an zwei gegenüberliegenden Teilen kontaktiert und ausreichend bestromt, erwärmen die ohmschen Verluste den Magneten (Abbildung 31). Für eine zuverlässige Funktion dieses Verfahrens, ist eine gute Kontaktierung, die zur Übertragung von hohen Strömen geeignet ist, unabdingbar.

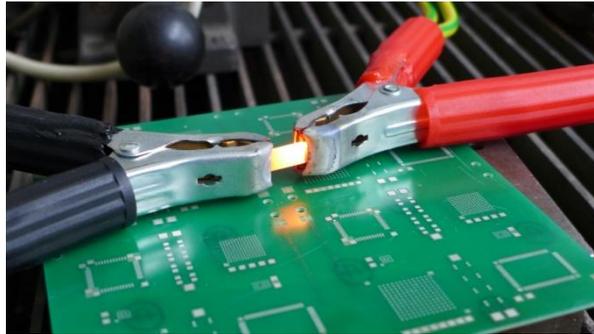


Abbildung 31: Erwärmung durch Bestromung

Die induktive Erwärmung, die schematisch in Abbildung 32 gezeigt wird, stellt eine schnelle Möglichkeit zur Entmagnetisierung dar. Dabei wird ebenfalls die elektrische Leitfähigkeit des Magnetmaterials genutzt. Durch hochfrequente von einer Spule erzeugte magnetische Wechselfelder wird ein Strom im Magneten generiert, der wiederum durch die ohmschen Verluste diesen erwärmt. Die Induktionsspulen müssen hierbei allerdings an die Magnete angepasst werden.

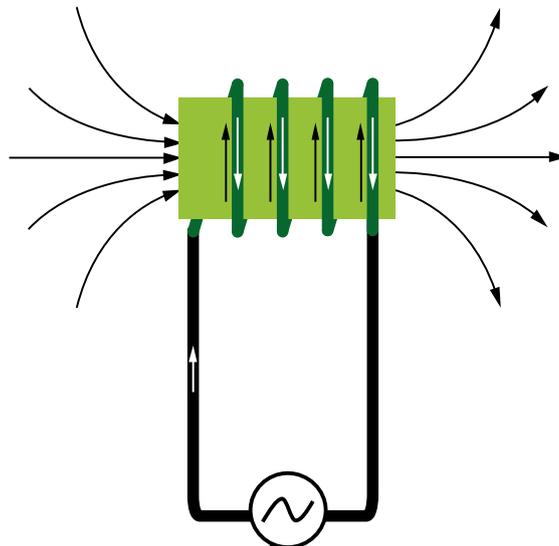


Abbildung 32: Erwärmung durch Induktion

Neben der verschiedenen Alternativen für eine thermische Entmagnetisierung kann die Magnetisierung auch durch das Einprägen äußerer magnetischer Felder aufgehoben werden. Dabei ist anzumerken, dass es kompliziert ist, eine vollständige Entmagnetisierung zu erreichen. Zum einen ist es möglich, ein magnetisches Gegenfeld, das durch eine Impulsentladung erzeugt wird, aufzuprägen oder zum anderen ein abklingendes Wechselfeld. Um eine vollständige Entmagnetisierung zu erreichen müssen jedoch die magnetischen Felder und die Magneten sehr präzise zueinander ausgerichtet werden.

Für einen automatisierten Demontageprozess mit nachgelagerter Entmagnetisierung sind das Erwärmen über Konvektion oder Infrarotstrahler in einem Durchlaufofen am besten geeignet.

Mit den vorgestellten Demontageverfahren wurden elektrische Antriebe aus Fahrzeugen ausgebaut und zerlegt. Die ermittelten Zeiten sind eine der Datenbasen für das ganzheitliche Recyclingkonzept das in Kapitel 4.6.1 beschrieben ist. Dort sind in der Tabelle 19 die Zeiten dokumentiert.

4.3.4 AP 3.4 Konzeptentwicklung und Demonstratoren für Automatisierungslösungen

Aus den im letzten Kapitel beschriebenen Technologien wurden Prozessketten für eine mechanisierte und im Endausbau auch automatisierbare Demontage der Magnete entwickelt. Im ersten Montageschritt werden Rotor und Stator getrennt. Dies erfolgt sowohl für Traktionsmotoren und Antriebsmotoren für Industrieanwendungen als auch bei dem Ausbau der in Fahrzeuggetriebe integrierten E-Maschinen. Diese Statoren können mit den im Recycling üblichen Verfahren in die Hauptfraktionen Kupfer und Elektroblech getrennt werden. Bei den Rotoren sind jedoch die Unterschiede im Aufbau von Typen mit Oberflächen- und vergrabenen Magneten so groß, dass eine gemeinsame Prozesskette bzw. Demontagelinie nicht aufgebaut werden kann.

Am Ende der Demontage sollen entmagnetisierte Magnete vorliegen, die wiederverwendet oder in das Materialrecycling gegeben werden können. Bei der Konzeptionierung wurden die technische Machbarkeit aber auch die Belastungen für die Umwelt (Energie, Ressourceneinsatz) in Betracht gezogen. Z.B. ist der Energieaufwand für das Entmagnetisieren bei den Einzelmagneten im Vergleich zur Entmagnetisierung im verbauten Zustand am geringsten. Daher wurden im Verbundprojekt Prozessketten entwickelt, bei welchen dieser Prozessschritt am Ende steht.

Prozesskette für Rotoren mit Oberflächenmagneten (SPM)

Nach der Trennung von Rotor und Stator, wie zuvor beschrieben, beginnt die Demontage von oberflächenbestückten Magneten mit dem Abziehen von eventuell auf der Welle vorhandenen Lagern. Sobald alle Anbauteile des Rotors entfernt wurden, wird die Glasfaser-Bandagierung an einer Position geöffnet und abgewickelt. Dies kann auf unterschiedliche Arten geschehen, zum Teil unter Erwärmung der Bandage (Abbildung 33). Sind die Oberflächenmagnete freigelegt, wird unterhalb eines Magneten oder unterhalb einer ganzen Magnetreihe bspw. im Poltrenner der Magnetgreifer angesetzt (Abbildung 34). Der Greifer wird angehoben, schert mit seiner L-Form den Magnet ab und bricht dadurch die Verbindung des Klebers zwischen Magnet und Blechpaket auf. Hierauf schwenkt der Greifer vom Rotor weg, wobei der abgescherte Magnet an diesem auf Grund der größeren Magnetkraft haften bleibt. Der abgenommene Magnetkörper wird nun polrichtig im jeweiligen Magazin zur Entmagnetisierung oder Weiterverarbeitung gespeichert.

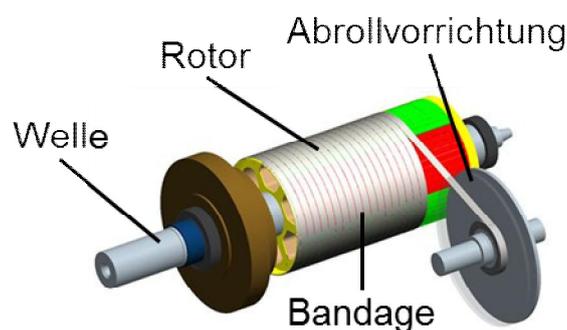


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Bandage-Entfernung

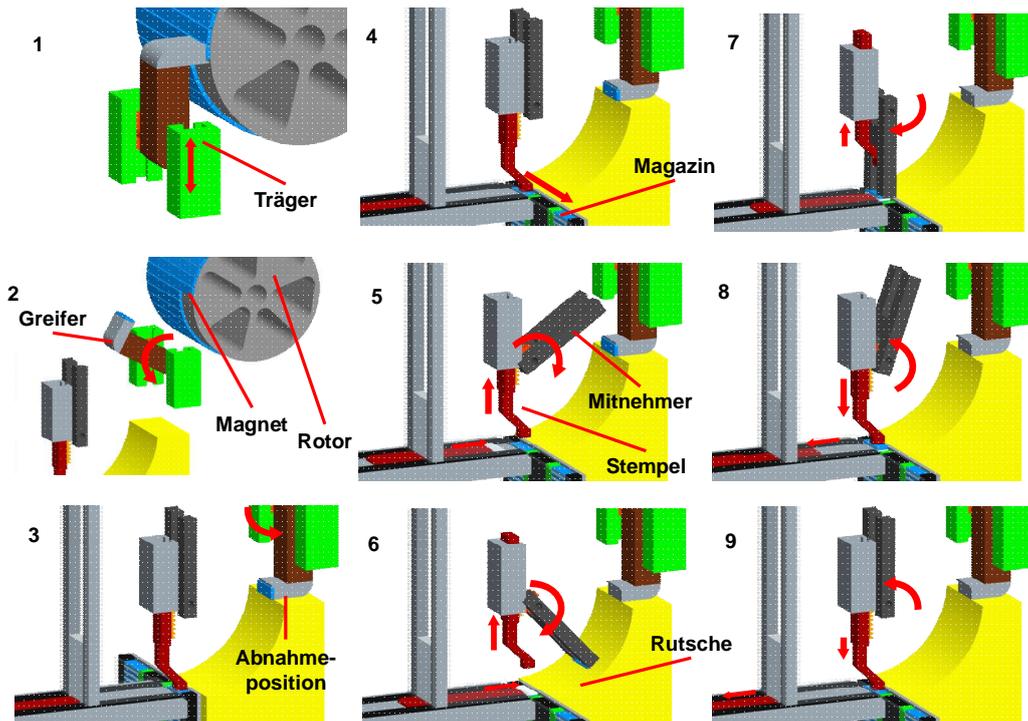


Abbildung 34: CAD-Skizze der Abnahme von oberflächenbestückten Permanentmagneten

Prozesskette für Rotoren mit vergrabenen Magneten (IPM)

Von den ausgebauten Rotoren werden die Segmente zunächst abgepresst. Da sich diese Ringe wegen der noch aufmagnetisierten Magnete stark anziehen, muss jeder abgepresste Ring sofort separiert werden. Um die aufwendige Zwischenlagerung der Einzelsegmente einzusparen erfolgt direkt anschließend das Auspressen der Magnete.

Idealerweise durchlaufen die vereinzelt Magnete nacheinander die Entmagnetisierungsstrecke. Unter dem Gesichtspunkt einer einfachen Automatisierbarkeit werden hierfür Infrarotstrahler vorgeschlagen. Auf einem Metallgliederband können die vereinzelt Magneten unter diesen Strahlen entlang geführt werden.

Nachfolgend werden die Demonstrationsanlagen beschrieben, mit denen die konzeptionierten Prozessketten im Verbundprojekt erprobt wurden.

Demonstrationsanlage für Rotoren mit Oberflächenmagneten

Das zuvor in Abbildung 34 erläuterte Konzept wurde erfolgreich umgesetzt und wird in Abbildung 35 gezeigt. Die realisierte Demontageanlage ist in der Lage, einzelne Magnete automatisiert von Rotoren zu demontieren und versandfertig zu stapeln. Dabei wird zunächst die Verklebung zwischen Magnet und Rotor durch Abscheren gelöst und der Magnet durch einen Eisengreifer vom Blechpaket abgenommen. Ein weiterer Greifer transportiert den Magnet in ein Magazin, wo dieser, durch ein Kunststoffplättchen von den anderen Magneten getrennt, gestapelt wird. Die Zustellbewegung auf den nächsten Magnet geschieht durch Drehung des Rotors. Die Anlage kann mit geringem Rüstaufwand an Magnete der Größen 15x5x1 mm bis 40 x 15 x 6 mm angepasst werden. Die Durchmesser der aktuell demontierbaren Rotoren betragen 70 mm bis 200 mm.

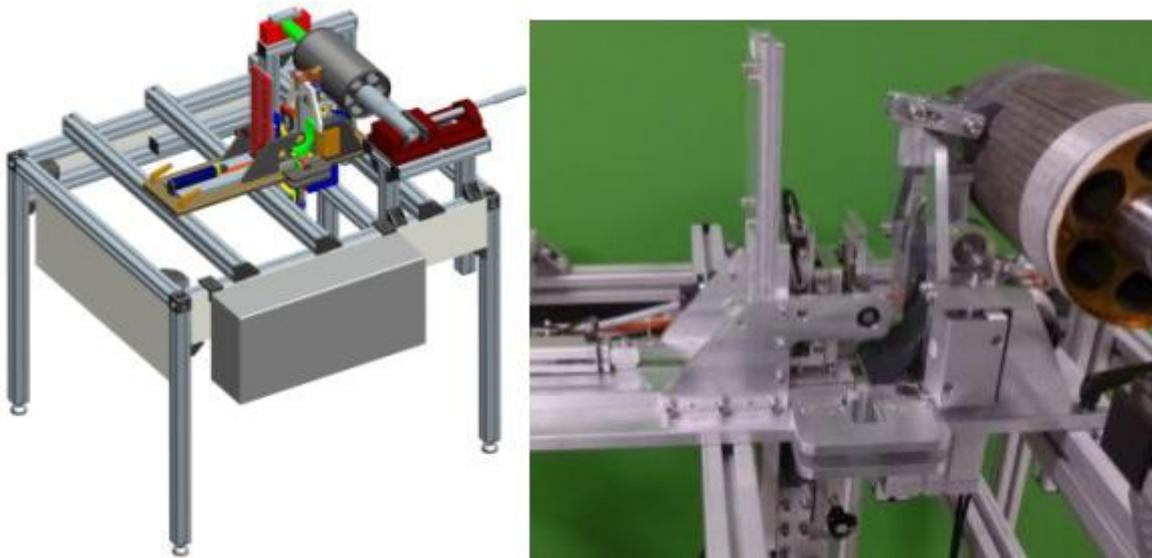


Abbildung 35: CAD-Modell (links) und realer Aufbau (rechts) des Demonstrators für Rotoren mit oberflächenbestückten Magneten

Demonstrationsanlage für Rotoren mit vergrabenen Magneten

Die für die Demontage erforderlichen Einzelprozesse können in einer Anlage mit der Grundfläche 1,0 m x 1,2 m integriert werden. Abbildung 36 zeigt das CAD-Modell des Gesamtkonzeptes einer solchen Anlage.

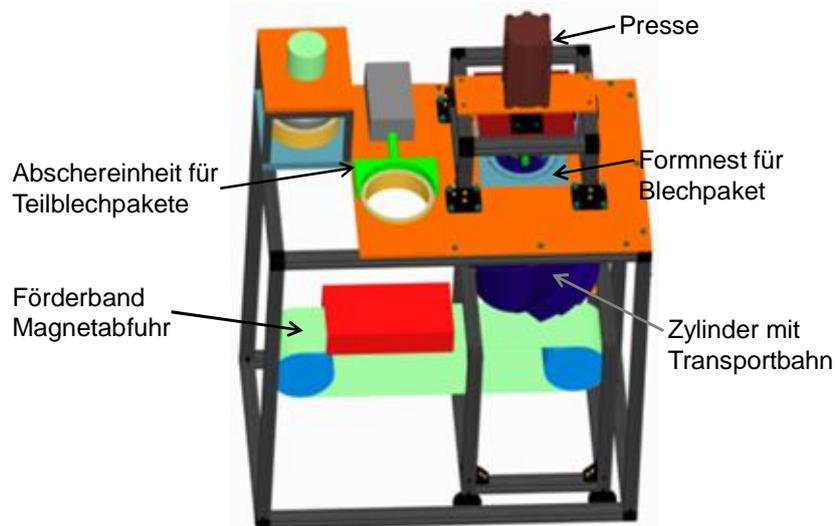


Abbildung 36: CAD-Modell einer Demonstrationsanlage für vergrabene Magnete

In der Demonstrationsanlage wurden die Prozesse Auspressen der Magnete aus den Rotorsegmenten, Zuführen der Magnete zur Entmagnetisierungseinheit und das Entmagnetisieren verkettet aufgebaut. Als Beispiel wurde ein Rotorsegment mit 20 Magneten ausgewählt.

Eine Herausforderung dabei war das Sammeln der ausgepressten Magnete auf einer Linie, um die Magnete nacheinander unter die Infrarotstrahler zu führen. Das Auspressen der Magnete sollte innerhalb eines Hubes erfolgen.

Insgesamt wurden 4 Konzepte zum Sammeln untersucht:

1. *Transportbox (vgl. Abbildung 37)*

Die Magnete fallen in separate Taschen einer Transportbox. Dadurch wird das Aneinanderhaften der Magnete verhindert.

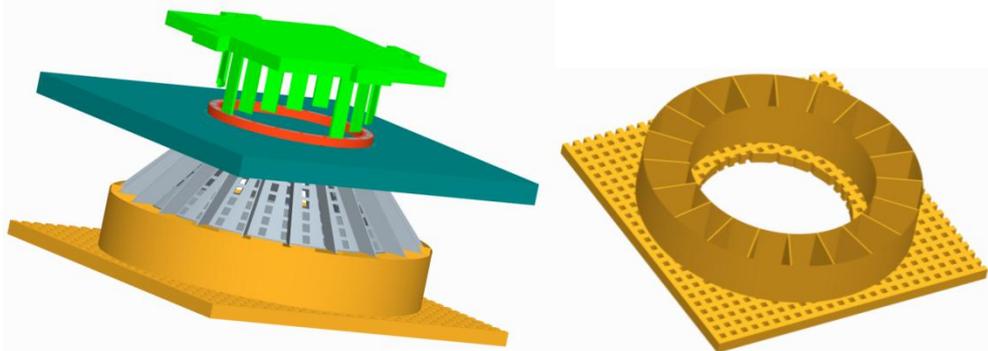


Abbildung 37: Auspressvorrichtung (links) und Sammelbehälter (rechts) für vergrabene Magnete

2. *Rohrsystem (vgl. Abbildung 38)*

Die Magnete werden durch separate Rohre auf ein Transportband geleitet.

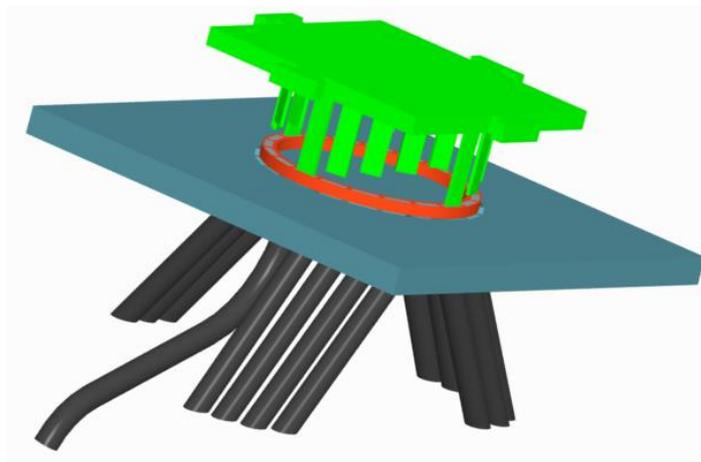


Abbildung 38: Auspressvorrichtung für IPM und Abführung der Magnete mittels Rohrsystem

3. *Magnetabführsystem mit Schrägplatte für zwei Förderbänder (vgl. Abbildung 39)*

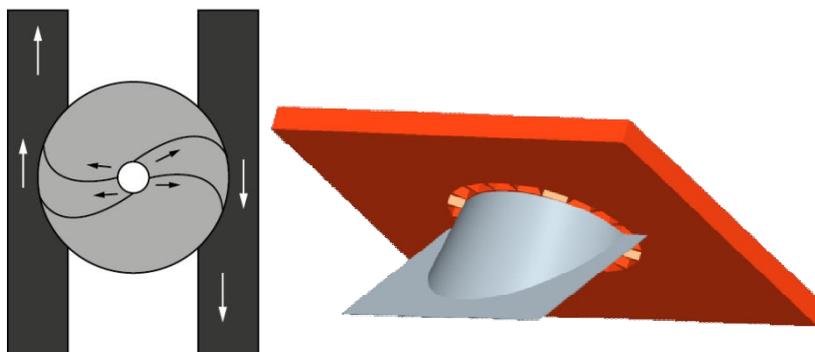


Abbildung 39: Schema für Sammlung auf zwei Bändern (links); Auspressplatte und Magnetabführung mittels Schräge (rechts)

4. Zylinderrutschensystem (vgl. Abbildung 40)

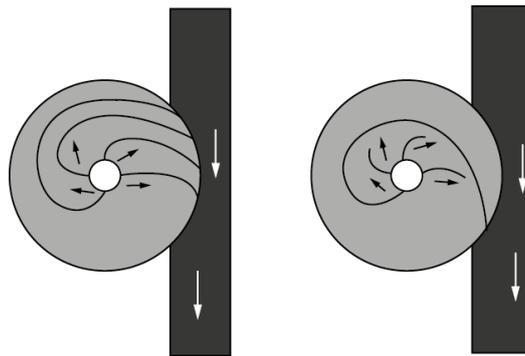


Abbildung 40: Sammelsystem zum Abtransport der Magnete auf einem Band

Für die Demonstrationsanlage wurde das vierte Konzept ausgewählt. Dabei fallen die Segmente auf schiefe Ebenen (Spiralbahnen), die um einen Zylinder angeordnet sind (vgl. Abbildung 41). Die erforderlichen Rutschwinkel wurden berechnet und in Vorversuchen verifiziert. Mit einem Rapid-Prototyp-Verfahren ist die komplexe Struktur dieser Magnetrutsche für den Demonstrator angefertigt worden.

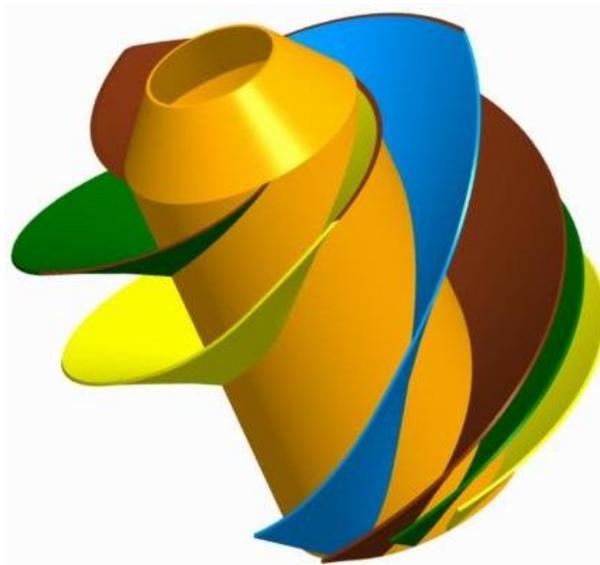


Abbildung 41: Zylinder mit spiralförmigen Transportbahnen

Die Auspresstempel sind als Einzelemente auf einer Platte angeordnet (Abbildung 42) und weisen fünf unterschiedliche Längen auf, so dass vier Magnete gleichzeitig herausfallen und auf den spiralförmigen Bahnen zum Gliederband geführt werden. Das Auspressen aller Magnete eines Segmentes erfolgt mit einem Hub. Die Größe der Aufnahmeplatte wurde so gewählt, dass typische Rotordurchmesser abgedeckt werden. Zur Anpassung an unterschiedliche Rotoren ist in der Anlage nur der Stempel-Matrizen-Satz auszutauschen

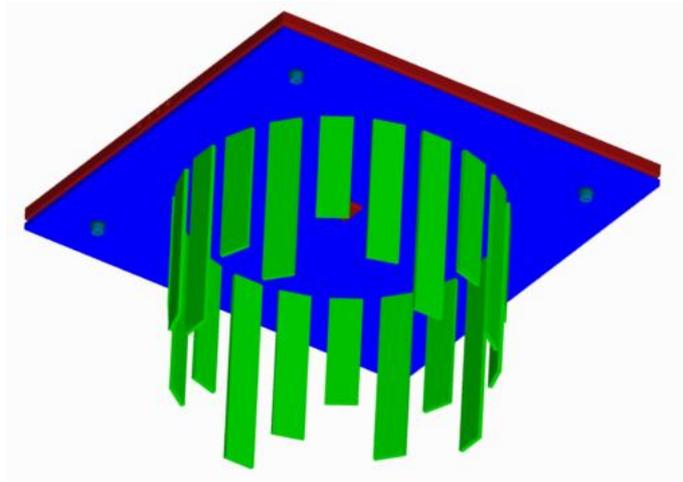


Abbildung 42: Auspressstempel mit Stempelsätzen

Für die Umsetzung der Entmagnetisierungseinheit bzw. des Demonstrators wurde das Konzept mittels Infrarotstrahlung als geeignet ausgewählt. Die Einheit zur thermischen Entmagnetisierung ist hier im Beispiel in die Anlage zum Auspressen von vergrabenen Magneten integriert, kann jedoch nach kurzer Umbauzeit auch an jede andere Magnetzuführung adaptiert werden. Die aufgebaute Anlage und die Entmagnetisierungseinheit sind in Abbildung 43 bzw. Abbildung 44 gezeigt. In Testläufen der Anlage konnte der Demontageablauf erfolgreich dargestellt werden.

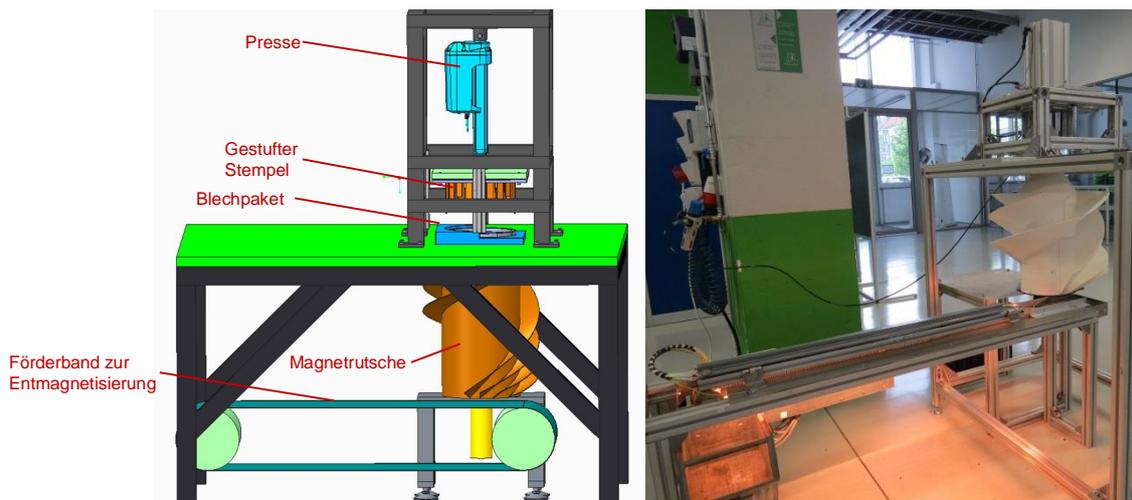


Abbildung 43: CAD-Modell (links) und realer Aufbau (rechts) des Demonstrators für vergrabene Magnete

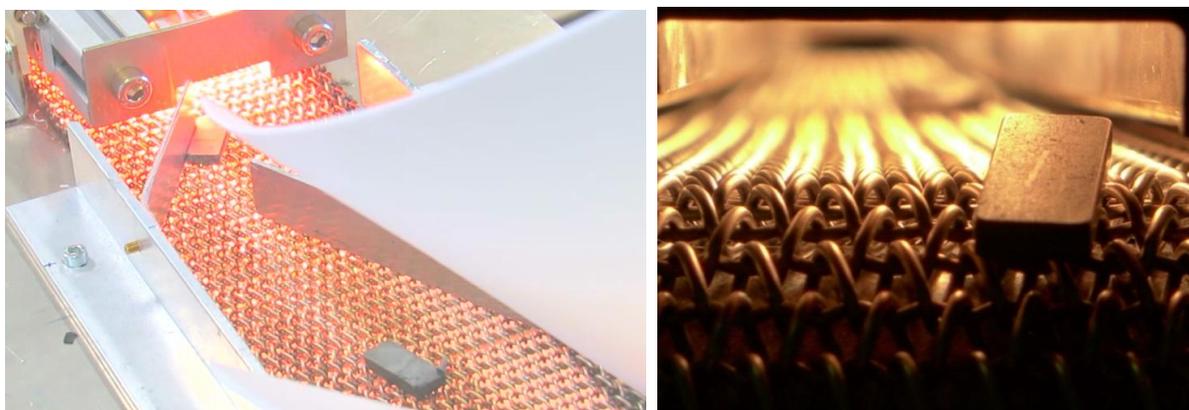


Abbildung 44: Ankunftszone der Magnete auf dem Drahtgurtgliederband (links) und Auswurf der entmagnetisierten Magnete (rechts)

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Demontage der oberflächenbestückten Rotoren

Mit der Demonstrationsanlage zur Demontage von Magneten oberflächenbestückter Rotoren kann gezeigt werden, dass ein einzelner Magnet unbeschädigt im magnetisierten Zustand demontiert werden kann. Dabei wurde angenommen, dass eine Bandagierungsentfernung vor diesem Demontageprozess stattgefunden hat und alle Anbauteile entfernt wurden, um die freie Zugänglichkeit zu den Magnetkörpern zu gewährleisten. Nachdem die einzelnen Magnetkörper demontiert wurden, werden sie für eine Weiterverarbeitung im Magazin gespeichert. Mögliche nachgelagerte Schritte nach dem Speichern können eine Reinigung/Schleifen der Magnete mit direkter Wiederverwendung sein oder auch eine Zuführung der Magnetkörper zur Entmagnetisierung. Um die Demontageleistung der Anlage zu steigern, wird empfohlen einen Greifer zur gleichzeitigen Abnahme von mehreren Magneten, im Idealfall einer ganzen Reihe, einzusetzen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Demontage der Rotoren mit vergrabenen Magneten

Die Demonstrationsanlage für vergrabene Magnete aus Rotoren zeigt die Möglichkeit aus einem vereinzelt Teilblechpaket alle Magnetkörper in einem Hub auszupressen. Dabei ist es unerheblich, ob diese im magnetisierten oder entmagnetisierten Zustand vorliegen. Die Magnete werden in beiden Fällen über den Zylinder mit den Transportbahnen abgeführt und aus der radialen Anordnung im Blechpaket in eine lineare Form auf dem Förderband in der Entmagnetisierungsanlage überführt. Sollten die Rotoren schon vorab entmagnetisiert worden sein, so können die Infrarotstrahler deaktiviert werden und das Förderband der Infrarot-Entmagnetisierung dient nur als Transporteinrichtung für die Magnetkörper zur Sammelbox. Um die Taktzeit des Demonstrators zu erhöhen, ist es möglich zusätzliche Infrarotstrahler anzubringen, woraufhin dann die Geschwindigkeit des Förderbandes erhöht werden kann.

4.3.5 AP 3.6 High-End-Analytik

Verschiedene Analytik-Methoden wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten herangezogen, um u.a. Aussagen über Spuren von Verunreinigungen auf den Magneten sowie Erfolge von Reinigungsschritten zu evaluieren. Auch war es die Aufgabe der Analytik, Messungen zur Sortierung und Validierung von Magnetmaterial durchzuführen. Die Ergebnisse sind in den betreffenden Kapiteln beschrieben. Im Folgenden findet eine Beschreibung der übergeordneten Untersuchungen statt.

Analyse des NdFeB-Werkstoffs:

Da NdFeB eine große Oxidationsneigung besitzt, wurde befürchtet, dass durch die thermische Entmagnetisierung in Luft die Oberfläche der Magnete oxidiert wird und die Magnete somit beeinträchtigt werden. Untersuchungen an Magneten, die in Argon bzw. Luft entmagnetisiert wurden zeigten jedoch, dass sich zwar die Klebstoffrückstände zersetzten, jedoch auf der Metall-Oberfläche keine erkennbare Oxidation stattgefunden hat. Dies wurde auch durch Kontrollanalysen, die bei der Vacuumschmelze durchgeführt wurden, bestätigt.

Von verschiedenen Magneten wurde die Bruchfestigkeit bestimmt. Dabei ergaben sich vergleichbare Messwerte für alle Proben. Die Bruchfestigkeit der NdFeB-Magnete liegt bei $\sigma_c \sim 250$ MPa, dies entspricht sehr genau den Literaturwerten für das Ausgangsmaterial. Auch die Biegefestigkeit des SmCo-Magneten liegt mit $\sigma_c \sim 136$ MPa nur geringfügig unterhalb des Literaturwertes für SmCo von $\sigma_c \sim 150$ MPa, vgl. Abbildung 45. Auch wenn SmCo-Materialien im Rahmen dieses Projektes nicht weiter betrachtet wurden, so zeigen diese Ergebnisse, dass der Betrieb und die Entmagnetisierung nicht zu einer Abnahme der Festigkeit der beiden Werkstoffe führen.

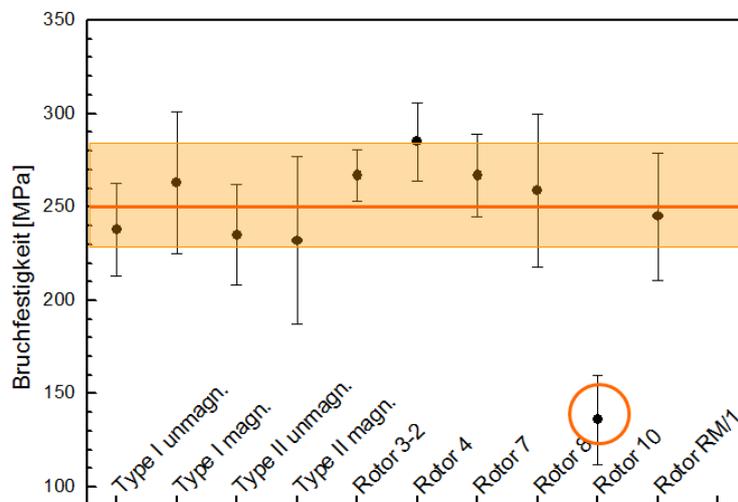


Abbildung 45: Ergebnisse der Festigkeitsmessungen für verschiedene Rotormagnete

Analyse der verwendeten Klebstoffe

Eine thermographische und gaschromatographische Untersuchung der Klebmaterialien zeigte, dass bereits bei Temperaturen weit unterhalb der Curie-Temperatur leicht flüchtige Bestandteile (z.B. Monomer- oder Vernetzerreste) freigesetzt werden. Weitere Komponenten des Klebers zersetzen sich zu polyzyklischen Verbindungen. Im Bereich der Curie-Temperatur zeigen sich in der Analyse Zersetzungsprodukte von Estern und/oder Acrylaten und Produkte der weiteren Zersetzung dieser Bestandteile. Der Hauptmasseverlust tritt bereits unterhalb der Curie-Temperatur auf. Befürchtungen, dass diese Zersetzungsprodukte mit dem Magnetmaterial (speziell mit Nd) reagieren, konnten durch die Analyse des Magnetmaterials entkräftet werden.

Die nach der thermischen Behandlung auf den Magneten verbleibenden Rückstände der Harze sind umgewandelte pyrolysierte Produkte, die ca. 10% der ursprünglichen Masse ausmachen. Da sich diese Rückstände negativ auf die Eigenschaften des rezyklierten Magnetmaterials auswirken, mussten Verfahren gefunden werden, diese Rückstände entweder zu vermeiden oder sie mit nicht-thermischen Verfahren schonend zu entfernen.

Zudem wurde die Eindringtiefe der Klebstoffverunreinigungen ins Material ermittelt. Es zeigte sich, dass aufgrund der rauen Oberfläche der Magnete die organischen Rückstände stellenweise bis zu 5 µm tief in das Material hineinragen können (vgl. Abbildung 46).

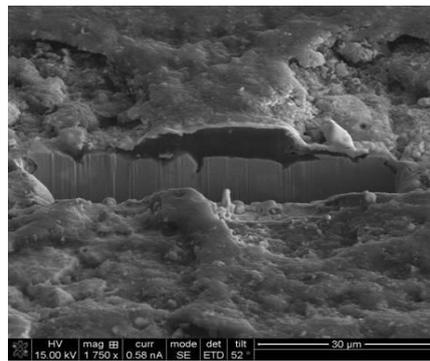


Abbildung 46: FIB¹-Schnitt in Klebstoffrückstände sowie Magnetoerfläche

Dysprosium-Gehalt:

Von verschiedenen Rotormagneten sowie dem Motor-Geber entnommenen Magneten wurde der Dysprosium-Gehalt bestimmt. Dabei zeigte sich, dass neben der Geometrievielfalt auch eine Vielzahl an Metalllegierungen für die Aufbereitung zu erwarten ist. Der ermittelte Dysprosium-Gehalt lag für die Rotormagnete zwischen 8 % und 12 %. Die Gebermagnete müssen offensichtlich nicht so temperaturstabil sein und enthalten daher mit nur 4 % bis 5,5 % deutlich weniger Dysprosium. Eine Vortrennung des Materials für eine werkstoffliche Aufbereitung ist zwar durchaus erwünscht, jedoch nicht zwingend notwendig.

Zusammenfassung

Die oben beschriebenen Untersuchungen des Magnetmaterials zeigen, dass bei beschädigungsfreier Demontage und Reinigung eine direkte Wiederverwendung der Magnete möglich erscheint.

1 FIB: Focused Ion Beam

4.4 AP 4 Stoffliche Verwertung

4.4.1 AP 4.1 Werkstoffliche Verwertung

Für das werkstoffliche Recycling müssen die Magnete aus den Motoren ausgebaut werden und von sämtlichen Verunreinigungen wie Kleber, Beschichtungen und sonstigen Fremdmaterialien befreit werden. Das Magnetmaterial muss sortenrein vorliegen. Sämtliche Fremdlegierungen (Ferrite, SmCo) und andere metallische Bestandteile (Beschichtungen) sind unbedingt abzutrennen. Außerdem müssen sie entmagnetisiert werden, d.h. auf eine Temperatur $> 350\text{ °C}$ erhitzt werden.

Es wurde definiert, dass der Grad an Verunreinigungen nicht bestimmte Grenzen überschreiten darf. Der Gehalt an zusätzlich eingebrachtem Sauerstoff (O) darf nicht höher als 0,03 Gew.-% und der an Kohlenstoff (C) nicht höher als 0,01 Gew.-% gegenüber dem eigentlichen Grundmaterial betragen.

Magnetreinigung

Um diese Vorgaben einzuhalten, wurde ein Verfahren für die Reinigung der demontierten Magnete zur Vorbereitung für ein werkstoffliches Recycling erarbeitet: Die demontierten Magnete werden zunächst im Ofen in Luft bei 350 °C thermisch entmagnetisiert. Sollte es sich um SmCo-Magnete handeln, so kann dies u.a. bei diesem Schritt erkannt werden, da die Curie-Temperatur von SmCo deutlich über dieser Temperatur liegt.

Während der Entmagnetisierung werden die Klebstoffreste auf dem Magnet teilweise zersetzt. Wird eine Temperatur von 350 °C deutlich überschritten, wird das Magnetmaterial geschädigt. Jedoch lassen sich die Magnete anschließend besser reinigen, da mehr Klebstoff zersetzt wird und weniger Rückstände entfernt werden müssen. Auch ist die Entmagnetisierung in Luft gegenüber der Entmagnetisierung in Argon hinsichtlich der Reinigung zu bevorzugen.

Um die verbleibenden Klebstoffrückstände zu entfernen, ohne gleichzeitig das Magnetmaterial abzutragen, wurde eine schonende Reinigungsmethode entwickelt, mit welcher sich die Klebstoffreste beinahe vollständig entfernen lassen. Diese Methode basiert auf einem Gleitschliffprozess mit Siliziumcarbid (SiC) als Schleifmittel. Es verbleiben minimale Rückstände des Klebstoffes und des SiC an den Korngrenzen der Magnetlegierung. Die Analysen der gereinigten Magnete bescheinigen der Reinigungsmethode jedoch eine ausreichende Effizienz, so dass die gereinigten Magnete dem werkstofflichen Recycling zugeführt werden können.

Voraussetzung für den Erfolg der Reinigung ist jedoch, dass die Magnet-Geometrie keine schmalen Nuten oder Kerben aufweist, in welchen sich Klebstoffrückstände sammeln können (vgl. Abbildung 47). Die Rückstände können dort nicht entfernt werden, ohne zusätzlich Magnetmaterial abzutragen, da das verwendete Schleifmittel in den schmalen Kerben nicht angreifen kann. Diese Art von Nuten und Kerben sollte daher bei der Magnet-Herstellung möglichst vermieden werden. Diese wichtige Erkenntnis wurde auch in die Design-Empfehlungen (vgl. Anhang) mit aufgenommen.

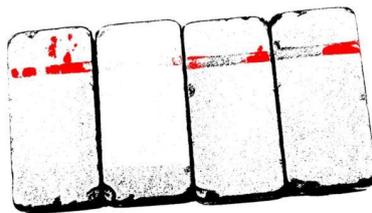


Abbildung 47: Gereinigte Magnete mit Rückständen in den Kerben (Bild verfremdet, Rückstände sind rot eingefärbt)

Durch die Untersuchung wurde zudem gezeigt, dass bei der Entmagnetisierung im Ofen kein erhöhter Wasserstoffeintrag durch die Zersetzung des Klebstoffs bei der Entmagnetisierung stattfindet. Die Reinigung ist im Labormaßstab realisiert mit einem Durchsatz von bis zu 500 Magneten pro Durchlauf.

Ein großes Problem im Projekt war es, ausreichende Mengen an Recycling-Magneten zu bekommen. Der Projektpartner Daimler konnte zum Zeitpunkt der Versuche noch keine Motoren beistellen, so dass auf diesem Wege keine Magnete bereitgestellt werden konnten. Der Projektpartner Siemens hat teilweise Abhilfe geschaffen, indem er Rückläufer von Servomotoren zur Verfügung stellte. Die Mengen dieser Magnete waren allerdings viel zu gering, um eine Test-Charge für kommerziell hergestellte Magnete zu erstellen. Es konnte aber an diesen von Siemens ausgebauten Magneten untersucht werden, ob die Ausbau- und Reinigungsmethoden ausreichend für ein werkstoffliches Recycling sind.

Es blieb aber das Problem der Verfügbarkeit von Recycling-Material. Da beide Partner Daimler und Siemens nicht genug Magnetmaterial beistellen konnten, hat Vacuumschmelze eigenes Produktionsausschussmaterial zur Verfügung gestellt. Die Reinheit dieses Materials ist vergleichbar mit der von recycelten Magneten. All die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden mit dem Produktionsausschussmaterial der Vacuumschmelze durchgeführt.

Im ersten Teil des Projektes sollte untersucht werden, was die beste Methode der Vorzerkleinerung zu einem Grobpulver ist:

- Mechanische Zerkleinerung mittels Brechern und Walzenmühlen
- Einschmelzen der Magnete mittels Vakuuminduktionsöfen
- Zerkleinerung mittels Wasserstoffversprödung

Im zweiten Teil des Projektes sollten dann Demonstrator-Magnete aus dem besten der drei untersuchten Vorzerkleinerungsverfahren hergestellt werden. Die Magnete sollten dann von VAC und Daimler untersucht werden, ob sie geeignet sind, wieder für die Elektromobilität eingesetzt zu werden.

Mechanische Zerkleinerung und Wiedereinsatz in der Pulverfertigung

300 kg Ausfall-Magnete (vgl. Abbildung 48) wurden gereinigt und mit den üblichen Fertigungseinrichtungen (Brecher und Walzenmühlen) zu einem Grobpulver zerkleinert. Das Pulver wurde analysiert und wies erwartungsgemäß gegenüber Pulvern aus frischen Rohstoffen erhöhte Verunreinigungen auf (O = 0,31 % und C = 0,03 %). Diese Verunreinigungen liegen im erwarteten Rahmen, da im Laufe der Magnetherstellung gezielt Zusätze eingesetzt werden und das Pressen der Magnete nicht vollständig unter Luftabschluss stattfinden kann. Die Verunreinigungen erzeugen in erster Linie unmagnetische Oxide und Karbide, die die Remanenz reduzieren und die Koerzitivfeldstärke im Wesentlichen nicht beeinflussen. Das Grobpulver aus den recycelten Magneten wurde als 30 %-iger Zusatz einem Produktionspulver zugesetzt und auf der Jetmühle zu einem Feinpulver vermahlen. Aus diesem Feinpulver wurden Magnete gepresst und gesintert und mit Magneten ohne Zusatz von Recyclingmaterial verglichen. Durch den Zusatz des Recyclingmaterials wurde erwartet, dass sich die Remanenz um ca. 3 % reduziert und die Koerzitivfeldstärke erhalten bleibt.



Abbildung 48: Sammlung von Ausfall-Magneten vor und nach der Reinigung

Einschmelzen von Schrottmagneten

Auch in diesem Fall wurden Recyclingmagnete der VAC eingesetzt. Vor dem Einschmelzen wurden die Magnete gereinigt und der Feinanteil wurde abgesiebt. Sie wurden als letzte Charge einer Schmelzkampagne umgeschmolzen (Abbildung 49). Das Umschmelzen ist notwendig, um die Oxide aus dem Schrott zu entfernen, indem sie Schlacke bilden. Die Schlacke war sehr porös und enthielt noch viel metallische Anteile, so dass die Ausbringung mit 70 % – 80 % sehr niedrig war. Außerdem konnte der Kohlenstoff beim Umschmelzen nicht entfernt werden, so dass diese Verunreinigung im Material verblieb. Außerdem reagiert die Schmelze mit dem Tiegelmateriale, so dass einerseits der Aluminium-Gehalt ansteigt und nicht mehr innerhalb der Spezifikation liegt und andererseits der Tiegel stärker altert und seine Lebensdauer verkürzt wird. Zusätzlich muss diese umgeschmolzene Legierung noch einmal aufgeschmolzen werden, um die korrekte Stöchiometrie einzustellen.



Abbildung 49: Einschmelzen von Ausfall-Magneten im Vakuuminduktionsofen

Durch den erhöhten Kohlenstoff- und Aluminium-Anteil wird erwartet, dass sich die Remanenz von Magneten aus solchem Recyclingmaterial um ca. 1 % verringert. Aber entscheidender ist die schlechte Ausbringung, so dass dieser Weg aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiter verfolgt wird.

Wasserstoffversprödung (HD) zur Herstellung von Grobpulver

Bei der Wasserstoffversprödung nimmt das Magnetmaterial Wasserstoff (H_2) auf, die Kristallstruktur erweitert sich und das Material wird rissig und zerfällt zu grobem Pulver. Es ist damit im folgenden Schritt deutlich besser mahlbar. Für hochwertige Magnete wird dieser Prozess deshalb zur Vorzerkleinerung von Schmelzbrocken bzw. strip cast Legierungen eingesetzt. Für das Projekt sollte untersucht werden, ob der HD-Prozess auch zum Vorzerkleinern von Schrottmagneten einsetzbar ist.

Ein erster Versuch, die Schrottmagnete in H₂ auszulagern, blieb allerdings erfolglos. Die Magnete nahmen keinen Wasserstoff auf und konnten somit nicht versprödet werden. Es wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm aufgestellt, um die entscheidenden Parameter zur HD-Zerkleinerung zu finden:

- mechanische Vorzerkleinerung vor der Behandlung
- Erhöhung des H₂-Druckes während der Behandlung
- Erhöhung der Temperatur während des HD-Prozesses
- Verlängerung der Dauer der HD-Behandlung
- Einleiten von Inertgasen zu Beginn der Behandlung

Schließlich konnte ein Parametersatz gefunden werden, bei dem die Schrottmagnete den Wasserstoff aufnahmen und zu einem groben Pulver zerfielen. Die Menge an Verunreinigungen entspricht der von den mechanisch zerkleinerten Magneten, da der HD-Prozess unter Inertgasatmosphäre stattfindet. Die Mahlbarkeit in der Jet-Mühle ist aber wegen der deutlich erhöhten Sprödigkeit des Pulvers etwa doppelt so hoch wie bei mechanisch zerkleinertem Pulver. Deshalb ist der HD-Prozess der optimale Prozess zum werkstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten.

Demonstratormagnete

Aus den 300 kg HD-Grobpulver aus den Schrottmagneten wurde zusammen mit 700 kg frischem Grobpulver eine 1000 kg-Jet-Mahlung durchgeführt und anschließend wurden aus diesem Pulver 3000 Magnete für Daimler mit dem AP-Verfahren verpresst. Die Grünlinge wurden gesintert und wärmebehandelt, um die optimalen magnetischen Eigenschaften zu erreichen. Anschließend wurden die Magnete auf Endmaß 26 x 11,6 x 4,3 mm³ geschliffen. 300 dieser Magnete wurden zu Daimler zur dortigen Untersuchung geschickt.

Die Untersuchungen bei VAC ergaben folgende Ergebnisse: Durch den Einsatz von 30 % Recyclingmaterial verringert sich die Remanenz um 3 %, die Koerzitivfeldstärke bleibt allerdings nahezu unverändert, vgl. Abbildung 50. Dies entspricht auch den Erwartungen. Die Spezifikation liegt bei B_r(20 °C) > 1,07 T und H_{cJ}(150 °C) > 1060 kA/m. D.h. der Magnet aus dem Recyclingmaterial erfüllt die Spezifikation.

Weiterhin wurde auch die Korrosionsstabilität im HAST-Test (130 °C; 95 % rel. Feuchte; 10 Tage) untersucht. Dazu wurde die spezifische Gewichtsabnahme bestimmt. Der Magnet aus dem Recyclingmaterial wies einen Gewichtsverlust von 0,8 mg/cm² auf, wohingegen der Magnet aus frischen Rohstoffen einen Gewichtsverlust von < 0,1 mg/cm² aufwies. Die Spezifikation liegt bei < 1 mg/cm². Das bedeutet, dass der Magnet aus dem Recyclingmaterial zwar etwas schlechter abschneidet, aber immer noch innerhalb der Spezifikation liegt.

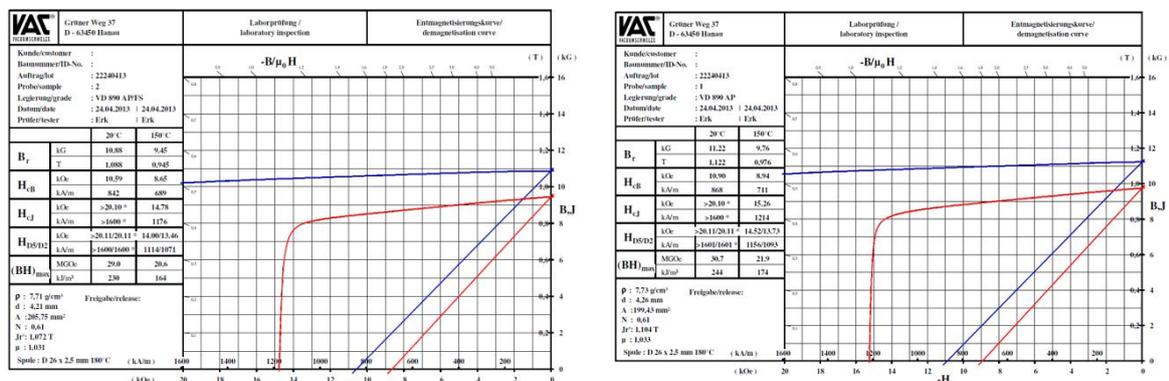


Abbildung 50: Entmagnetisierungskurven bei 20 °C und 150 °C von Magneten mit 30 % Recyclingmaterial (B_r(20 °C) = 1,09 T, H_{cJ}(150 °C) = 1180 kA/m) und Magneten aus Rohstoffen (B_r(20 °C) = 1,12 T, H_{cJ}(150 °C) = 1220 kA/m)

Beim Aufmagnetisierungsverhalten ist kein Unterschied zwischen den beiden Magneten festzustellen. Bei einer Aufmagnetisierungsfeldstärke von 1800 kA/m werden beide Magnete zu > 99 % aufmagnetisiert und entsprechen der Spezifikation (vgl. Abbildung 51).

Beim Projektpartner Daimler wurden ebenfalls die magnetischen Eigenschaften bestimmt und es ergaben sich sehr ähnliche Eigenschaften (vgl. Tabelle 8). Bei den durchgeführten Korrosionsuntersuchungen wurden keine Unterschiede zwischen den Magneten mit und ohne Zusatz von Recyclingmaterial gefunden.

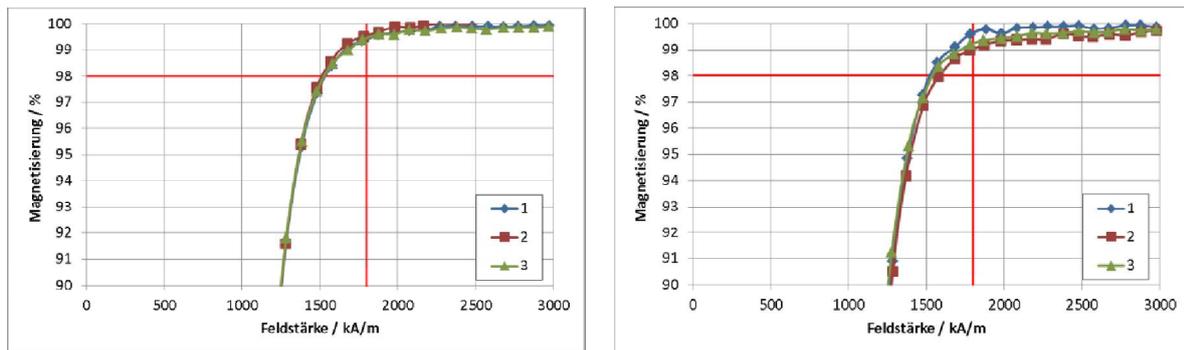


Abbildung 51: Aufmagnetisierungsverhalten von Magneten mit 30 % Recyclingmaterial (links) sowie von Magneten aus Rohstoffen (rechts) (Ziel: > 98 % der Sättigungsmagnetisierung bei einem Feld von 1800 kA/m)

Fazit

Das Projekt konnte zeigen, dass Magnete aus Recyclingmaterial, z.B. aus Motoren ausgebaute und gereinigte Magnete, hergestellt werden können. Die Eigenschaften dieser Magnete entsprechen den Spezifikationen von Motormagneten. Allerdings ergeben sich nicht mehr die Eigenschaften von Magneten, die aus frischen Rohstoffen hergestellt wurden. Der wesentliche Unterschied ist die um 3 % reduzierte Remanenz. Zudem wurde der Herstellungsprozess im Projekt nur mit Schrotten der Vacuumschmelze, deren genaue Zusammensetzung bekannt war, durchgeführt. Ob mit Magnetschrotten anderer Hersteller, deren Zusammensetzung nicht bekannt ist, Recyclingmagnete gleicher Eigenschaften hergestellt werden können, konnte im Rahmen von MORE nicht geprüft werden, da die erforderlichen Schrottmengen nicht zur Verfügung standen.

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

Tabelle 8: Vergleichsmessungen von Daimler an Magneten mit 30% Recyclingmaterial

VAC RE 890 AP	Messung VAC		Messung Daimler	
	RT	160°C	RT	160°C
B_r [T]	1,09	0,91	1,09	0,91
H_{cj} [kA/m]	/	1091	2722	1094

4.4.2 AP 4.2 Rohstoffliche Verwertung

Zerstörende Demontage

Für ein effizientes Recycling muss immer nach großtechnischen Lösungen gesucht werden, die letztlich helfen, die Behandlungskosten zu senken und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Daher hat sich das Konsortium insbesondere im Rahmen des Arbeitspakets 4.2 genau mit der Frage beschäftigt: Wie können Motorenkomponenten oder auch komplette Motoren im industriellen Maßstab kostengünstig, aber zuverlässig, im Sinne einer sicheren Separation der Magnete bzw. der Magnetfraktion, maschinell und nicht zerstörungsfrei zerlegt werden?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde zunächst von den Partnern Umicore, Siemens und Daimler eine Materialbestandsaufnahme durchgeführt. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Beschaffenheit der Komponenten und deren Materialzusammensetzung, die je nach Aufschlussverfahren einen direkten Einfluss auf das Behandlungsergebnis haben. Siemens und Daimler stellten für die Versuche insgesamt ca. 950 kg Material zur Verfügung. Dabei handelte es sich sowohl um thermisch entmagnetisierte sowie noch magnetisierte Rotoren bzw. Motoren unterschiedlicher Baugröße

Tabelle 9: Materialübersicht

	Komponenten	Materialien	Gesamtmasse
Batch 1a	Daimler Magnetringe, entmagnetisiert	Elektroblech, Magnete	66 kg
Batch 1b	Siemens & Daimler Rotoren, entmagnetisiert	Elektroblech, Stahlwellen, Magnete	100 kg
Batch 1c	Rotoren & Steuergeräte, entmagnetisiert	Elektroblech, Stahlwellen, Magnete, Elektronikbauteile	70 kg
Batch 1d	Statoren ohne Magnete (2 Durchläufe)	Elektroblech, Kupferdraht	81 kg
Batch 1e	Komplette Motoren in 2 Durchläufen zerlegt, magnetisiert	Aluminiumgehäuse, Elektroblech, Lager, Stahlwellen, Magnete, Elektronikbauteile	60 kg bzw. 30 kg
Batch 1f	Siemens & Daimler Rotoren, magnetisiert	Elektroblech, Lager, Stahlwellen, Magnete	95 kg
Batch 2a	Daimler Rotoren, entmagnetisiert	Elektroblech, Stahlwellen, Magnete	93 kg
Batch 2b	Siemens Rotoren, entmagnetisiert	Elektroblech, Stahlwellen, Magnete	122 kg
Batch 2c	Daimler Rotoren, magnetisiert	Elektroblech, Stahlwellen, Magnete	112 kg
Batch 2d	Siemens Rotoren, magnetisiert	Elektroblech, Lager, Stahlwellen, Magnete	115 kg

Die Materialidentifikation bestätigte, dass bei der Aufbereitung von verschiedensten Komponenten ausgegangen werden muss - von einzelnen magnetbestückten Segmenten bis hin zu kompakten, schweren Motorenkomponenten. Somit wurde ein Verfahren benötigt, welches in der Lage ist, ein breites Spektrum an Eingangsmaterialien mit unterschiedlichsten Materialeigenschaften zu zerlegen. Darüber hinaus müssen zuverlässig hohe kinetische Energien aufgebracht werden können, um auch robuste Komponenten bei entsprechend hohen Durchsatzleistungen aufzubrechen. Dabei ist der Verschleiß am Aggregat selbst so gering wie möglich zu halten. entsprechende Bewertung. Als Bewertungsgrundlage dienten eigene Erfahrungswerte, die mit Angaben aus verfügbaren Datenblättern vervollständigt wurden.

Tabelle 10 vergleicht die zur Verfügung stehenden Verfahren mit den jeweiligen Anforderungen sowie die entsprechende Bewertung. Als Bewertungsgrundlage dienten eigene Erfahrungswerte, die mit Angaben aus verfügbaren Datenblättern vervollständigt wurden.

Tabelle 10: Qualitative Bewertung von verschiedenen Technologien zum Aufschließen von Motorkomponenten; Bewertung: 10 = maximal erreichbare Punktzahl pro Kriterium

Bewertungskriterien	Verfahren		
	Shredder	Hammermühle	Querstromzerspaner
Standzeiten des Werkzeuges	2	6	10
Materialdurchsatz	10	4	8
Kontrolle des Prozesses bzw. der Anlagenparameter	8	8	8
Eingangsmaterial-Unabhängigkeit (Größe, Gewicht, Beschaffenheit...)	4	6	8
Energieeintrag	4 (schneidend)	6 (brechend)	10 (brechend)
Variantenvielfalt der marktgängigen & verfügbaren Aggregate (Dimensionierung, Leistung...)	10	6	8
Form und Handhabung des Ausgangsmaterials	8	8	6
Betriebskosten (niedrig → hohe Quote)	2	6	8
Anschaffungskosten (niedrig → hohe Quote)	4	6	4
Summe	52	56	70

Die qualitative Bewertung ergab klare Vorteile für den so genannten Querstromzerspaner (QZ). Zur Absicherung der Machbarkeitsstudie wurde entschieden, ein erstes Versuchsprogramm gemeinsam mit einem namenhaften Hersteller durchzuführen. Die Kriterien für diese Auswahl waren:

- Erfahrungen bei der Durchführung von Zerkleinerungsversuchen im Industriemaßstab
- Verfügbare und zugelassene Zerkleinerungsanlage mit ausreichender Dimensionierung
- Zusätzliche Weiterbehandlungsverfahren (verfügbar)
- Technische Vorortunterstützung und -betreuung

Die Entscheidung fiel für die Andritz MeWa GmbH, da schon im Vorfeld der Machbarkeitsstudie eine gute Zusammenarbeit erfolgte und Unterstützung von kompetenten Fachleuten vorhanden war.

Der Querstromzerspaner (QZ) wurde insbesondere für die Zerkleinerung der sogenannten „Weißen Ware“, also Haushaltsgeräte, wie Kühl- und Gefrierschränke, Waschmaschinen, aber auch für die Behandlung von Elektro-Schrott entwickelt. Mittlerweile hat sich das Einsatzgebiet des QZ, aufgrund der universellen Anwendungsmöglichkeiten auch auf den Automobilbereich (Armaturen, Motorenblöcke, Katalysatoren), Verpackungsindustrie (Spraydosen, verunreinigte Metallfraktionen), Bioabfälle und auf viele andere Industriezweige erweitert.

Der Querstromzerspaner verzichtet auf den Einsatz von Messern und arbeitet im Prinzip mit der Beschleunigung des zu behandelnden Materials und den dabei entstehenden physikalischen Kräften. Für den eigentlichen Materialaufschluss ist letztlich die Aufprallenergie verantwortlich, somit spielt die Beschaffenheit des zugeführten Materials eine wichtige Rolle. Für den Energieeintrag sorgt eine massive Stahlkette, die von einem Elektromotor in Rotation versetzt wird. Dieses so genannte Beschleunigungswerkzeug kann jederzeit mit Hilfe eines zusätzlich angehängten Gewichtes in seiner Wirkung verstärkt werden. Mit diesem Verfahren wird innerhalb der Anlage eine Art Wirbelsturm erzeugt, wodurch die Materialverbunde durch gegenseitiges Aufprallen in sehr kurzer Zeit zerlegt werden.

Die Vorteile des Verfahrens liegen vor allem in den kurzen Prozesszeiten, den sehr geringen Verschleißwerten und des hohen Mengendurchsatzes pro Zeiteinheit. Des Weiteren behauptet sich das Prinzip durch:

- Verfügbarkeit von unterschiedlichen Anlagengrößen (von 900 – 3000 mm Durchmesser)
- Zuverlässigkeit und Konstanz des Aufschlussergebnisses
- Robuste und einfache Anlagenführung (geringe Anzahl der relevanten Parameter)
- Schnelle Änderung der Anlagenparameter
- Schnelle Werkzeugwechsel
- Unterschiedliche Betriebsmodi möglich (Batch- oder Durchsatzbetrieb)
- Geschlossenes System

Ausgehend von den positiven Ergebnissen der Machbarkeitsstudie wurde im Konsortium entschieden, eine zweite Versuchsreihe durchzuführen. Zum einen konnten bei der Nachbehandlung des zerkleinerten Materials aus der ersten Versuchsreihe nicht alle relevanten Fragen geklärt werden, da vor allem entmagnetisiertes Material zerkleinert wurde, die Methode aber möglichst für noch magnetisiertes Material angewendet werden soll. Zum anderen sollte bei dem Versuch eine Massenbilanzierung erstellt werden, um die Effizienz der Zerkleinerung von Motorenkomponenten mittels Querstromzerspaner zu bewerten. Abbildung 52 zeigt den Versuchsplan für den zweiten Versuchstag, der bis auf den Entmagnetisierungs- und den Siebschritt vollständig durchgeführt werden konnte. Im folgenden Abschnitt werden die Versuchsvorbereitungen, -durchführung sowie Auswertung für die beiden Versuchsreihen erläutert.

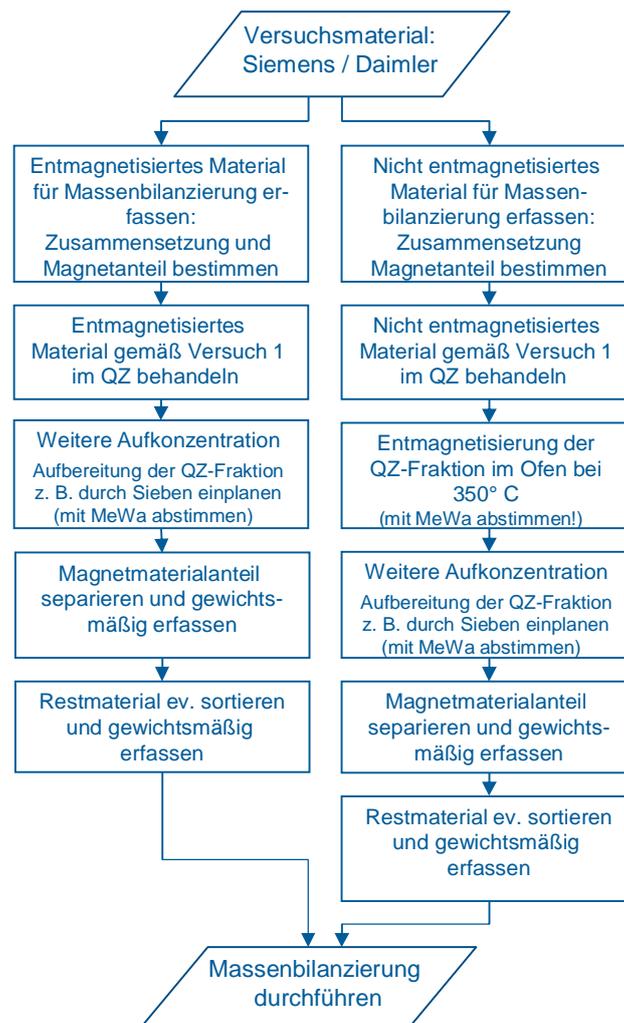


Abbildung 52: Versuchsplan des zweiten Versuchsprogramms bei Andritz MeWa

Versuchsvorbereitung

Zur Vorbereitung der Versuche wurde eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt. Dies zeigte sich als dringend erforderlich, da neben dem Aufbrechen von robusten Komponenten auch Rotoren mit leicht zugänglichen Magneten behandelt wurden. Es musste angenommen werden, dass zumindest einzelne Magnete während des Zerkleinerungsprozesses pulverisiert werden würden. Dieses Magnetpulver besitzt insbesondere aufgrund der darin enthaltenen Selten-Erd-Elemente pyrophore Eigenschaften. Um die Risiken während des Versuches zu minimieren und eine gefahrlose Durchführung zu gewährleisten, wurden die entsprechenden Maßnahmen getroffen.

Zusammenfassung des ersten Versuchsprogrammes

Die Versuche zur Machbarkeit der Grobaufbereitung von Motoren und Motorenkomponenten bei Andritz MeWa haben am 18.07.2013 stattgefunden. Für die Versuche wurde auf der in Abbildung 53 dargestellten Anlage **Querstromzerspamer Serie UNI-Cut® QZ, QZ 1600 HD** mit einer Antriebsleistung von 160 kW und einem Kessel der Größe 1580 / 1580 mm durchgeführt. Das Material (verschiedene Lose an Motoren, Rotoren, Magnetringen und Steuergeräten in unterschiedlichen Verhältnissen, Batches 1a bis 1f, vgl. Tabelle 9, Abbildung 54) wurde in aufeinanderfolgenden Versuchen zerkleinert, die entsprechenden Maschinenparameter wurden anhand der Erfahrung der MeWa-Experten ausgewählt. Vom Output-Material wurden (nicht repräsentative) Proben entnommen und im Nachgang auf den Versuch im Labor aufgetrennt und weiter untersucht.



Abbildung 53: Querstromzerspamer QZ 1600 der Firma ANDRITZ MeWa GmbH



Abbildung 54: links: Beispiel für Shredder-Input-Zusammensetzung; rechts: Zerkleinertes Material

Die Ergebnisse der Versuchsläufe wurden im Vergleich zu den Erwartungen durchgängig mit sehr gut bewertet:

- Selbst große und schwere (bis ca. 60 kg) Komponenten konnten aufgeschlossen werden; bei schwereren (ab ca. 60 kg) Komponenten ist die nächsthöhere QZ-Anlage zu empfehlen.

- Anlagenparameter, wie Verweilzeit, oder Schieberstellung beeinflussen das Ergebnis wie erwartet stark – hierbei lassen sich aber optimale Einstellungen finden, die zu größeren Magnetbruchstücken führen.
- Das Magnetmaterial fällt bei entmagnetisiertem Ausgangsmaterial insgesamt als Pulver bis feines Korn an. Verluste durch Feinanteil liegen vor und könnten durch ein Absaugsystem bzw. Abluftfilter etc. reduziert werden.
 - Eine weitere Aufkonzentration der Magnetfraktion über Nachbehandlungsschritte, z.B. Sieben, ist möglich.
 - Große Magnetbruchstücke können durch geeignete Nachbehandlungsschritte (Reinigung) für das werkstoffliche Recycling vorbereitet werden.
 - Das Pulvermaterial eignet sich v.a. für die hydrometallurgische Recyclingroute, da dort z.B. organische Rückstände akzeptabel sind.
 - Es ist Potential zur Optimierung der Anlagenparameter vorhanden. Hierfür wurden weiterführende Versuche als notwendig identifiziert.
- Das restliche Material der Motoren und -Komponenten (Kupfer, Aluminium, Eisenstahl, Edelstahl, etc.) lässt sich gut bis sehr gut separieren (Nachbehandlungsschritte erforderlich, z. B. Granulierung)
- Eine große vorausgehende Demontagetiefe erleichtert die Abtrennung der Magnetfraktion.
- Dort, wo die Magnete „leicht zugänglich“ waren, siehe z. B. Segmentringe, in Kombination mit einer höheren Konzentration an Magnetmaterial, erfolgten kleinere lokale Oxidations-Reaktionen, die aber gut zu kontrollieren waren (und von selbst abreagierten)
- Durch Laboruntersuchungen wurde gezeigt, dass der Sauerstoffeintrag bei der Zerkleinerung ähnlich ist zu dem bei nichtzerstörender Demontage, vorausgesetzt, die Magnete werden nicht zu stark zerkleinert.
- Auch vollständig magnetisierte Komponenten konnten verarbeitet werden, wobei wie erwartet das Magnetmaterial an der Innenwand der Anlage und an dem eisenhaltigen Schrott haften blieb. Die Größenbestimmung der Magnetbruchstücke zeigte, dass die Magnete nicht stärker zerkleinert werden. Zum Herausführen des Materials aus der Maschine wurden weitere Untersuchungen als notwendig erachtet.

Zusammenfassung des zweiten Versuchsprogrammes

Das zweite Versuchsprogramm wurde am 03.07.2014 mit der gleichen, oben dargestellten Anlage, durchgeführt. Das Material der Batches 2a bis 2d (vgl. Tabelle 9) wurde in aufeinanderfolgenden Versuchen zerkleinert, die entsprechenden Maschinenparameter wurden wiederum anhand der Erfahrung der Andritz MeWa-Experten ausgewählt.

Massenbilanz

Ein Ziel des zweiten Versuchsprogrammes war es, eine detaillierte Massenbilanz aufzustellen. Dies wurde sowohl für entmagnetisierte als auch magnetisierte Rotoren wie folgt durchgeführt:

- Vor dem Versuch: Bestimmen der Gesamtmasse der eingebrachten Rotoren sowie des enthaltenen Magnetmaterials
- Nach dem Versuch:
 - Aussortieren großer Teile (Rotorwellen) aus dem Output-Material
 - Abtrennen der Elektrobleche von den pulverartigen Rückständen, die die Magnete enthalten
 - Entfernen der in der Maschine haftenden Rückstände von Hand
 - Bestimmen der Gesamtmasse der verschiedenen Fraktionen
 - Untersuchung einzelner ausgewählter Fraktionen im Labor zur Vervollständigung der Massenbilanz

Die Differenz zwischen Input- und Output-Masse entspricht Verlusten in Form von Staub und Teilen, die bei der anschließenden nicht-optimierten Sortierung für die Massenbilanzierung nicht mehr zur Verfügung standen. Hierzu gehörte auch der Feinanteil des aufgeschlossenen Materials. Nicht zuletzt bestanden auch Einflüsse durch Wägebereichsschwankungen der benutzten Waage. Die Ergebnisse der Bilanzierung sind in sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Wie beim ersten Versuchsprogramm ergaben sich für die entmagnetisierten und die magnetisierten Rotoren unterschiedliche Ergebnisse:

- Die eigentlich entmagnetisierten Rotoren enthielten immer noch magnetisiertes Material. Vermutlich wurden die Rotoren nicht vollständig auf $T_{\text{Curie}} = 350 \text{ °C}$ erwärmt. Folgen:
 - Rückstände von magnetischem Material in der Maschine
 - Keine Anreicherung von magnetisiertem Material in der pulverartigen Fraktion, Material bleibt an Elektroblechen haften und geht somit verloren.
 - Entmagnetisierte Magnete sammeln sich in der pulverartigen Fraktion, wie bei erstem Versuchsprogramm beobachtet.
- Aufbereitung der Fraktion Siemens, entmagnetisiert, Magnet und Bleche: Die Fraktion enthält 13,6 kg Magnetmaterial, dies entspricht 83 % der eingebrachten Magnetmaterialmenge. D.h. ca. 17 % des eingebrachten Materials gehen über die Abtrennung der anderen Fraktionen verloren.
- Bei den magnetisierten Rotoren wurde verhältnismäßig wenig Magnetmaterial aus der Maschine ausgetragen.
- In allen Fällen bestehen die Rückstände in der Maschine aus Magnetmaterial und Blechen.
- In allen Fällen lassen sich große Teile, wie Rotortöpfe und –Wellen einfach aus dem Output entfernen.
- Vor der weiteren Auftrennung muss das magnetisierte Material thermisch entmagnetisiert werden.
- Aufbereitung der Fraktion Daimler, magnetisiert, Bleche: 15 % des eingebrachten Materials gehen über die Blechfraktion verloren, der Großteil des Magnetmaterials (85 %) verbleibt mit zusätzlichen Verunreinigungen in der Maschine.
- Aufbereitung der Fraktion Siemens, magnetisiert, Material aus QZ: Kaum magnetisches Material aus der Maschine ausgetragen. Material, das aus Maschine geholt wurde, enthält das eingebrachte Magnetmaterial entsprechend fast vollständig. Fraktion enthält aber zusätzlich noch 20 % sonstiges Material, das an den magnetischen Teilen anhaftet.
- Es wird angenommen, dass die oberflächenmontierten Magnete schneller von den Blechpaketen gelöst werden als vergrabene Magnete. Daher lagern sich erstere bevorzugt in der Maschine ab, letztere werden entsprechend mit den Blechen zum Teil ausgetragen.

Tabelle 11: Massenbilanz QZ-Versuch

		Rotoren entmagnetisiert Daimler [kg]	Rotoren entmagnetisiert Siemens [kg]	Rotoren magnetisiert Daimler [kg]	Rotoren magnetisiert Siemens [kg]
Input	Gesamt	92,6	122,0	111,5	114,4
	davon Magnete	14,3	16,3	17,1	12,8
Output					
	Rotortöpfe/Wellen	40,2	44,2	49,2	59,2
	Bleche	29,9	57,7	41,3	38,0
	Magnet & Bleche	19,4	18,0	1,0	0,2
	Material aus QZ		2,0	17,8	16,8
	Gesamt	89,5	121,9	109,3	114,2
Differenz		3,1	0,1	2,2	0,2

Fazit:

Die zweite Versuchsreihe bestätigte, dass bei Zerkleinerung magnetisierter Komponenten im Anschluss eine Weiterbehandlung, d.h. Entmagnetisierung mit anschließender Siebung, erforderlich ist. Bei einem nicht kontinuierlichen Betrieb des QZ ist ein Verfahren zur Entnahme des Magnetmaterials aus der Anlage zu entwickeln. Um den Magnetanteil bei einem kontinuierlichen Betrieb zu ermitteln, sind weitere Versuche erforderlich. Die dafür benötigten Mengen an Rotoren standen jedoch während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung.

Das QZ-Verfahren eignet sich somit bestenfalls als Vorstufe für eine hydrometallurgische Aufbereitung. Im Rahmen der Versuche konnte das Magnetmaterial mit Verunreinigungen von bis zu ca. 20 % zurückgewonnen werden. Das Potential für eine höhere Sortenreinheit ist zweifelsohne vorhanden. Doch leider konnte der Nachweis hierfür aufgrund von fehlenden Anlagenoptimierungen (noch) nicht erbracht werden. Daher muss im Moment davon ausgegangen werden, dass der Aufwand durch die benötigten Behandlungsschritte im Vergleich zu einem werkstofflichen Recycling wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen sind, bzw. dass die gezielte Demontage für diesen Recyclingweg die wirtschaftlichere und zielführendere Methode darstellt.

Schlackenaufbereitung

Während der Konzeption des Projektes war geplant, einen rohstofflichen Recyclingprozess bestehend aus einem pyrometallurgischen Prozess und anschließender Schlackenaufbereitung zu entwickeln. Da sich schon zu Beginn der Untersuchungen abzeichnete, dass ein hydrometallurgischer Recyclingweg wahrscheinlich eine bessere Alternative darstellt, wurde der Schwerpunkt im Laufe des Projektes auf diese Entwicklung gelegt. Trotzdem wurden einige Untersuchungen zum ursprünglich geplanten Weg durchgeführt, die hier in Kurzform vorgestellt werden. Eine tiefergehende Darstellung der Untersuchungen findet sich in .

Ansatz der Schlackenaufbereitung

Die grundlegende Idee der Schlackenaufbereitung bestand darin, die Schlacke als anthropogenes Erz zu betrachten. Schlacken zeichnen sich im Gegensatz zu natürlichen Erzen dadurch aus, dass ihre Bildung innerhalb bestimmter Grenzen durch die Verwendung verschiedener Schlackenbildner, Abkühlgeschwindigkeiten und Ofenbedingungen beeinflusst werden kann. Eine Veränderung der Schlackenzusammensetzung kann grundsätzlich erreicht werden, indem entweder das primäre metallurgische Verfahren direkt angepasst wird oder indem die Schlackenzusammensetzung unmittelbar nach der Trennung der Schlacke von der Metallphase bei noch hohen Temperaturen geändert wird. Gelingt es, das Zielmetall in einer spezifischen mineralogischen Phase anzureichern, die in eine Matrix aus wertlosen Gangmineralien eingebettet ist, dann ist es unter Umständen möglich ein Mineralkonzentrat mit Hilfe klassischer Aufbereitungsverfahren zu erzeugen. Aus dem Konzentrat lässt sich das Zielmetall dann deutlich effektiver mittels weiterer metallurgischer Prozesse extrahieren als aus der Gesamtschlacke.

Die prinzipielle Durchführbarkeit dieses Ansatzes wurde bereits in einem früheren Forschungsprojekt „Lithium-Batterie Recyclinginitiative“ (LiBRi) gezeigt. In diesem Projekt wurde die Rückgewinnung von Lithium aus den Schlacken des Umicore Battery Recycling Process, einem pyrometallurgischen Recyclingprozess für Lithium-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Batterien, untersucht. Es zeigte sich, dass sich Lithium bei Verwendung eines Al-reichen und Si-armen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-Li}_2\text{O-SiO}_2$ -Schlackensystems fast vollständig in einer oxidischen Phase, Lithiumaluminat (LiAlO_2), eingebettet in eine silikatische Matrix aus Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al,Si})\text{O}_7$) und Merwinite ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), anreichern lässt. Das Lithiumaluminat ließ sich nach einem Aufschluss der Schlacke mittels Mahlung durch Flotation mit Fettsäuren anreichern und konnte anschließend durch ein hydrometallurgisches Verfahren zu Lithiumcarbonat weiterverarbeitet werden , .

Im Verlauf der im Rahmen des LiBRi-Projektes durchgeführten Untersuchungen wurde auch die extrem hohe Affinität von Seltenerd-Elementen (SEE) zu Siliko-Phosphat-Phasen im System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-Li}_2\text{O-SiO}_2\text{-(P}_2\text{O}_5)$ entdeckt . Im MORE Projekt wurden daher weitere Untersuchungen in dieser Richtung durchgeführt, um die entdeckte Anreicherung der SEE in phosphathaltigen Phasen in einem pyrometallurgischen Recyclingprozess für SEE aus Motorschrotten zu nutzen.

Untersuchte Schlacken

Die phosphatfreie Schlacke und die Schlacke mit einem P_2O_5 -Gehalt von 1,33 Gew.-% (Tabelle 12) wurden beide von Umicore in Pilotversuchen durch Einschmelzen von Motorschrott zusammen mit Schlackenbildnern erzeugt. Das Redoxpotential wurde in den Versuchen so eingestellt, dass die SEE selektiv oxidiert wurden, während Eisen und Kobalt in die Legierungsphase gelangten. Die Schlacke mit einem P_2O_5 -Gehalt von 4,56 Gew.-% (entsprechend einem Molverhältnis SEE:PO_4 von ca. 1:1 wie in Monazit ($(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$) und Xenotim (YPO_4)) wurde erzeugt, indem die Schlacke mit 1,33 Gew.-% P_2O_5 erneut mit zusätzlichem P_2O_5 sowie derselben Menge CaO aufgeschmolzen wurde. Die Zugabe von CaO war notwendig, um die Basizität der Schlacke ungefähr konstant zu halten. Ohne Zugabe von CaO erstarrte die Schlacke glasig. Alle Schlacken wurden linear über 24 Stunden ausgehend von 1450 °C abgekühlt.

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung der drei untersuchten Schlacken (nur relevante Elemente). Alle Werte in Gew.-%.

	0% P ₂ O ₅	1,3% P ₂ O ₅	4,6% P ₂ O ₅
SiO₂	31,65	28,42	26,84
TiO₂	0,29	0,40	0,39
Al₂O₃	22,30	21,71	20,64
FeO	0,15	2,91	2,82
MnO	0,17	0,27	0,23
MgO	7,55	5,47	5,19
CaO	33,18	28,01	28,88
Na₂O	0,37	0,12	0,13
K₂O	0,20	0,17	0,13
P₂O₅	0,03	1,33	4,56
Nd₂O₃	2,11	6,94	6,59
Dy₂O₃	1,10	2,73	2,59

Die erste Schlacke wurde produziert, um zu sehen, wie sich die SEE in einem phosphatfreien Al₂O₃-CaO-MgO-SiO₂-Schlackensystem verhalten. Aufbauend auf den chemischen und mineralogischen Analysen dieser Schlacke, die eine mehr oder weniger gleichmäßige Verteilung der SEE zeigte, wurde ein Versuch unternommen, die SEE durch Erhöhung der SEE-Konzentration und durch Zugabe von Phosphat in einem Molverhältnis SEE:PO₄ von 1:1 in einer spezifischen Phase anzureichern. Da unter den eingestellten Redoxbedingungen leider ein Teil des P₂O₅ zu Phosphor reduziert wurde, lag der tatsächliche P₂O₅ Gehalt der Schlacke aber bei nur 1,33 Gew.-%. Daher wurde die zweite Schlacke noch einmal aufgeschmolzen und wie oben beschrieben mit P₂O₅ dotiert.

Phasenanalytik

Die Zusammensetzung der nach der Abkühlung der Schlacken gebildeten Phasen wurde mit Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA) untersucht. Zur Ermittlung der chemischen Konzentrationen in den Phasen sowie zur Aufnahme von Rückstreu-Elektronenbildern mit Z-Kontrast („Back Scattered Electrons“, BSE(Z)) diente eine Cameca SX 100 Mikrosonde. Dazu wurden nicht abgedeckte, mit Kohlenstoff beschichtete Dünnschliffe verwendet. Für die Kalibration der wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (WDRFA) wurden geeignete Standards ausgewählt und eine Ein-Punkt-Kalibration erstellt. Die Elektronenbilder wurden unter Ausnutzung des Ordnungszahl-(Matrix-) abhängigen Kontrasts der Rückstreuerelektronen aufgenommen. Dabei steht die Helligkeit der Grauwerte in direktem Zusammenhang mit der mittleren Ordnungszahl des analysierten Kornes oder Bereichs. Verbindungen mit hohen Gehalten leichter Elemente (z. B. Al, Si, Mg) wie Spinell oder Mg-Al-Silikate erscheinen dabei dunkler als Komponenten mit Gehalten schwererer Elemente wie Ca, Übergangsmetallen oder SEE.

Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen

Ausgangspunkt der Untersuchungen war eine phosphatfreie Schlacke (vgl. Tabelle 12, links). Es zeigte sich, dass die wichtigsten mit ESMA nachweisbaren Phasen (Abbildung 55) niedrig polymerisierte Soro- und Inosilikate des Typs (Ca,Nd,Dy)₂(Al,Mg)(Al,Si)₂O₇ (gehlenitartig) und (Ca,Mg,Nd,Dy)(Ti,Al,Fe,Mn,Mg)(Al,Si)₂O₆ (pyroxenartig) sind. In der Sorosilikatphase sind etwa 3 - 5 Gew.-% und in der Inosilikatphase etwa 40 - 50 Gew.-% des CaO durch SEE₂O₃ ersetzt, was

SEE₂O₃-Gehalten von bis zu gut 2 Gew.-% bzw. 11 Gew.-% entspricht. Die Schlacke enthält darüber hinaus vereinzelt spinellartige Oxide (Mg,Mn)(Al,FeIII)₂O₄ und Glas mit geringen Anteilen an K₂O. Das kaliumhaltige Glas enthält messbare Anteile an SEE (bis zu 10 Gew.-% SEE₂O₃) und CaO. Dieses Glas enthält eventuell SEE-reiche Mikrokristallite CaO-reicher Phasen, die mit der verwendeten Mikrosonde aber räumlich nicht auflösbar sind (< 2 µm). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die SEE in der phosphatfreien Schlacke mehr oder weniger gleichmäßig in den Silikatphasen der Schlacke verteilt sind. Eine wirtschaftlich interessante Anreicherung in einzelnen Phasen hat nicht stattgefunden.

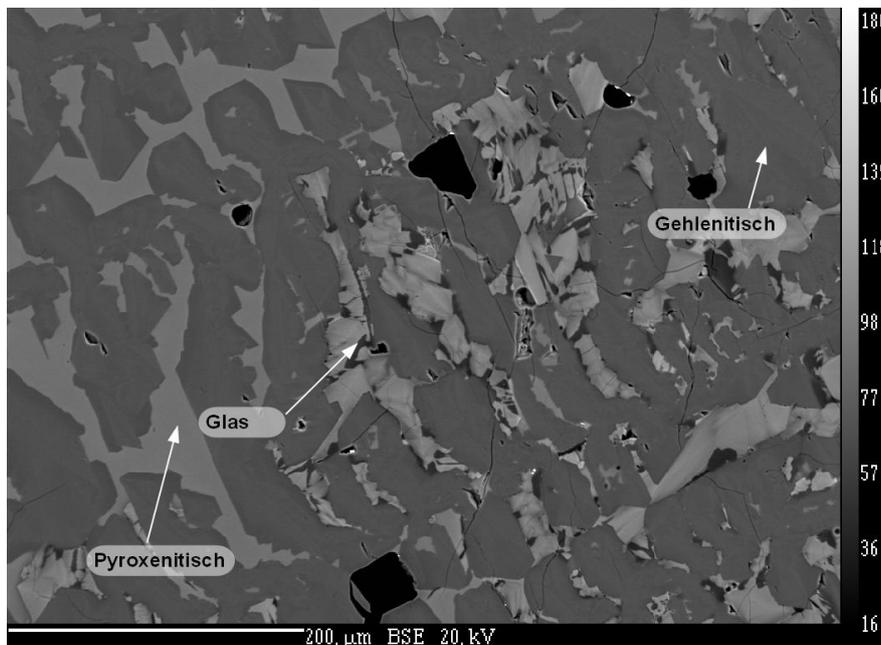


Abbildung 55: Rückstreuelektronenbild (Z-Kontrast) der phosphatfreien Schlacke.

Um eine Anreicherung der SEE in einer spezifischen Phase zu erreichen wurden als Nächstes zwei phosphathaltige Schlacken mit 1,33 Gew.-% bzw. 4,56 Gew.-% P₂O₅ produziert (Tabelle 12, Mitte, rechts). Darüber hinaus wurde der SEE₂O₃-Gehalt der Schlacken erhöht.

Werden 1,33 Gew.-% P₂O₅ zugefügt und der SEE-Gehalt erhöht, kann zusätzlich zu den niedrig polymerisierten Soro- und Inosilikaten, den spinellartigen Oxiden und dem K₂O-haltigen Glas ein Siliko-Phosphat mit der Formel (Ca,Nd,Dy)₃(Si,P)₅O₁₃ nachgewiesen werden (Abbildung 56). Diese Phase erinnert sehr stark an das natürlich vorkommende Mineral Britholit und enthält etwa 4 Gew.-% P₂O₅, 16 Gew.-% Dy₂O₃ und 41 Gew.-% Nd₂O₃. Den Phasenberechnungen zufolge wird der Ladungsausgleich durch gekoppelte Substitution von Ca(II)/SEE(III) und P(V)/Si(IV) erreicht. Die silikatischen Matrixphasen weisen allerdings immer noch einen SEE₂O₃-Gehalt zwischen 3 und 14 Gew.-% auf, der bei einer mechanischen Aufbereitung zu hohen SEE-Verlusten führen würde. Daher wurde der Phosphatgehalt der Schlacke noch einmal erhöht und ein Molverhältnis SEE:PO₄ von 1:1 eingestellt, um zu untersuchen, ob sich unter diesen Bedingungen die SEE vollständig in einer Phase anreichern lassen.

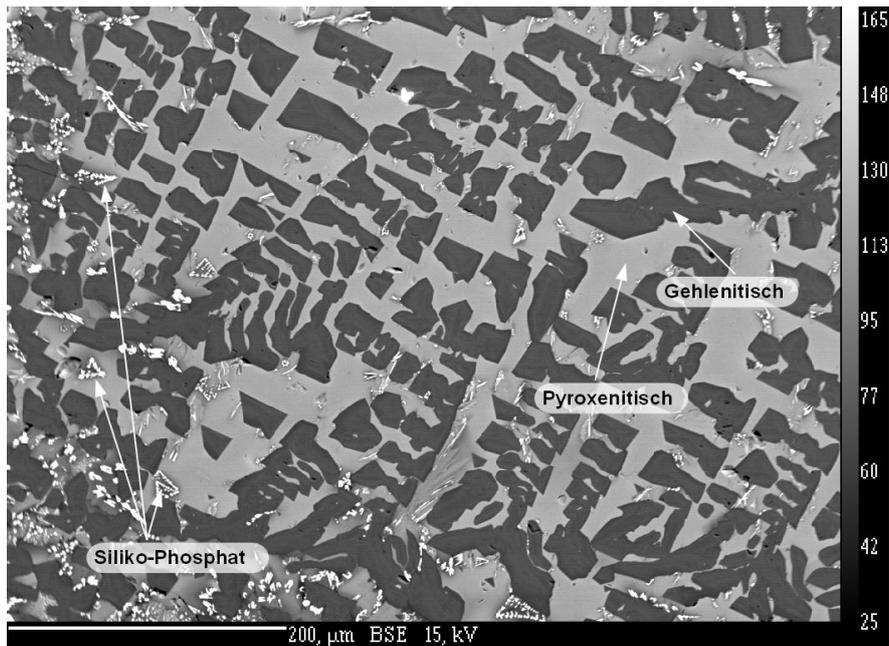


Abbildung 56: Rückstreuelektrotronenbild (Z-Kontrast) der Schmelze mit 1,33 Gew.-% P₂O₅.

Durch die Erhöhung des P₂O₅-Gehaltes auf 4,56 Gew.-% (Abbildung 57) ändert sich der Phasenbestand aus niedrig polymerisierten Soro- und Inosilikaten, den spinellartigen Oxiden und dem K₂O-haltigen Glas kaum. Auch hier ist ein britholitähnliches Siliko-Phosphat mit der Formel (Ca,Nd,Dy)₃(Si,P)₅O₁₃ nachweisbar. In diesem Fall liegt die Konzentration an P₂O₅ bei 15 Gew.-%. Diese Phase enthält etwa 11 Gew.-% Dy₂O₃ und 31 Gew.-% Nd₂O₃. Im Vergleich zur Schmelze mit 1,33 Gew.-% P₂O₅ sind die Siliko-Phosphat-Kristallite in diesem Fall deutlich größer und haben hexagonale Nadeln mit einer Länge von bis zu 0,5 mm ausgebildet. Eine weitere Verbesserung gegenüber der Schmelze mit 1,33 Gew.-% P₂O₅ stellt der niedrigere Selten-Erd-Gehalt der silikatischen Matrix dar – gut erkennbar an der geringeren relativen Helligkeit der Matrix – d. h., dass der Anreicherungsgrad der SEE in die Siliko-Phosphat-Phase noch einmal erhöht werden konnte. Eine genaue Bilanzierung ist bisher aufgrund der hohen chemischen Variabilität der Phasen nicht gelungen.

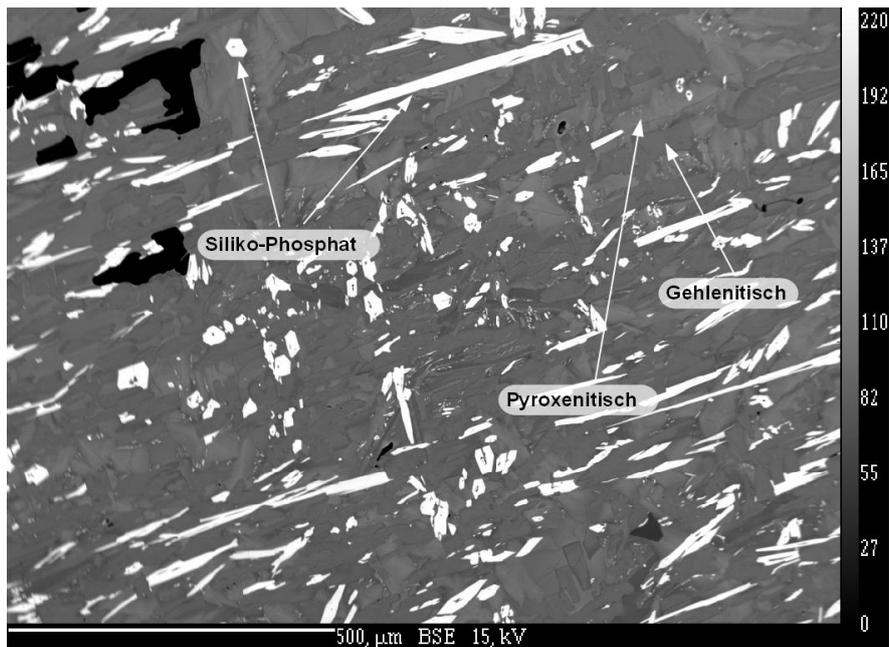


Abbildung 57: Rückstreuelektrotronenbild (Z-Kontrast) der Schmelze mit 4,56 Gew.-% P₂O₅.

Schlussfolgerungen für eine mögliche Schlackenaufbereitung

Voraussetzung für eine Schlackenaufbereitung analog zur klassischen Erzaufbereitung sind eine möglichst hohe Anreicherung der Wertmetalle, hier Nd und Dy, in einer spezifischen Phase, möglichst große Kristallite kompakter Form sowie möglichst große physikalische Unterschiede zwischen dem Wertmineral und den „Gangmineralen“.

Auch wenn in der Schlacke mit 4,56 Gew.-% eine erhebliche Anreicherung der SEE in die Siliko-Phosphate zu beobachten ist, enthalten die Matrixphasen immer noch bis zu 15 Gew.-% SEE, die bei einer mechanischen Aufbereitung verloren gehen würden. Desweiteren zeigen Korngröße und -form der Britholitphase noch erhebliches Optimierungspotential. Die nadelige Ausprägung der Britholitkörner (s. Abbildung 57) würde eine sehr feine und damit energieintensive Aufmahlung der Schlacke für eine ausreichende Liberation erfordern. Darüber hinaus hätte die feine Korngrößenverteilung der aufgeschlossenen Schlacke für die nachfolgende Sortierung den Nachteil, dass die Auswahl an möglichen Sortierverfahren sehr eingeschränkt wäre. Als mögliches Sortierverfahren kommt wahrscheinlich aufgrund der Anreicherung der relativ schweren SEE im Siliko-Phosphat vor allem eine Dichtesortierung in Betracht. Laut Literatur besitzt natürlich vorkommender Britholit eine Dichte um 4,5 g/cm³, während die Silikate Dichten zwischen 3 und 3,5 g/cm³ besitzen. Eine weitere Möglichkeit könnte eine Flotation darstellen. Da für die Flotation von Britholit allerdings keine Erfahrungen vorliegen, wird dies vermutlich umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung geeigneter Flotationsreagenzien und -bedingungen erfordern.

Vor der Entwicklung einer Methode zur mechanischen Aufbereitung der Schlacke, müssen aber zuerst die oben genannten Probleme gelöst werden. Daher sollen zukünftige Untersuchungen vorrangig folgende Ziele adressieren:

- Maximierung der SEE-Anreicherung in der Siliko-Phosphat-Phase und
- Optimierung der Korngröße.

Um diese Ziele zu erreichen, ist geplant, das System Al₂O₃-CaO-MgO-P₂O₅-SEE₂O₃-SiO₂ im Rahmen eines nachfolgenden Grundlagenforschungsprojektes thermodynamisch zu charakterisieren, um ein besseres Verständnis des Kristallisationsprozesses zu erlangen.

Hydrometallurgische Recyclingverfahren für demontierte NdFeB-Magnete

Das IFAD hat im Rahmen des Projektes drei hydrometallurgische Recyclingverfahren (Abbildung 58) bis in den Kleintechnikumsmaßstab entwickelt, die sich lediglich im Trenngrad der SEE unterscheiden. In allen drei Prozessen werden die Magnete in Salzsäure gelöst. Anschließend werden aus der Lösung Eisen als Goethit und Kobalt als Kobaltsulfid ausgefällt. Im ersten Prozess werden nach der Aufreinigung der Lösung alle Seltenen Erden (Dy, Nd, Pr, Tb) gemeinsam als Oxalate ausgefällt. Im zweiten Prozess werden die Seltenen Erden durch fraktionierte Fällung mit Natriumsulfat und Oxalsäure in ein leichtes (Nd, Pr) und ein schweres (Dy, Tb) Selten-Erd-Konzentrat vorgetrennt. Diese beiden Prozesse erzeugen Selten-Erd-Konzentrate guter Qualität (Reinheit > 97 Gew.-% Selten-Erd-Oxide) bei hohen Ausbeuten zwischen 90 % und 95 %. Im dritten Prozess werden die Seltenen Erden vollständig in leichte und schwere Seltene Erden durch Solventextraktion mit PC-88A getrennt. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte kurz näher erklärt. Eine ausführlichere Darstellung der Ergebnisse findet sich in , , .

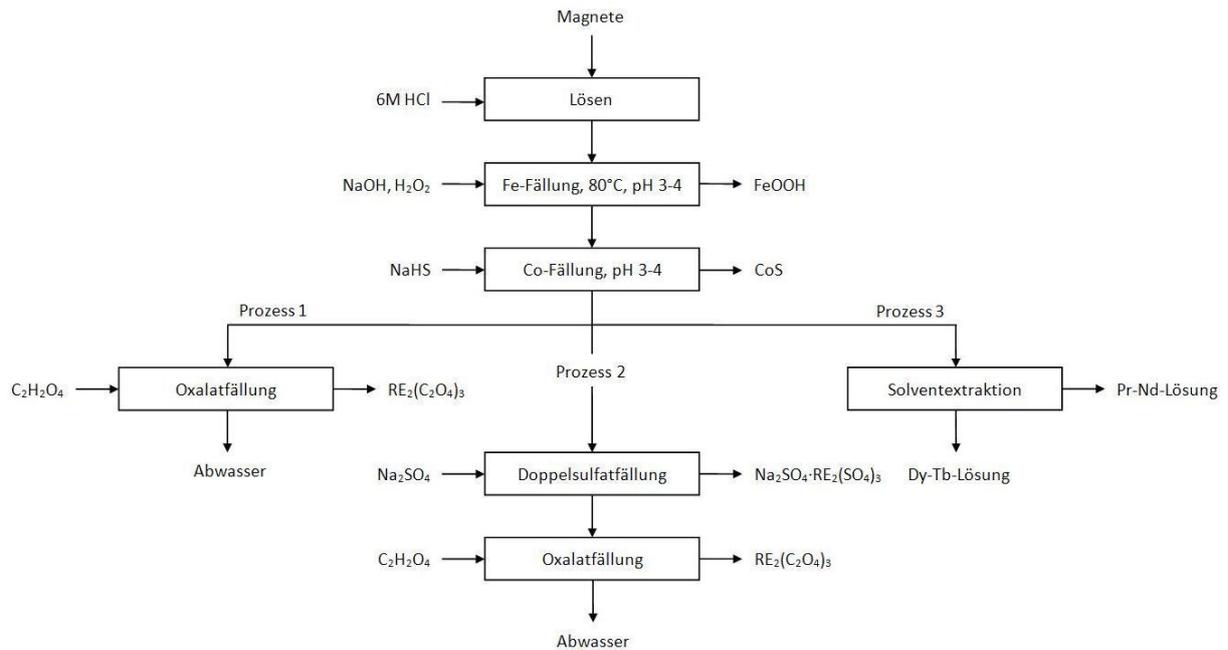


Abbildung 58: Vereinfachtes Fließbild der entwickelten Prozesse. Die Oxalate können durch thermische Zersetzung bei 900 °C weiter in die Oxide umgewandelt werden, die Doppelsulfate durch Umsetzung mit konzentrierter Natronlauge in die Hydroxide.

Laugung

Für die die Auflösung der Magnete wurden Salzsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure in Erwägung gezogen. Eine selektive Laugung der SE ist aufgrund ihrer Einbindung in die Legierung nicht möglich.

Tastversuche haben gezeigt, dass ein Auflösen der Magnete in allen drei Säuren möglich ist. Das Auflösen findet unter starker Wasserstoffentwicklung statt und ist stark exotherm. Nach den Tastversuchen wurde das Auflösen der Magnete mit Salzsäure und Schwefelsäure näher untersucht. Salpetersäure wurde ausgeschlossen, da kein Bedarf für eine oxidierende Säure besteht sowie aufgrund ihres hohen Preises. Desweiteren ist es für die sich anschließende Fällung des Eisens als Goethit notwendig, dass das Eisen als Fe^{2+} vorliegt. Die Experimente mit Salzsäure zeigten, dass sich Feststoffkonzentrationen von bis zu 180 g/L bei Verwendung von 6M HCl erreichen lassen. Bei höheren Konzentrationen bildete sich Eisen(II)chlorid. Mit Schwefelsäure waren maximal Feststoffkonzentrationen von 90 g/L bei Verwendung von 1,8M H_2SO_4 erreichbar, bevor Sulfate auskristallisierten. Daher wurde Salzsäure als Lösungsmittel verwendet. Aufgrund der starken Wärmeentwicklung muss die Reaktion gekühlt werden. Die Reaktion dauert in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades der Magnete zwischen 30 Minuten (Pulver) bis hin zu wenigen Stunden (unzerkleinerte Magnete).

Eisen- und Kobaltfällung

Auch wenn eine selektive Fällung der SEE aus der Laugelösung in Form von Oxalaten bzw. Doppelsulfaten möglich ist (Abbildung 59 und Abbildung 60), lassen sich höhere Reinheiten erreichen, wenn Eisen und Kobalt vor der SEE-Fällung entfernt werden, wodurch eine ungewollte Mitfällung der beiden Elemente verhindert wird. Für die Fällung des Eisens wurde der Goethit-Prozess untersucht, Kobalt wurde als Sulfid gefällt.

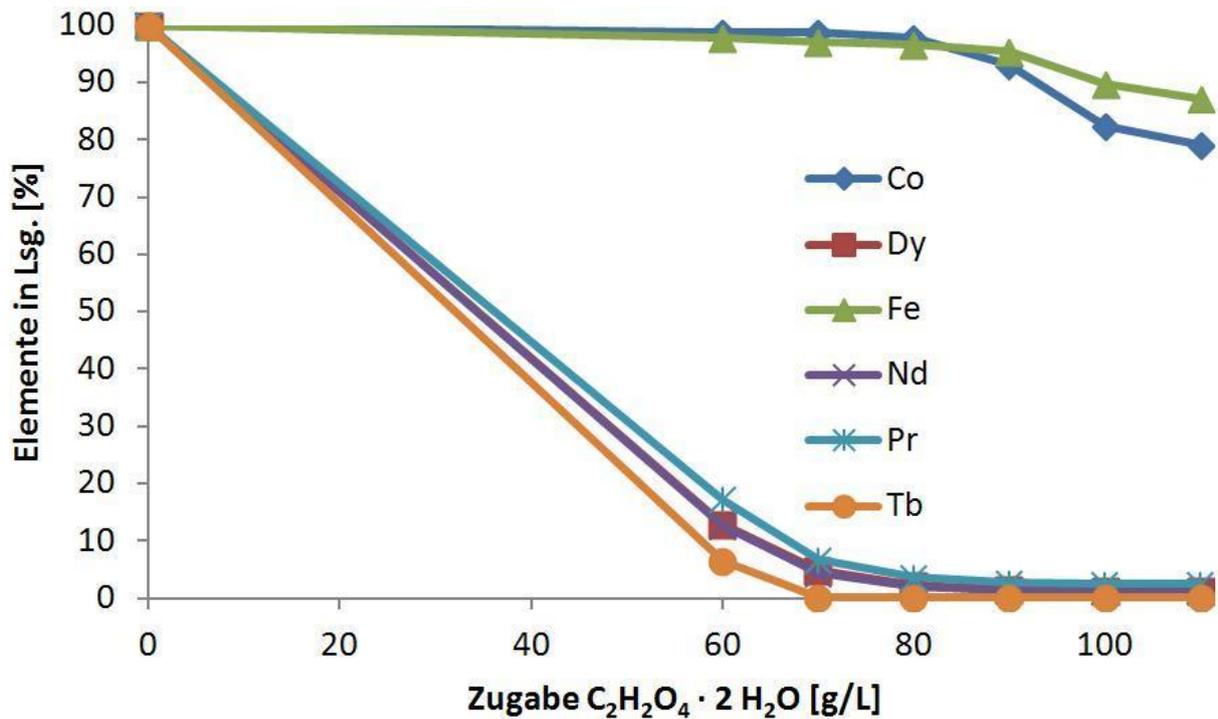


Abbildung 59: Fällung der SEE mit Oxalsäure aus salzsaurer Lösung. Die Lösung wurde hergestellt, in dem Magnete bei einer Feststoffkonzentration von ca. 160 g/L in 6M HCl aufgelöst wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die SEE bevorzugt vor Eisen und Kobalt ausfallen.

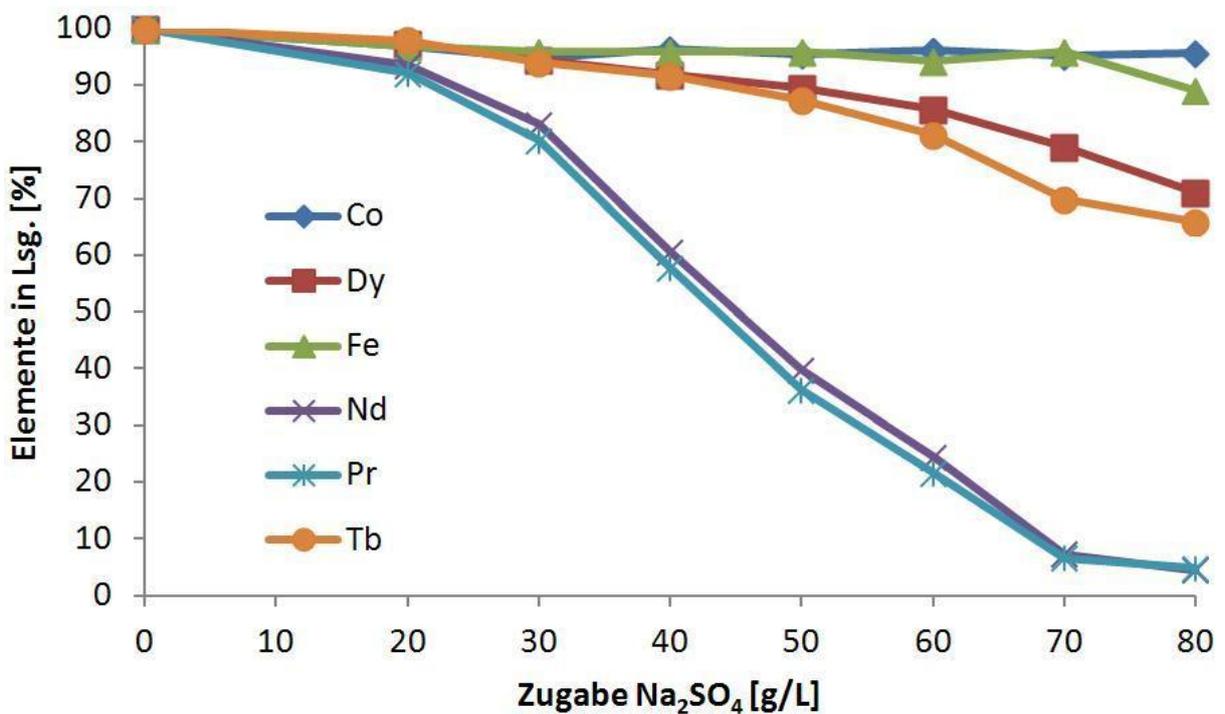


Abbildung 60: Fällung der SEE mit Natriumsulfat aus salzsaurer Lösung. Die Lösung wurde hergestellt, in dem Magnete bei einer Feststoffkonzentration von ca. 80 g/L in 3M HCl aufgelöst wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die LSEE bevorzugt vor den SSEE ausfallen.

Etablierte Prozesse zur Eisenerntfernung in hydrometallurgischen Prozessen sind die Fällung als Goethit (FeOOH), Hämatit (Fe₂O₃) und Jarosit (MFe₃(SO₄)₂(OH)₆ mit M = Na, K, oder NH₄). Eine Fällung als Eisenhydroxid (Fe(OH)₃) wird insbesondere bei hohen Eisenkonzentrationen normalerweise nicht angewendet, da Fe(OH)₃ aufgrund seiner schleimigen Struktur schwer zu filtrieren ist und erhebliche Mengen an Nichteisenmetallen einbindet. Abbildung 61 gibt einen generellen Überblick über die Stabilitätsbereiche der unterschiedlichen Fällprodukte.

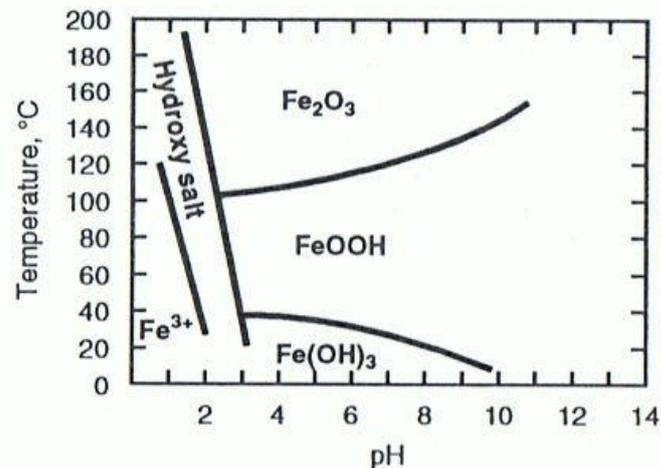
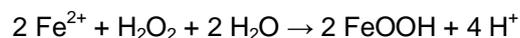


Abbildung 61: Stabilitätsbereiche von Hämatit (Fe₂O₃), Goethit (FeOOH), Eisen(III)hydroxid (Fe(OH)₃) und Jarosit (Hydroxy salt) bei Fällung aus 0,5M Eisen(III)sulfatlösung

Die Goethitfällung wurde gewählt, da die Fällung als Jarosit neben Sulfat ein Alkalimetallion benötigt, wodurch sich neben Jarosit auch säureunlösliche Seltenerd-Doppelsulfate bilden würden. Hämatit wurde aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Betracht gezogen, da die Reaktion nur unter hohem Druck in Autoklaven durchführbar ist. Weitere Vorteile der Goethitfällung sind, dass sie kein spezifisches Anion benötigt und sich Eisenrestkonzentrationen von < 0,05 g/L erreichen lassen.

Um Eisen als Goethit zu fällen, muss das Eisen überwiegend als Fe²⁺ vorliegen. Innerhalb des Stabilitätsbereiches lässt sich das Eisen dann gemäß nachfolgender Gleichung durch langsame Oxidation von Fe²⁺ zu Fe³⁺ mit Luft, Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid ausfällen. Eine langsame Oxidation führt zur Bildung eines kristallinen, leicht filtrierbaren Fällproduktes. Das Ende der Reaktion ist einfach am konstanten pH-Wert bei weiterer Zugabe von Oxidationsmittel erkennbar.



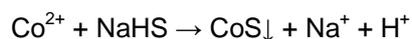
In den hier vorgestellten Prozessen liegt das Eisen nach Auflösung der Magnete fast ausschließlich als Fe²⁺ vor. Die Goethitfällung wurde direkt nach der Laugung durch Oxidation des Eisens mit H₂O₂ bei einer Temperatur von 80 °C - 95 °C durchgeführt. Der pH wurde während der Reaktion mit Natronlauge zwischen 3 und 4 gehalten, um die frei werdenden Protonen zu neutralisieren. Aufgrund der exothermen Löse- und Fällreaktionen ist bei Verwendung eines isolierten Reaktors fast keine externe Wärmezufuhr notwendig. Eine sehr gute Filtrierbarkeit des Fällproduktes wurde erreicht, wenn die Oxidation des Eisens über 60 bis 90 Minuten durchgeführt und die Suspension heiß abfiltriert wurde. Der benötigte β-Faktor an H₂O₂ für eine vollständige Oxidation lag bei 1,3. Aufgrund der sehr feinen Korngrößenverteilung des Goethits zwischen 1 µm (x₁₀) und 10 µm (x₉₀) ist die Verwendung eines entsprechend feinen Filters notwendig. Die Eisenrestkonzentration im Filtrat lag zuverlässig unter 5 mg/L. Tabelle 13 zeigt eine typische Zusammensetzung des Fällproduktes. Es ist zu sehen, dass SEE im gewählten pH-Bereich nicht in nennenswertem Umfang in den Goethit eingebunden werden. Leider enthält der Goethit aber hohe Chloridgehalte, was eine Verwendung in der Eisenindustrie unmöglich macht. Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie haben gezeigt, dass es sich bei dem Fällprodukt um β-Goethit, auch bekannt als Akaganeit, handelt.

Tabelle 13: Typische Zusammensetzungen des Goethits und des Kobaltsulfids nach Trocknung bei 105 °C.

Element	Goethit [ppm]	Kobaltsulfid [ppm]
B	874	620
Cl	62500	-
Co	720	413609
Dy	1384	5354
Fe	581564	1346
Nd	2225	24372
Pr	30	962
Tb	34	105

Die Kobaltfällung wurde mit Natriumhydrogensulfid als Fällmittel ausgeführt, da die Seltenen Erden keine Sulfide unter den gewählten Bedingungen bilden. Eine selektive Fällung des Kobalts als Hydroxid ist nicht möglich, da sich der Fällbereich der Selten-Erd-Hydroxide mit dem von Kobalhydroxid überschneidet.

Wie die Goethitfällung wurde auch die Kobaltfällung in einem pH-Bereich zwischen 3 und 4 gemäß folgender Gleichung ausgeführt, um Verluste an SEE zu vermeiden.

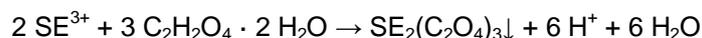


Die Fällung wurde bei Raumtemperatur mit einem β -Faktor von 1,5 ausgeführt. Das Fällprodukt ist einfach zu filtrieren und die erreichbaren Kobaltrestkonzentrationen liegen unter 5 mg/L. Eine typische Zusammensetzung des Kobaltsulfids ist ebenfalls in Tabelle 13 gegeben. Das Gesamtausbringen an Kobalt in das Kobaltsulfid lag bei über 90 %.

Rückgewinnung der Seltenen Erden

Prozess 1: Oxalatfällung

Im ersten Prozess wurden alle SEE gemeinsam durch eine leicht überstöchiometrische Zugabe von Oxalsäure in die Lösung gefällt.



Nach Filtration und Waschen ließ sich das Oxalat durch Glühen bei 900 °C in ein Oxid umwandeln.

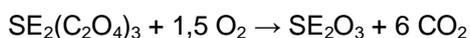


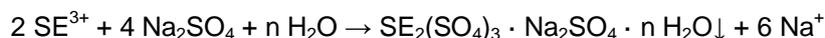
Tabelle 14 zeigt eine typische Zusammensetzung eines solchen Mischoxides. Die Restkonzentration an SEE im Filtrat lag bei unter 20 mg/L, die Gesamtausbeute an Seltenen Erden lag zwischen 90 % und 95 %.

Prozess 2: Fraktionierte Fällung

Im zweiten Prozess wurden die SEE mittels einer fraktionierten Fällung mit Natriumsulfat und Oxalsäure grob in leichte SEE und schwere SEE getrennt. Bei dieser Form der fraktionierten Fällung wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Doppelsulfatsalze $\text{SE}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ der leichten SEE wie Praseodym und Neodym in Wasser und verdünnten Säuren nicht löslich sind, während die

Doppelsulfatsalze der schweren SEE wie Terbium und Dysprosium mäßig löslich sind. Dies kann für eine grobe, gruppenweise Trennung der SEE ausgenutzt werden.

Um aus dem Filtrat der Kobaltfällung hauptsächlich die leichten SEE auszufällen, wurde der Lösung in einem ersten Schritt Natriumsulfat zugegeben.



Nach Filtration und Waschen wurden die Doppelsulfate mit heißer, konzentrierter Natronlauge in Hydroxide umgewandelt.



Die im Filtrat verbliebenen schweren SEE wurden wie oben beschrieben als Oxalate gefällt und durch Glühen in die Oxide überführt. Typische Zusammensetzungen der beiden Konzentrate sind ebenfalls in Tabelle 14 gegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Konzentrate wurden auch die Hydroxide durch Glühen in Oxide überführt.

Tabelle 14: Typische Zusammensetzungen der SEE-Konzentrate gewonnen durch Oxalatfällung bzw. fraktionierte Fällung. Alle Konzentrate sind durch Glühen bei 900 °C für eine bessere Vergleichbarkeit in die Oxide überführt worden. Die Oxide wurden als Dy₂O₃, Nd₂O₃, Pr₂O₃, Tb₂O₃, Al₂O₃, B₂O₃, CaO, CoO, Cr₂O₃, CuO, Fe₂O₃, MnO, Na₂O und PbO berechnet.

	Oxalatfällung		Fraktionierte Fällung			
			LSEO-Konzentrat		SSEO-Konzentrat	
	Elemente	Oxide	Elemente	Oxide	Elemente	Oxide
Dy [%]	14,79	16,97	3,35	3,85	51,21	58,77
Nd [%]	67,38	78,59	77,03	89,84	32,62	38,04
Pr [%]	2,40	2,81	2,78	3,26	0,84	0,99
Tb [%]	0,35	0,41	0,12	0,14	0,99	1,14
∑SEE/SEO [%]	84,92	98,78	83,29	97,09	85,66	98,94
∑LSEE [%]	69,78	81,40	79,81	93,10	33,46	39,03
∑SSEE [%]	15,14	17,38	3,48	3,99	52,20	59,91
LSEE/SSEE	4,6	-	22,9	-	0,6	-
Al [ppm]	<2000	<3778	2020	3817	<2000	<3778
B [ppm]	<250	<804	<250	<804	<250	<804
Ca [ppm]	<500	<699	<500	<699	<500	<699
Co [ppm]	<100	<127	<100	<127	<100	<127
Cr [ppm]	<250	<365	<250	<365	<250	<365
Cu [ppm]	<25	<31	41	51	50	63
Fe [ppm]	491	702	433	619	572	817
Mn [ppm]	<250	<322	<250	<322	<250	<322
Na [ppm]	978	1318	8566	11547	1096	1478
Pb [ppm]	<25	<27	<25	<27	<25	<27
∑Verunreinigungen [ppm]	1469	2020	11060	16034	1718	2358
Total [%]	85,07	98,98	84,39	98,69	85,83	99,17

Fazit Prozesse 1 und 2

Die Prozesse 1 und 2 stellen relativ einfache Wege dar, gemischte bzw. vortrennte Selten-Erd-Konzentrate guter Qualität zu erzeugen. Auch wenn mittels Fällungen keine vollständige Trennung in leichte SEE und schwere SEE möglich ist, kann mit Prozess 2 doch eine deutliche Vortrennung erreicht werden. Neben den SEE wird auch Kobalt in Form eines metallurgisch verwertbaren Konzentrates zurückgewonnen. Die Entwicklung der Prozesse ist im Labor- und kleinen Technikumsmaßstab (50 L-Reaktoren) weitestgehend abgeschlossen, so dass sich bei ausreichender Verfügbarkeit von Magnetschrott als nächstes ein Scale-up in den kleinen Produktionsmaßstab anschließen könnte.

Um wieder zu Selten-Erd-Metallen für die Produktion von neuen NdFeB-Magneten zu gelangen, müssen die Selten-Erd-Oxide noch zu Metallen reduziert werden. Da eine Reduktion der Mischoxide zwar thermodynamisch möglich ist, aber derzeit nicht kommerziell durchgeführt wird, wurde auch untersucht, wie aufwendig eine vollständige Trennung der SEE in leichte und schwere SEE ist, was eine Reduktion mit den heute eingesetzten Reduktionsverfahren ermöglichen würde.

Prozess 3: Trennung mittels Solventextraktion

Im dritten Prozess wird die von Eisen und Kobalt befreite Lösung einem 12-stufigen Solventextraktionsprozess (Abbildung 62) zugeführt, der die Seltenen Erden in die Fraktionen leichte SEE (Pr und Nd) sowie schwere SEE (Tb und Dy) trennt. In den bisherigen Untersuchungen auf einer Mixer-Settler-Anlage ist es gelungen, Reinheiten von bis zu 99,99 % der jeweiligen Doppelmetallkonzentrate zu erreichen.

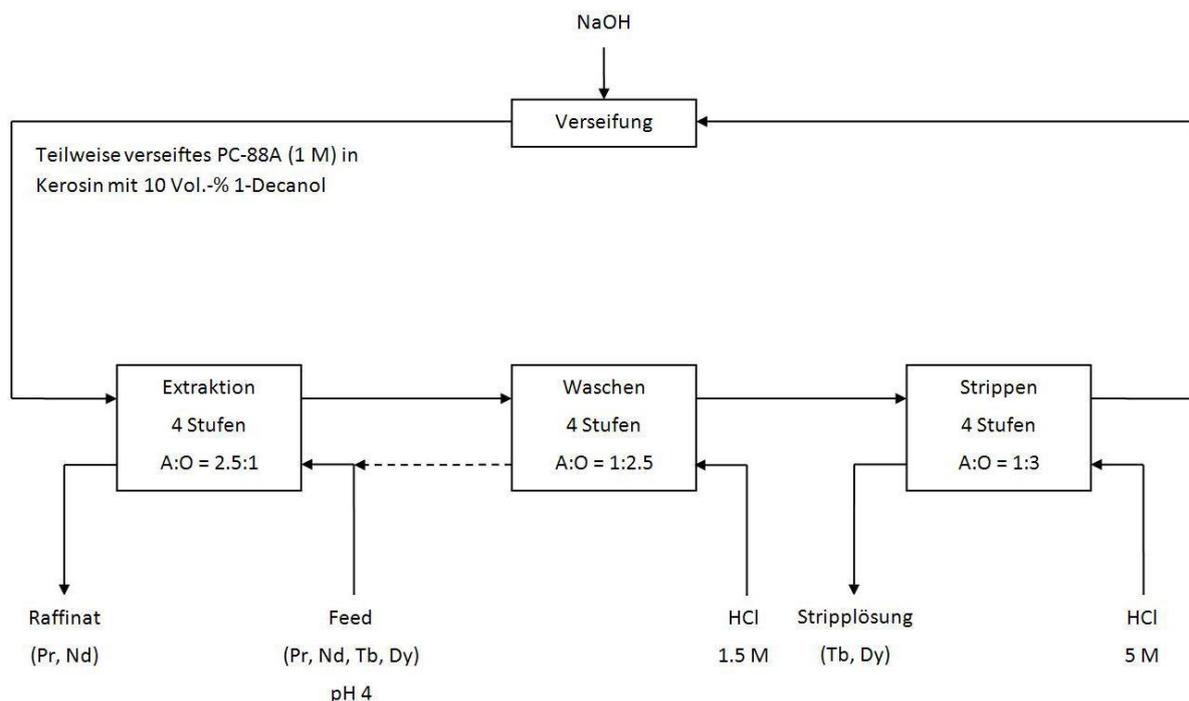


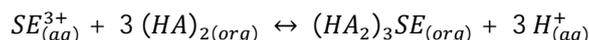
Abbildung 62: Verfahrensfließbild des Solventextraktionsprozesses zur Trennung von Tb und Dy von Pr und Nd. Ein Recycling der Waschlösung wurde bisher noch nicht untersucht.

Für die Abtrennung von Tb und Dy von Pr und Nd wurden im Rahmen des Projektes fünf Extraktionsmittel untersucht, die industriell zur Extraktion und Trennung von SEE eingesetzt werden oder wurden. Hierbei handelte es sich um Di-(2-ethylhexyl)phosphorsäure (D2EHPA), Di-(2-ethylhexyl)phosphonsäure (PC-88A), Versatic Acid 10, Tributylphosphat und Aliquat 336.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass sich mit D2EHPA und PC-88A mit Abstand die besten Trennfaktoren für das zu lösende Trennproblem erreichen lassen, weswegen diese beiden

Extraktionsmittel in die nähere Auswahl gezogen wurden. Letztlich viel die Auswahl auf PC-88A, da PC-88A ähnliche Trennfaktoren wie D2EHPA erreicht, die Extraktion aber zu höheren pH-Werten hin verschoben ist, wodurch sich der Prozess einfacher kontrollieren lässt und weniger Säure benötigt.

PC-88A ist ein typischer Kationenaustauscher und zählt zur Gruppe der organischen Phosphorsäurederivate. Die Austauschreaktion basiert i.d.R. auf einer Protonenabgabe des Extraktionsmittels und der Aufnahme des zu extrahierenden Metalls in Form eines elektrisch neutralen, in der organischen Phase löslichen Komplexes. In Lösungsmitteln mit geringer Polarität liegt PC-88A als Folge von Wasserstoffbrückenbildung als Dimer $(HA)_2$ vor. Daher kann die Extraktion mit folgender vereinfachter Reaktionsgleichung beschrieben werden.



PC-88A extrahiert im Allgemeinen bevorzugt Ionen mit hoher Ladung und bei gleicher Ladung Ionen mit geringerem Ionenradius. Daher steigen die Verteilungskoeffizienten für die hier relevanten dreiwertigen Lanthanoide aufgrund der Lanthanoidkontraktion in der Reihenfolge ${}_{59}\text{Pr} < {}_{60}\text{Nd} \ll {}_{65}\text{Tb} < {}_{66}\text{Dy}$. Dies kann als Folge der stärkeren elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen dem Extraktionsmittelanion HA_2^- und dem SE^{3+} -Kation mit abnehmenden Ionenradius interpretiert werden .

Für die Untersuchungen wurde 1 M PC-88A gelöst in Kerosin mit 10 Vol.-% 1-Decanol als Modifier verwendet. Die Zusammensetzung der wässrigen Phase nach Eisen- und Kobaltfällung ist in Tabelle 15 gegeben. Für die Prozessauslegung wurde die McCabe-Thiele-Methode angewendet.

Tabelle 15: Zusammensetzung der wässrigen Phase nach Eisen- und Kobaltfällung

Dy	Nd	Pr	Tb	Co	Fe
5,71 g/L	20,81 g/L	0,44 g/L	0,11 g/L	< 0,5 mg/l	< 2 mg/L

Extraktion

Abbildung 63 zeigt das Extraktionsverhalten in Abhängigkeit des pH-Wertes bei einem Phasenverhältnis A:O = 2,5:1 und einer Kontaktzeit von 60 s. Es ist ein signifikanter Unterschied zwischen der Extraktion der leichten und der schweren Seltenerdelemente im gewählten pH-Bereich zu erkennen. Die prozentuale Extraktion von Terbium und Dysprosium steigt von 77,5 % bzw. 84,8 % bei pH 0,67 auf über 90 % ab pH 0,9, wogegen die Extraktion von Praseodym und Neodym von unter 5 % bei pH 0,67 auf lediglich 11,4 % bzw. 12,5 % bei pH 1,71 ansteigt.

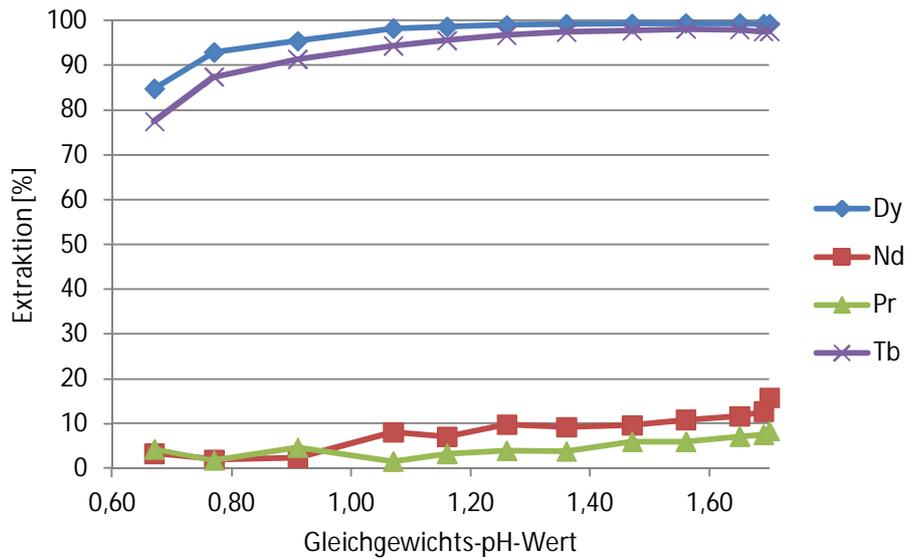


Abbildung 63: Einfluss des Gleichgewichts-pH-Wertes auf die Extraktion von Dy, Nd, Pr und Tb bei einem Phasenverhältnis A:O = 2,5:1 und einer Kontaktzeit von 60s

Um die theoretisch notwendige Stufenanzahl und ein geeignetes Phasenverhältnis für eine vollständige Dysprosium- und Terbiumextraktion zu bestimmen, wurden drei Extraktionsisothermen bei Gleichgewichts-pH-Werten von 1,0, 1,2 und 1,5 aufgenommen. Die pH-Werte wurden gewählt, da sich unterhalb von pH 1 die Extraktion der schweren Seltenen Erden deutlich verschlechtert und oberhalb von pH 1,5 verstärkt Gelbildung beobachtet wurde. Da es bei der Aufnahme der Isothermen bei pH 1,2 und 1,5 ab dem zweiten Kontakt zu massiven Problemen mit der Phasentrennung und -stabilität kam, wurde entschieden die Extraktion für einen Gleichgewichts-pH-Wert von 1 auszulegen.

Abbildung 64 zeigt das entsprechende McCabe-Thiele Diagramm aus dem hervorgeht, dass sich Dysprosium theoretisch mittels einer dreistufigen Gegenstromextraktion bei einem Phasenverhältnis A:O = 3:1 vollständig aus der Ausgangslösung extrahieren lässt.

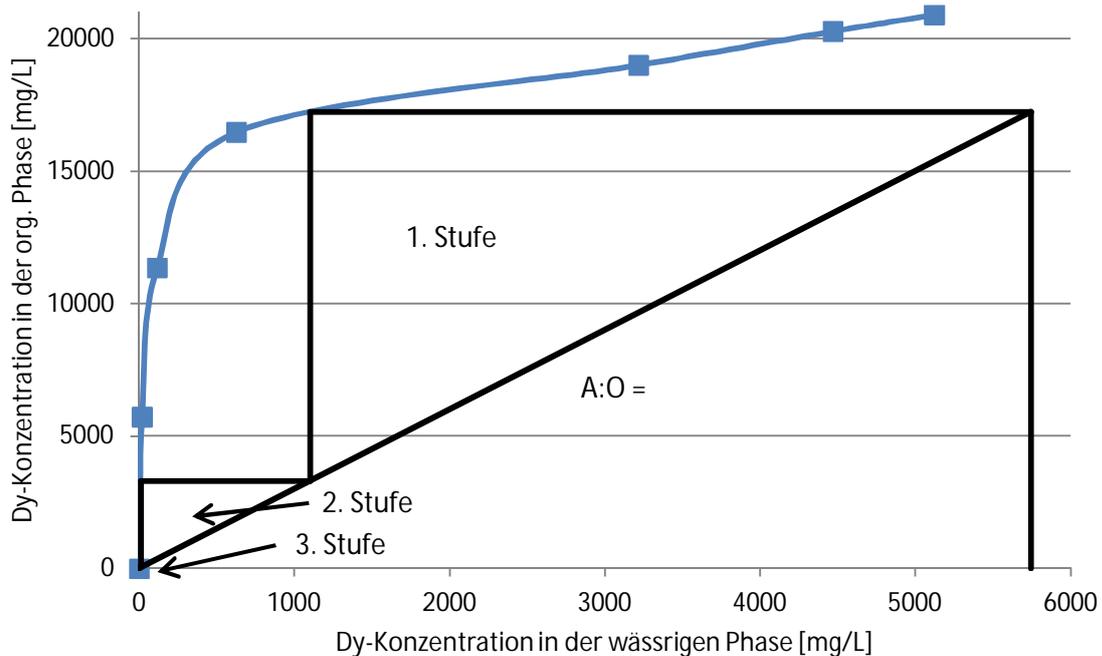


Abbildung 64: McCabe-Thiele Diagramm für die vollständige Extraktion von Dy bei pH 1

Im Anschluss an die theoretische Bestimmung der Stufenanzahl wurde untersucht, wie sich die Extraktion auf einer kontinuierlich arbeitenden Mixer-Settler-Anlage (Abbildung 65) verhält. Aufgrund einer Stufeneffizienz der realen Anlage von unter 1 und nur eingeschränkter pH-Kontrolle musste die Extraktion in mehreren Versuchen gegenüber der Auslegung leicht angepasst werden. Es zeigte sich letztlich, dass für eine vollständige Extraktion im Rahmen der Nachweisgrenzen für Tb (0,5 mg/L) und Dy (2 mg/L) vier Stufen und ein Phasenverhältnis A:O = 2,5:1 notwendig sind. Die ermittelten Parameter wurden anschließend in einem 40-stündigen Versuch verifiziert. Abbildung 66 zeigt die Selten-Erd-Konzentrationen der wässrigen Phase im Auslauf der Anlage. Es ist zu erkennen, dass Tb und Dy ab Stunde 10 nicht mehr detekrierbar waren und somit eine reine Pr-Nd-Lösung die Extraktion verlässt.

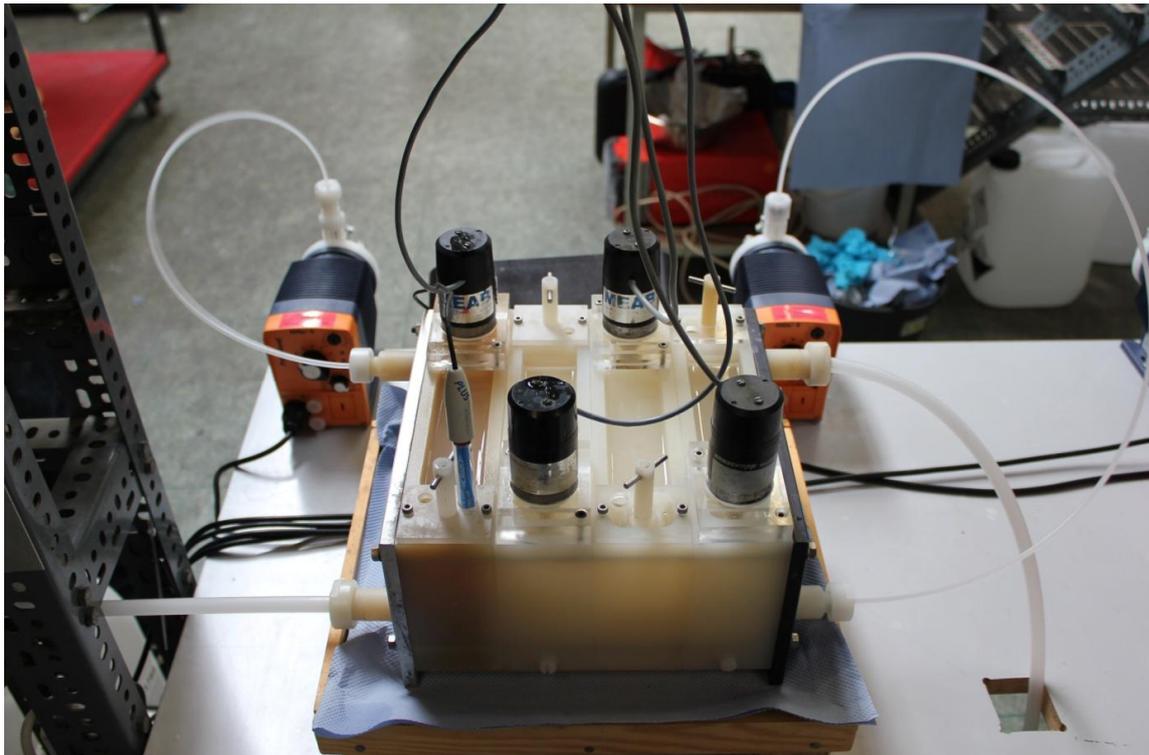


Abbildung 65: MEAB MSU 0,5 Mixer-Settler in einer vierstufigen Gegenstromanordnung

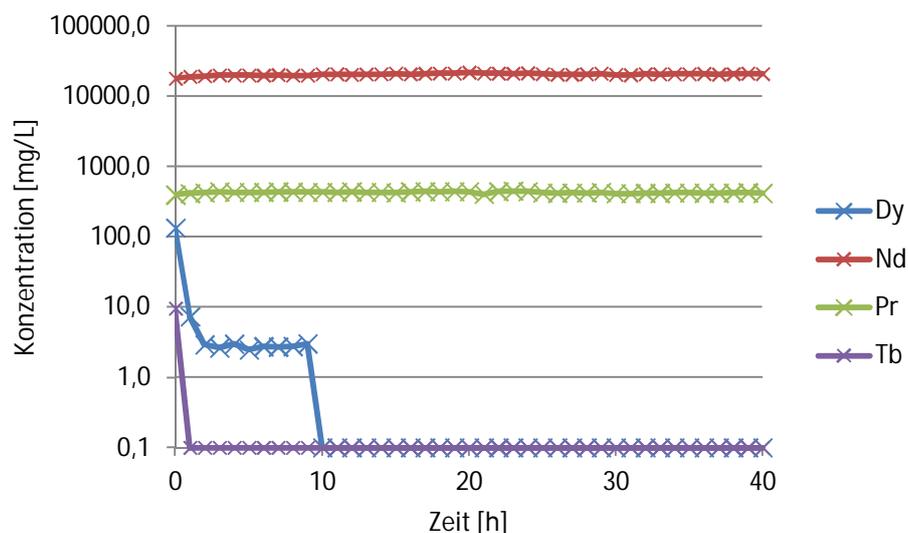
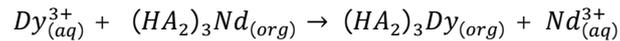


Abbildung 66: SEE-Konzentrationen der wässrigen Phase im Auslauf des Extraktionsexperimentes

Waschen & Strippen

Da während der Extraktion von Tb und Dy auch etwas Pr und Nd mit extrahiert werden, müssen diese aus der organischen Phase ausgewaschen werden, bevor Tb und Dy gestrippt werden. Im vorgestellten Prozess wurde das Waschen mit 1,5 M HCl durchgeführt. Die Auslegung erfolgte wieder über die McCabe-Thiele Methode. Es konnte gezeigt werden, dass ein vollständiges Auswaschen bei einem Phasenverhältnis A:O = 1:2,5 möglich ist. Nachteilig erwies sich, dass beim Waschen mit Säure auch erhebliche Mengen Dy ungewollt co-extrahiert wurden, so dass hier in zukünftigen Versuchen ein Waschen basierend auf einer pH-unabhängigen Verdrängungsreaktion mit Stripplösung nach folgender Reaktionsgleichung untersucht werden sollte.



Im letzten Schritt wurden Tb und Dy aus der gewaschenen organischen Phase mit 5 M HCl in einer weiteren vierstufigen Mixer-Settler-Anordnung bei einem Phasenverhältnis A:O = 1:3 gestrippt. Die gewählten Parameter erwiesen sich als ausreichend, um die organische Phase vollständig zu stripfen.

Fazit

Durch die Untersuchungen zu Solventextraktion im MORE Projekt konnte gezeigt werden, dass Recycling von NdFeB-Magneten die Chance bietet, separierte SEE mit deutlich geringerem verfahrenstechnischen Aufwand zu erzeugen, als dies aus primären Quellen möglich ist. Dies liegt zum einen an der begrenzten Anzahl an Elementen, zum anderen an der Lücke von vier Elementen zwischen ${}_{60}\text{Nd}$ und ${}_{65}\text{Tb}$, 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.

Diesen Vorteilen steht eine Reihe von Herausforderungen gegenüber, die eine industrielle Umsetzung innerhalb der nächsten Jahre erschweren. Hierzu zählen vor allem die derzeit geringen Mengen an NdFeB-Abfällen, die starken Schwankungen im Dy-Gehalt der Magnete, da ein Solventextraktionsprozess auf einen bestimmten Dysprosiumgehalt ausgelegt werden muss, sowie die Notwendigkeit einer vollständigen Trennung von NdFeB- und SmCo-Abfällen.

4.5 AP 5 Wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen

4.5.1 AP 5.1 Ökobilanzen und Ökoeffizienzanalyse

In einem eigenständigen Bericht, der den vorliegenden Abschlussbericht als Anhang ergänzt, werden verschiedene Prozessketten für die Wiederverwendung bzw. das Recycling von NdFeB-Magneten beschrieben, die Gegenstand der Forschungsaktivitäten im MORE-Verbund waren. Zudem werden die Ökobilanzen der entwickelten Recyclingverfahren und deren Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert. Im folgenden Text findet sich eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse.

Die durchgeführten Ökobilanzen sollen einerseits die ökologische Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren im Vergleich zur Primärroute der Seltenen Erden bzw. NdFeB-Magnete aufzeigen. Andererseits sollen durch die detaillierten Ergebnisse den MORE-Partnern wichtige Hinweise auf mögliche zukünftige ökologische Optimierungspotenziale ihrer entwickelten Verfahren aufgezeigt werden. Abschließend gibt dieser Bericht Empfehlungen zur weiteren Entwicklung dieser Technologien. Da die verschiedenen Verfahren NdFeB-Magnete unterschiedlicher Qualität (unterschiedliche Verunreinigungsgrade usw.) adressieren, war ein ökonomischer Vergleich der verschiedenen in MORE untersuchten Wiederverwendungs- und Recyclingrouten ausdrücklich nicht Ziel dieser Studie.

Wiederverwendungs- und Recyclingrouten und funktionelle Einheiten

Im Rahmen von MORE wurden drei entwickelte Verfahrensrouten mit Ökobilanzen modelliert. Diese drei festgelegten Routen (in Klammer federführender Partner) und ihre entsprechende funktionelle Einheiten sind folgende:

- Route 1 (Siemens): Reuse – Wiederverwendung von gereinigten NdFeB-Magneten
Funktionelle Einheit: Wiederverwendung von 1 kg NdFeB-Magnet
- Route 2 (VAC): Remelt - Werkstoffliche Verwertung, Rückführung des Magnetmaterials in die Magnetproduktion (Herstellung von Sekundärmagneten)
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1 kg Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)
- Route 3 (IFAD): Remat: Rohstoffliche Verwertung, Rückgewinnung von Selten-Erd-Mischoxid bzw. Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus gebrauchten Magneten
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1 kg Selten-Erd-Mischoxid (Verfahren 1) bzw. Neodym- und Dysprosiumoxid (Verfahren 3; Verhältnis 2 : 1, siehe unten) aus Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)

Das Konsortium hat entschieden, eine allgemeine generische Magnetkomposition zur Konkretisierung der funktionellen Einheiten für die Ökobilanzen zu Grunde zu legen. Einvernehmlich wurde die folgende generische Zusammensetzung (in Gewichtsprozent) ausgewählt, welche den Anwendungsbereich von MORE (NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von Hybrid- bzw. vollelektrischen Fahrzeugen, d.h. u.a. hoher Dysprosiumgehalt) gut abbildet:

- Neodym (Nd) – 20 %
- Dysprosium (Dy) – 10 %
- Kobalt (Co) – 2 %
- Eisen (Fe) – 67 %
- Bor (B) – 1 %

Ergebnisse

Wie aus den umfangreichen Ergebnissen der Wirkungsabschätzungen hervorgeht, sind alle drei über LCA untersuchten Routen eindeutig ökologisch vorteilhaft im Vergleich zur Primärproduktion von NdFeB-Magneten bzw. den entsprechenden SE-Oxiden.

Route 1: Reuse

Die mechanische Abtrennung von NdFeB-Magneten von Elektromotoren und deren Wiederverwendung (nach Entmagnetisierung, Reinigung und Polieren) ist ökologisch eindeutig vorteilhaft. Im Vergleich zu einem Elektromotor mit NdFeB-Magneten aus der Primärherstellung schneidet ein Elektromotor mit wiederverwendeten NdFeB-Magneten nach allen untersuchten Wirkungskategorien (GWP, ADP elementar, AP, EP, POCP und CED total) positiv ab, d.h. zeigt ökologische Vorteile, vielfach deutliche ökologische Vorteile. Die Detailanalysen der Demontage- und Reinigungsschritte zeigen, dass vor allen die Teilschritte Reinigen (Siliziumcarbid!) und Entmagnetisieren (elektrische Energie) die größten ökologischen Belastungen verursachen, die jedoch durch die Gutschriften für die wiederverwendeten NdFeB-Magneten überaus deutlich übertroffen werden. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Route 1 auf Laborergebnissen beruhen, die während des Projektes gewonnen wurden. Aus dem Kreis der MORE-Partner wurde gegen Projektende darauf hingewiesen, dass im Falle einer Motordemontage in einer semi-industriellen bzw. industriellen Anlage v.a. im Teilschritt Entmagnetisierung noch einfach zu erschließende und deutliche Optimierungspotenziale zur Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie durch den Infrarotstrahler bestehen (Optimierung der Einwirkungszone und -zeit der Infrarotstrahlung auf die NdFeB-Magnete). Die Ökobilanzergebnisse können daher auch vor diesem Hintergrund für die Route 1 als sehr robust eingeschätzt werden.

Ein weiteres interessantes und wichtiges Ergebnis ist, dass die Motorart – d.h. Motoren mit aufgeklebten oder vergrabenen Magneten – für die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Wiederverwendung von Magneten ist technisch möglich, wird zum Berichtszeitpunkt jedoch nicht praktiziert (vgl. Kapitel 4.5.2 bzw. entsprechende Design-Empfehlungen).

Route 2: Remelt

Das werkstoffliche Recycling von NdFeB-Magneten, d.h. der (anteilige) Einsatz von abgetrennten Sekundärmagneten zur Produktion neuer NdFeB-Magnete, zeigt ebenfalls eindeutig ökologische Vorteile, und zwar durchgehend in allen untersuchten Wirkungskategorien. Die Bilanz ist ökologisch vorteilhaft, obgleich lediglich 30 % Zumischung von Sekundärmaterial zur Produktion der neuen NdFeB-Magnete angesetzt wurde. Diese Zumischung ist aus Qualitätsgründen notwendig. Die Remanenzen solcher Magnete liegen ca. 3 % niedriger als von Magneten aus 100 % Primärmaterial und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist (vgl. Kapitel 4.4.1).

Route 3, Remat: Prozess 1 und 3

Im Rahmen der Arbeiten von MORE zum rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten wurden drei verschiedene Prozesse untersucht. Prozess 2 stellt einen Reaktionsweg dar, der sich im Laufe der Projektarbeiten überholt hat. Daher wurde auch auf eine Ökobilanzierung von Prozess 2 verzichtet. Prozess 1 produziert ein Mischoxid der Seltenen Erden (hauptsächlich Neodym und Dysprosium). Nach Prozess 3 werden nach einer Solventextraktionsstufe Neodymoxid und Dysprosiumoxid in sehr hoher Reinheit erhalten. Dieses Material wäre dafür geeignet über eine Schmelzflusselektrolyse zu Neodym- sowie Dysprosiummetall umgesetzt zu werden. Diese Metalle könnten dann direkt wieder zur Herstellung von NdFeB-Magneten eingesetzt werden. Prozess 3 stellt ohne Zweifel die ausgereifteste Verfahrensvariante des rohstofflichen Recyclings dar, welche im Rahmen von MORE entwickelt wurde (vgl. Kapitel 4.4.2). Auch für das rohstoffliche Recycling der NdFeB-Magnete zeigen sich im Vergleich zur Primärkette der SE-Oxide eindeutig ökologische Vorteile und zwar für alle Wirkungskategorien. Prozess 3 zeigt im Vergleich zu Prozess 1 (Produktion von SE-Mischoxiden) noch etwas bessere Ergebnisse und unterstreicht die Vorteilhaftigkeit dieses Weges.

Einschränkungen

Einschränkungen bzgl. der Datenqualität betreffen für alle Routen die Datenqualität der Primärdaten der SE sowie im Falle von Route 1 und Route 3 die Tatsache, dass die Prozessdaten auf Ergebnissen im Kleintechnikumsmaßstab (50 L Reaktoren) beruhen. Im Zuge von MORE konnten von PE International über Projektpartner exklusive Daten zur Primärherstellung von Neodym und Dysprosium erhalten werden. Die Schwierigkeiten bei der Erhebung von Sachbilanzdaten zur Primärherstellung der SE sind bekannt und mit der Tatsache verbunden, dass deutlich mehr als 90 % der SE in China gewonnen und verarbeitet werden (schwieriger Datenzugang, Quellen häufig nur in chinesischer Sprache usw.). In Gesprächen mit PE International konnten jedoch Unklarheiten zum Datensatz ausgeräumt und gegen Projektende ein aktualisierter Datensatz erhalten werden. Die Aktualisierung der SE-Primärdaten betraf vor allem die Aktualisierung der Daten nach der ökonomischen Allokation, was angesichts der starken Preisschwankungen bei SE eine große Rolle spielt. Die ökonomische Allokation, die für die Ökobilanzen in MORE zu Grunde gelegt wurde, basiert auf den Preisen von Sommer 2013. Eine weitere Einschränkung betrifft den Ansatz der End-of-Life-Allokation. Hier wurde die Methode gewählt, bei der die gebrauchten Magnete in die Bilanzierung als lastenfreier Input in das Recycling bzw. zur Wiederverwendung gehen.

Sensitivitätsanalysen

Bei allen Ökobilanzen zu allen drei Routen wurden für die Gutschriften der SE jeweils nach Massenallokation und nach ökonomischer Allokation gerechnet. Für beide Allokationsverfahren gibt es Gründe; letztlich ist diese Vorgehensweise als durchgängiger Sensitivitätsansatz zu verstehen. Durch die große Bandbreite der Sachbilanzdaten für die Primärrouten der SE zeigt sich eine große Bandbreite bei den Nettoergebnissen. Dabei stellen die Ergebnisse nach Massenallokation eindeutig die konservativen Varianten dar. Wichtig ist, dass alle Ökobilanzergebnisse nach beiden Allokationsverfahren richtungssicher sind; dies unterstreicht die Robustheit der Ökobilanzergebnisse von MORE und relativiert damit auch Datenunsicherheiten bei den SE-Primärdaten.

Eine weitere Sensitivitätsanalyse betraf nach Anregung des Critical Reviewers für Route 3 den Dysprosiumgehalt der generischen NdFeB-Magnetzusammensetzung. Statt 20 Gew.-% Neodym und 10 Gew.-% Dysprosium wurden in einer Sensitivitätsanalyse 26 Gew.-% Neodym und 4 Gew.-% Dysprosium angesetzt. Dies adressiert aktuelle Bemühungen der Industrie den notwendigen Dysprosiumgehalt in NdFeB-Magneten soweit als technisch vertretbar und möglich zu begrenzen. Erwartungsgemäß wurden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung im Falle der Massenallokation kaum beeinflusst. Im Falle der ökonomischen Allokation zeigten sich deutliche Veränderungen, da Dysprosium aufgrund seines hohen Preises besonders hohe Gutschriften liefert. Die Ökobilanz fiel in diesem Fall zwar weniger deutlich positiv aus, bewegte sich jedoch immer noch im eindeutig positiven Bereich im Sinne des Recyclings.

Schließlich wurde ebenfalls auf Anregung des Critical Reviewers für das Solventextraktionsmittel in Route 3, Prozess 3 eine Sensitivität hinsichtlich der Vorkette für diese spezielle Verbindung gerechnet. Im Ergebnis zeigte sich trotz ca. doppelt so hoher Vorkettenbelastung für diesen Hilfsstoff kein nennenswerter Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies unterstreicht ebenfalls die klare Robustheit der Ökobilanzergebnisse.

Fazit und Empfehlungen

Die ökologische Vorteilhaftigkeit aller Routen ist durch die Ökobilanzergebnisse nachgewiesen. Die Richtungssicherheit der jeweiligen Ergebnisse ist hoch. Die jeweilige Wahl des Verfahrens in der Praxis (Route 1, 2 oder 3) wird vom Verschmutzungsgrad der Magneten und der Marktnachfrage abhängen. Die Ergebnisse basieren (Ausnahme Route 2) 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 (Routen 1 bis 3) weiter zu entwickeln und möglichst zur industriellen Reife zu bringen.

4.5.2 AP 5.2 Untersuchung von Zweitmärkten für rezyklierte Produkte

Dieser Abschnitt bezieht sich auf die Möglichkeiten der Weiterverwendung von Produkten oder Produktteilen des Elektromotors in derselben Funktion (Wiederverwendung) oder in einer anderen Funktion (Weiterverwendung – entweder im Automobil oder in einer anderen nicht-automobilen Anwendung). Diese Art des Recyclings ist grundsätzlich mit geringem Aufbereitungsaufwand und entsprechend geringen Umweltlasten verbunden und steht deshalb in der Rangfolge der anzustrebenden Kreislaufstrategien weit vorne (lediglich die Strategie der Abfallvermeidung ist noch höher einzustufen).

Das zu betrachtende Produktspektrum kann von vornherein auf Magnete eingeschränkt werden, denn andere Komponenten eignen sich von vornherein wenig oder allenfalls in Nischenmärkten für eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung: So ist die Verwendung eines kompletten elektrischen Antriebsmotors eines Altfahrzeugs für andere Anwendungen, beispielsweise als Bootsmotor oder als Generator für kleine Windanlagen, allenfalls als Sonder- oder Behelfslösung im Versuchs- oder Prototypenstadium denkbar, nicht aber im größeren Maßstab, denn dafür ist die fahrzeugintegrierte Konstruktion der automobilen Elektromotoren zu speziell, zum Beispiel in Bezug auf die Gestaltung der Kühlung. Das gilt insbesondere für den getriebeintegrierten Elektromotor eines Hybridfahrzeugs.

Die direkte Wiederverwendung von Subkomponenten wie Kupferdraht oder Elektroblech (theoretisch denkbar wäre das Ausstanzen) ist nicht sinnvoll, da der Aufwand der zerstörungsfreien Extraktion, der Reinigung und der Qualitätskontrolle (bei Kupferlackdraht beispielsweise die Überprüfung des Isolationswiderstandes) in einem ungünstigen Verhältnis gegenüber der Verwendung von Neuteilen aus Sekundärrohstoffen steht.

Hingegen erscheint die Wiederverwendung von Magneten zunächst vielversprechender. Um das Potenzial der Magnete für ein zuverlässiges funktionales Recycling abschätzen zu können, ist es wichtig, zunächst die Alterung der Magnete zu bewerten. Hier ergaben Untersuchungen innerhalb des Projektes, dass die Magnete während des Betriebs durch motorische Belastungen nicht geschädigt werden (vgl. Kapitel 4.3.1). Eher treten mechanische Defekte während der Demontage oder bei den anschließenden Reinigungsprozessen auf.

Die direkte Wiederverwendung der Magnete in ihrer Funktion ist grundsätzlich möglich. Voraussetzung ist nach der Entnahme aus dem Rotor eine Reinigung der Magnete, zum Beispiel von Klebstoffresten. Selbstverständlich müssen die Magnete frei von Beschädigungen sein. Die Erfahrungen im Projekt haben gezeigt, dass ein gebrauchter Rotor zwar Rostspuren zeigen kann, die Magnete selbst aber nach der Reinigung weder Rot- noch Weißrost (ein Hinweis auf Eisenbeziehungsweise Selten-Erd-Korrosion) aufweisen. Die Magnete sind einerseits durch eine Beschichtung, zum Beispiel mit Nickel, vor Korrosion geschützt, und zum anderen wird die Neodym-Phase durch die Dotierung mit Kobalt stabilisiert.

Um Magnete einer direkten Wiederverwendung in allen möglichen Applikationen zugänglich zu machen, ist eine gewisse Standardisierung notwendig. Bei zu großer Variantenvielfalt besteht ansonsten die Gefahr, dass nur unzureichende Mengen an Altmagneten gesammelt werden, weil sich kaum Magnete des gleichen Typs finden.

Im Folgenden sollen die Chancen und Möglichkeiten einer Standardisierung diskutiert werden.

Versuche, Magnete zu vereinheitlichen, gab es bereits in den neunziger Jahren, die jedoch aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Kundenanfragen keine Durchsetzung fanden. Diese Feststellung hat insbesondere bei den getriebeintegrierten Motoren auch heute noch ihre Gültigkeit: Diese Motoren sind hoch integriert, an den Treibstrang der jeweiligen Hersteller angepasst und die Magnete spezifisch optimiert. Die einzelnen Hersteller arbeiten jedoch an einer modularen Elektromotoren-Bauweise (z.B. konstanter Durchmesser, Leistungsvariation nur durch Längenvariation). Bei den elektrischen Traktionsmotoren ist die Ausgangslage günstiger: Der Integrationsgrad der elektrischen Traktionsmotoren ist üblicherweise geringer, so dass hier eine Standardisierung, zumindest was die äußeren Abmessungen der Magnete betrifft, in Zukunft eher vorstellbar ist.

Vor allem ist aber auch der technologische Fortschritt zu beachten: In dem heute sehr dynamischen Umfeld ist eine längerfristige Standardisierung insbesondere mit Bezug auf die Zusammensetzung der Magnete nur schwer möglich bzw. würde den Fortschritt unter Umständen behindern.

Schließlich ist im Falle von Sintermagneten, die in Batch-Prozessen hergestellt werden, das Einsparpotenzial durch Skaleneffekte begrenzt.

Insgesamt bleibt also festzustellen, dass eine Standardisierung von Magneten heutzutage nicht möglich, aus Kosten- und Produktionssicht aber auch nicht unbedingt notwendig ist. In der Zukunft erscheint die Standardisierung der Abmessung bzw. der Geometrie von Magneten möglich, nicht aber die Standardisierung der Magnetgüte (chemische Zusammensetzung und Struktur). Nicht zu unterschätzen ist die Gefahr eines Vertauschens in der Sammlung und Produktion mit Altmagneten, wenn zwar die Abmessungen, nicht aber die Zusammensetzungen der Magnete vereinheitlicht sind.

Downcycling von Magneten

Die einfachste Form des Downcyclings von Magneten besteht darin, diese durch Abschleifen in kleinere, passende Magnete zu überführen, sofern der Ausgangsmagnet eine ausreichende Größe besitzt. Ein derartiger Prozess wird jedoch als nicht wirtschaftlich angesehen. So müsste jeder Altmagnet zunächst vermessen werden, und - sofern von ausreichender Größe - mittels eines Werkzeugs eingespannt werden, um die abtragende Bearbeitung vorzunehmen. Variierende Prozesszeiten (aufgrund der unterschiedlichen Magnetgrößen) und Schleifabfallmengen erschweren die Kalkulation des Verfahrens. Insgesamt wird diese Option als nicht zielführend angesehen.

Eine weitere Möglichkeit des Downcyclings bietet die Überführung gebrauchter Sintermagnete in kunststoffgebundene Magnete. Allerdings ist die Zusammensetzung der Sintermagnete nach Aussage des Projektpartners Vacuumschmelze nicht für den HDDR-Prozess geeignet. Letzterer findet Anwendung bei Magnetpulvern für hochwertige kunststoffgebundene Magnete.

Ein potentiell interessanter Markt für die Wiederverwendung von Magneten sind Windkraftanlagen. Getriebelose Generatoren mit Selten-Erd-Permanentmagneten finden sich vor allem im off-shore Einsatz, da die Rotorengondel etwa 50 % leichter gebaut werden kann. Der derzeitige Magnetbedarf beträgt dort etwa 500 kg NdFeB pro MW. Im on-shore Einsatz überwiegen hingegen Asynchron-Generatoren mit Getriebe, die nicht auf Permanentmagnete angewiesen sind.

Offensichtlich können Magnete aus automobilen E-Motoren wegen Volumen und Geometrie nicht ohne weiteres in Windkraftanlagen verwendet werden. Zudem haben Windkraftanlagen hohe Anforderungen an die Magnetqualität. Wichtig ist insbesondere eine geringe Schwankung der Materialeigenschaften, insbesondere der Remanenz, um möglichst „sauberen Strom“, d.h. mit möglichst konstanter Frequenz, zu erzeugen.

Gegenwärtig findet ein ReUse von Magneten aus Windkraftanlagen jedoch nicht statt. Anstelle dessen wird üblicherweise im Zuge des so genannten „Re-Powerings“ (also der Neuinstallation einer

leistungsfähigeren Anlage auf einem Standort) die gesamte Altanlage abgebaut und an einem neuen (teilweise ertragsschwächeren) Standort, zum Beispiel in Osteuropa, wieder aufgebaut. Es findet also kein ReUse der Magnete, sondern ein ReUse der gesamten Windkraftanlage statt. Generell lässt sich sagen, dass es erheblich leichter ist, einen Kunden für ein gebrauchtes Gesamtsystem zu finden als für rezyklierte Subkomponenten wie z.B. Magnete.

Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet gebrauchter Magnete ist die „weiße Ware“, also Haushaltsgeräte. Bei den meisten Haushaltsgeräten ist der Bauraum allerdings nicht so beengt wie in einem Fahrzeug. Viele Anwendungen benötigen deshalb nicht zwingend Elektromotoren mit hoher Leistungsdichte und demzufolge nicht unbedingt NdFeB-Magnete. In vielen Fällen kommen kostengünstige Asynchronmaschinen zum Einsatz (z.B. Waschmaschinen). Ausnahmen bilden Werkzeuge wie zum Beispiel Akkuschauber oder Bohrer.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die direkte Wiederverwendung gebrauchter Magnete nicht sinnvoll ist. Ausschlaggebend dafür ist nicht etwa eine unzureichende Leistung der Altmagnete, denn diese bleibt über das Produktleben erhalten, sondern in erster Linie die Vielfalt an Spezifikationen, was Geometrie und Leistungsprofil der Magnete in Zweitmärkten betrifft. Der damit verbundene Aufwand in Lagerhaltung und Logistik in Kombination mit der (noch) schwachen Nachfrage aus Zweitmärkten steht in einem ungünstigen Verhältnis zum erzielbaren Nutzen.

In Deutschland ist noch kein Rücknahmesystem für Magnetschrott etabliert. Vor allem die Lohnkosten stellen für die Sammlung den Haupthindernisgrund dar. Entsprechende Geräte oder Motoren landen zu großen Anteilen in Fernost oder in Afrika, wo sie dem direkten Zugriff entzogen sind.

4.5.3 AP 5.3 Gewinn an Versorgungssicherheit

Im Mai 2014 wurde der „Report on critical raw materials for the EU“ aus dem Jahre 2010 aktualisiert. In diesem neuen Bericht der „Ad hoc Working Group on defining critical raw materials“ wird bei den Seltenen Erden zwischen Schweren und Leichten Seltenen Erden unterschieden. In Abbildung 67 ist dargestellt, dass bei ähnlicher wirtschaftlicher Bedeutung dieser beiden Gruppen beim Versorgungsrisiko die Schweren Seltenen Erden deutlich über den Leichten Seltenen Erden liegen.

Das Versorgungsrisiko einzelner Rohstoffe berechnet sich nicht primär aus der absoluten geologischen Verfügbarkeit der notwendigen Erze. Vielmehr spielen die ungleichmäßige Verteilung der bekannten Rohstoffvorkommen sowie ökonomische und politische Aspekte eine Rolle. Des Weiteren ist es wichtig, in welchem Umfang der Rohstoffbedarf durch sekundäre Quellen gedeckt wird und welche möglichen Substitute für einen bestimmten Rohstoff in einer bestimmten Anwendung zur Verfügung stehen. Deshalb wurde das Versorgungsrisiko als die Kombination dieser Elemente eingeschätzt, nämlich:

- Die Konzentration der Förderung auf Länderebene (auf der Basis von Produktionsdaten, angelehnt an den Herfindahl-Hirschmann-Index)
- Die Stabilität und Staatsführung der Förderländer (abgeschätzt über den World Governance Index der Weltbank)
- Anteil des Recycling zur Deckung des heutigen Bedarfs
- Möglichkeiten der Substitution (durch Experteneinschätzungen)

Diese vier Elemente wurden wie unten dargestellt zusammengeführt, um einen Index zu bilden, mit dessen Hilfe alle betrachteten Rohstoffe möglichst fair und transparent miteinander verglichen werden konnten.

$$\text{Versorgungsrisiko} = (1 - \rho_i) \left\{ \sum_s A_{is} \sigma_{is} \right\} \left\{ \sum_c (S_{ic})^2 WGI_c \right\}$$

- ρ_i Anteil am heutigen Bedarf, das aus Sekundärmaterial gedeckt wird (Recycling von Produktionsabfällen, sog. *new scrap*, wird nicht berücksichtigt) – Werte von 0 bis 1
- A_{is} Anteiliger Bedarf von Rohstoff *i* in Wirtschaftssektor *s* – Werte von 0 bis 1
- σ_{is} Geschätzte Substituierbarkeit von Rohstoff *i* in Wirtschaftssektor *s* – Werte 0 bis 1; ein Wert von 0 signalisiert dabei eine vollständige Substituierbarkeit ohne Mehrkosten
- S_{ic} Anteiliger Produktion von Rohstoff *i* in Land *c* – Werte von 0 bis 100
- WGI_c Der World Governance Index für Land *c* beinhaltet die sechs Indikatoren „Mitspracherecht und Verantwortlichkeit“, „politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt“, „Leistungsfähigkeit der Regierung“, „staatliche Ordnungspolitik“, „Rechtsstaatlichkeit“ und „Korruptionskontrolle“. Werte von 0 bis 10 (linear skaliert von den ursprünglichen Werten); von 0 bis 10 verschlechtert sich das Rating der Weltbank

Entsprechend der Formel würde eine Erhöhung der Recyclingquote auf 50 % das Versorgungsrisiko halbieren, ein 100 %iges Recycling das Versorgungsrisiko auf Null reduzieren.

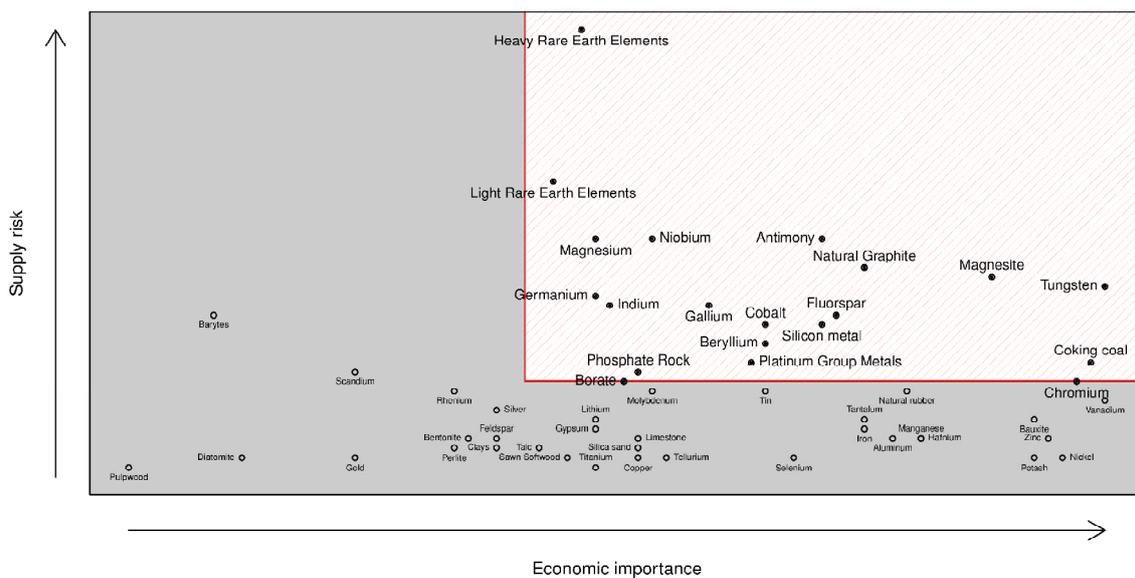


Abbildung 67: Positionierung der kritischen Rohstoffe nach Versorgungsrisiko und wirtschaftlicher Bedeutung

4.6 AP 6 Entwurf zukunftsfähiger Kreislaufwirtschaftsstrukturen

4.6.1 AP 6.1 Ganzheitliches Recyclingkonzept

Aufgabe dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines ganzheitlichen Recyclingkonzepts für Elektromotoren am Ende des Ersteinsatzes. Aufgrund der Ergebnisse der Arbeitspakete 3, 4 und 5 wurde das Materialrecycling als der vielversprechendste Weg für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgewählt, denn die Resultate der Demontageversuche sowie die Ergebnisse aus der Suche nach Zweitmärkten schließen eine direkte Wiederverwendung (ReUse) praktisch aus. Zur Entwicklung des ganzheitlichen Recyclingkonzepts wurden neben den Aufbereitungsverfahren auch die entsprechenden Demontage- und Logistikketten betrachtet. Diese bilden eine Voraussetzung für ein erfolgreiches Recycling.

Der Fokus in diesem Arbeitspaket richtet sich auf die wirtschaftliche Umsetzbarkeit des favorisierten Recyclingpfades. Das werkstoffliche Recycling (Route 2) stellt hohe Anforderungen an die Sortenreinheit und die Sauberkeit der eingesetzten Magnete. Weiterhin liegen aus Gründen der Geheimhaltung keine detaillierten Kosten vor. Die Prozesskosten bei werkstofflichen Recycling (Wasserstoffversprödung, Mahlen, Sintern und Nachbearbeitung) unterscheiden sich nicht wesentlich von den Kosten bei der Primärproduktion. Die größten Unterschiede sind bedingt durch die geringeren Materialkosten durch die Verwendung von Sekundärmaterialien. Daher wird das rohstoffliche Magnetaufbereitungsverfahren (Route 3) favorisiert und die Kosten der Demontage- und Logistikketten dieses Verfahrens nachfolgend untersucht. Die Kostenabschätzungen erfolgten auf Grundlage der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 5.

Es handelt sich dabei um Berechnungen, die auf Informationen beruhen, die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung vorlagen. Die Berechnungen basieren auf Annahmen, die großen Schwankungen unterliegen können. Diese sind neben der Entwicklung der Elektromobilität auch die Selten-Erd-Preise. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen werden die Auswirkungen der schwankungsanfälligen Parameter auf die Kosten abgeschätzt.

Marktanalyse

Am Beginn der Entwicklung des ganzheitlichen Recyclingkonzeptes stand zunächst eine Marktanalyse zur Ermittlung der in Zukunft für das Recycling zur Verfügung stehenden Menge an Magnetmaterial und den damit verbundenen Erlösen. Die Erlöse wurden sowohl mit heutigen innerchinesischen Preisen als auch den Weltmarktpreisen für Seltene Erden berechnet, um möglichst robuste Ergebnisse zu erhalten und gleichzeitig die Schwankungsbreite aufzuzeigen. In Abbildung 68 ist die Vorgehensweise zur Berechnung der zukünftig für das Recycling zur Verfügung stehenden Magnetmenge schematisch dargestellt.

Grundlage der Berechnungen bildet das GLOMO Modell des Projektpartners Fraunhofer ISI. Dieses prognostiziert die Anzahl an Elektrofahrzeugen, die zwischen 2012 und 2030 in Europa auf den Markt kommen werden. Es wird darin unterschieden in reine Elektrofahrzeuge (BEV), Hybridfahrzeuge (Hybrid), Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) und Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV). Abbildung 69 zeigt die prognostizierte Anzahl an Elektrofahrzeug-Neuzulassungen pro Jahr nach diesem Modell.

Die prognostizierte Anzahl an Elektrofahrzeugen wird am Ende ihres Lebenszyklus dem Recycling zur Verfügung stehen. Als durchschnittliche Lebensdauer wird von 15 Jahren ausgegangen. Bei der daraus resultierenden Menge an Fahrzeugen wird davon ausgegangen, dass durchschnittlich 32,4 % den Betrachtungsraum Europäische Union verlassen werden. Die auf diese Weise berechnete Anzahl an Rückläufer-Fahrzeugen ist in Abbildung 70 dargestellt.

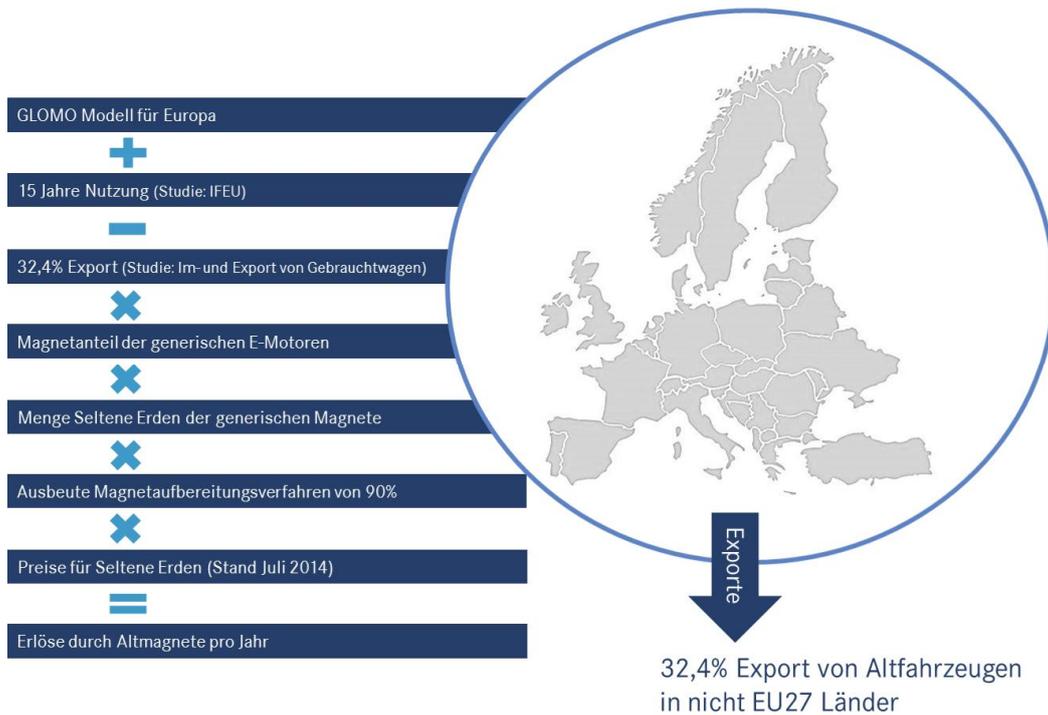


Abbildung 68: Berechnung Rückläuferfahrzeuge

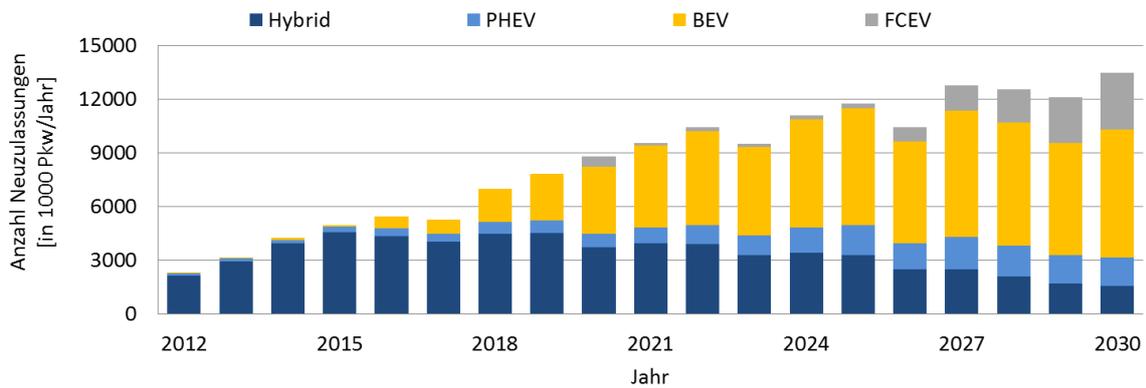


Abbildung 69: Prognostizierte Anzahl an Elektrofahrzeug-Neuzulassungen pro Jahr

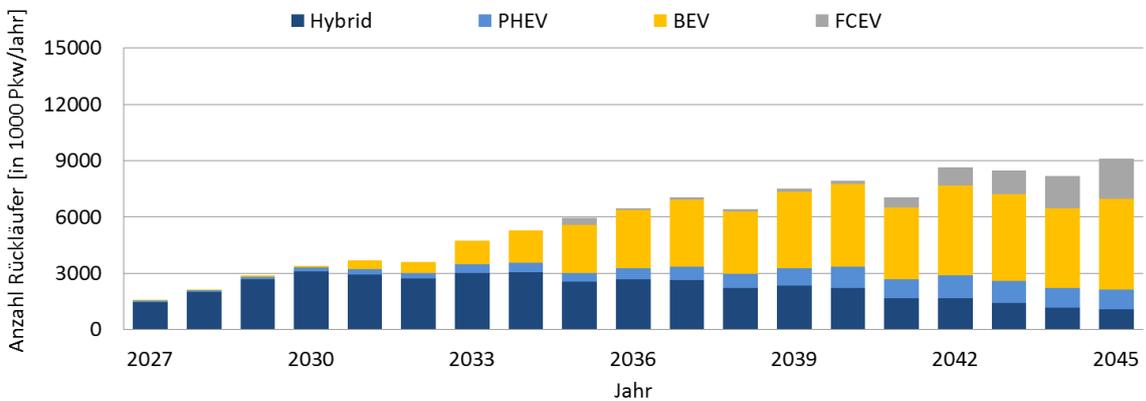


Abbildung 70: Prognostizierte Anzahl an Rückläufern

Für die Berechnung der zur Verfügung stehenden Magnetmenge wurde angenommen, dass die reinen Elektrofahrzeuge, die Plug-In-Hybridfahrzeuge und die Brennstoffzellenfahrzeuge einen 80 kW-Motor (SPM) benötigen. Bei reinen Elektrofahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen werden jedoch nur in 25 % der Elektromotoren Permanentmagnete eingesetzt. Ein 20 kW-Motor (IPM) kommt in den Hybridfahrzeugen zum Einsatz. Zur genaueren Betrachtung der Elektromotoren wurden im Rahmen des Projektes zwei generische Motoren festgelegt. Die Werkstoffzusammensetzung der beiden Motoren ist in Tabelle 16 aufgeführt. Die für das Recycling zur Verfügung stehende Menge an Magnetmaterial ist in Abbildung 71 für den Zeitraum von 2027 bis 2045 dargestellt.

Tabelle 16: Werkstoffzusammensetzung der generischen Elektromotoren

Material	SPM-Motor mit 80kw Leistung [in kg]	IPM-Motor mit 20kw Leistung [in kg]
Stahl	34,8	23,1
Aluminium	14,1	4,7
Magnet	2,1	1,4
Grauguss	3,0	0
Kupfer	8,5	6,4
Polymere	0	0,6
Elastomere	0	0,1
Flüssigkeiten	0	7,7
Gesamt	62,5	44,0

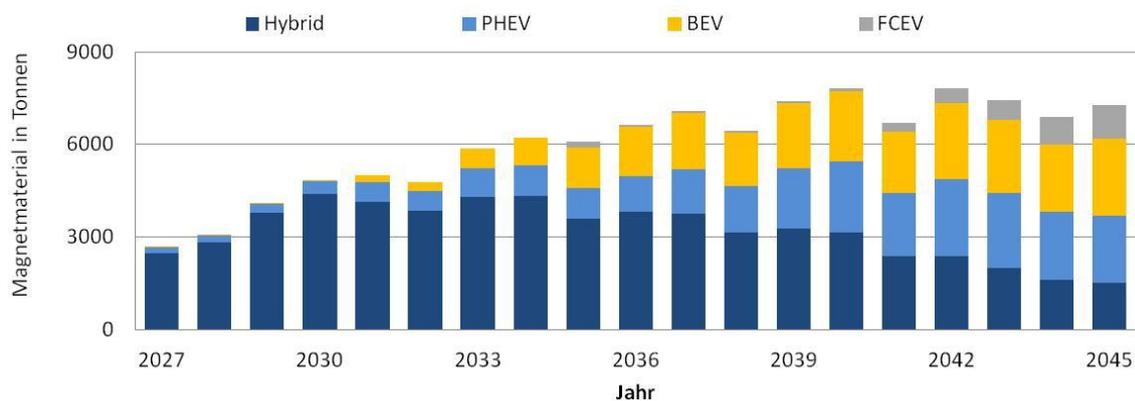


Abbildung 71: Prognostizierte Menge an Magnetmaterial für das Recycling

Wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, werden beim rohstofflichen Recyclingverfahren Selten-Erd-Oxide aus den Altmagneten separiert. Daher dienen die Preise für Selten-Erd-Oxide als Grundlage für die Bestimmung der zukünftig möglichen Erlöse. Außerdem wurde für die folgende Berechnung die Ausbeute von 90 % für das Magnetaufbereitungsverfahren mitberücksichtigt.

Die prognostizierte Menge an Magnetmaterial wurde genutzt, um die in Zukunft möglichen Erlöse zu berechnen. Dabei wurden sowohl innerchinesische Preise als auch Weltmarktpreise vom Juli 2014 für Neodym-Oxid (35 €/kg bzw. 49 €/kg) und Dysprosium-Oxid (170 €/kg bzw. 238 €/kg) herangezogen. Es wurde davon ausgegangen, dass in Zukunft der Anteil des deutlich teureren Dysprosiums reduziert bzw. dieses nicht mehr benötigt wird. Daher wurden die folgenden Szenarien betrachtet:

- **Szenario 1:** 10 % Dysprosium, 20 % Neodym (Dy10Nd20)
- **Szenario 2:** 5 % Dysprosium, 25 % Neodym (Dy5Nd25)
- **Szenario 3:** 0 % Dysprosium, 30 % Neodym (Dy0Nd30)

Für die Berechnung der Erlöse pro Magnet wurden zudem die Massenunterschiede zwischen Selten-Erd-Metallen und Selten-Erd-Oxiden mitberücksichtigt. Die Oxidation der Selten-Erd-Metalle zu Selten-Erd-Oxiden führt zu einem Massenzuwachs durch die zusätzlichen Sauerstoffatome. Zwischen Neodym und Neodym-Oxid beträgt dieser Faktor 1,166 und zwischen Dysprosium und Dysprosium-Oxid beträgt der Faktor 1,148. In Abbildung 72 sind die so errechneten Erlöse für China (Primärachse) und den Weltmarkt (Sekundärachse) in Millionen Euro pro Jahr für den Zeitraum von 2027 bis 2045 dargestellt.

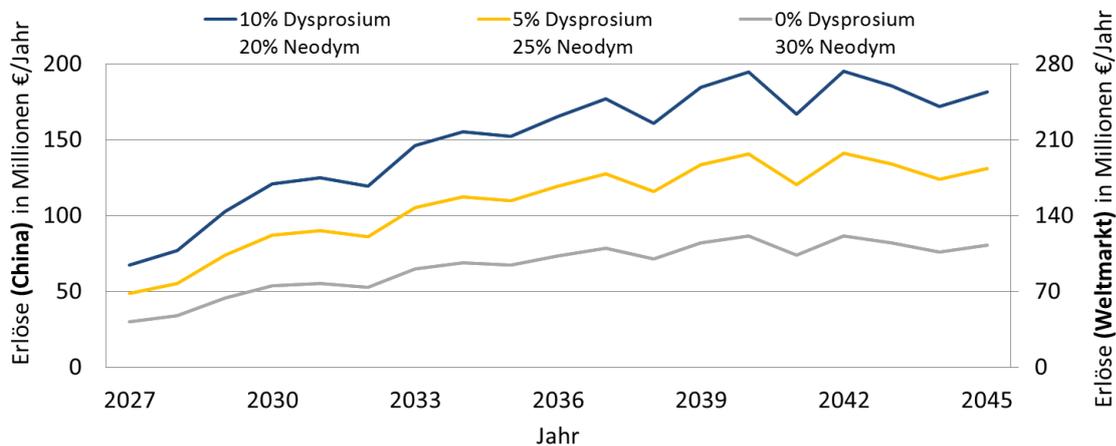


Abbildung 72: Mögliche Erlöse durch SE-Oxid in Millionen € pro Jahr

Neben den Erlösen für die Magnete wurden zusätzlich die Erlöse für die restlichen im Elektromotor verwendeten Metalle und das System Pkw genauer betrachtet. Im Wesentlichen steht der Altfahrzeugverwerter bei der Verwertung von Pkws vor der Entscheidung, wie wirtschaftlich die einzelnen Demontageschritte sind. Dabei steht der Materialerlös immer 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. Mögliche Erlöse wichtiger Metallfraktionen und eines durchschnittlichen Pkws sind in Tabelle 17 aufgeführt. Die Erlöse eines beliebigen Bauteils stehen daher nicht nur den aufgebrachtten Demontagekosten gegenüber, sondern auch den Opportunitätskosten der entsprechenden Menge an Pkw-Schrott.

Tabelle 17: Erlöse Pkw-Schrott und Metalle in Euro pro Kilogramm

Material	Schrottwert [in €/kg]
Kupfer	4
Aluminium	1
Stahl	0,14
Magnesium	2
Pkw-Schrott	0,17

Demontage- und Logistikkette

Die Demontage der Magnete aus dem Fahrzeug besteht aus verschiedenen Demontageschritten, für die unterschiedliche Demontagearten in Frage kommen. Diese wurden im AP 3 genauer untersucht (vgl. Kapitel 4.3.3). In diesem Abschnitt erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der möglichen Demontageschritte und der damit verbundenen Transportkosten. Abbildung 73 zeigt eine schematische Auflistung der betrachteten Demontage- und Logistikketten. Für die Durchführung der einzelnen Demontageschritte kommen die folgenden Szenarien in Frage:

- Dezentrale Demontage (Altfahrzeugverwerter)
- Zentrale Demontage (automatisierte Anlage)

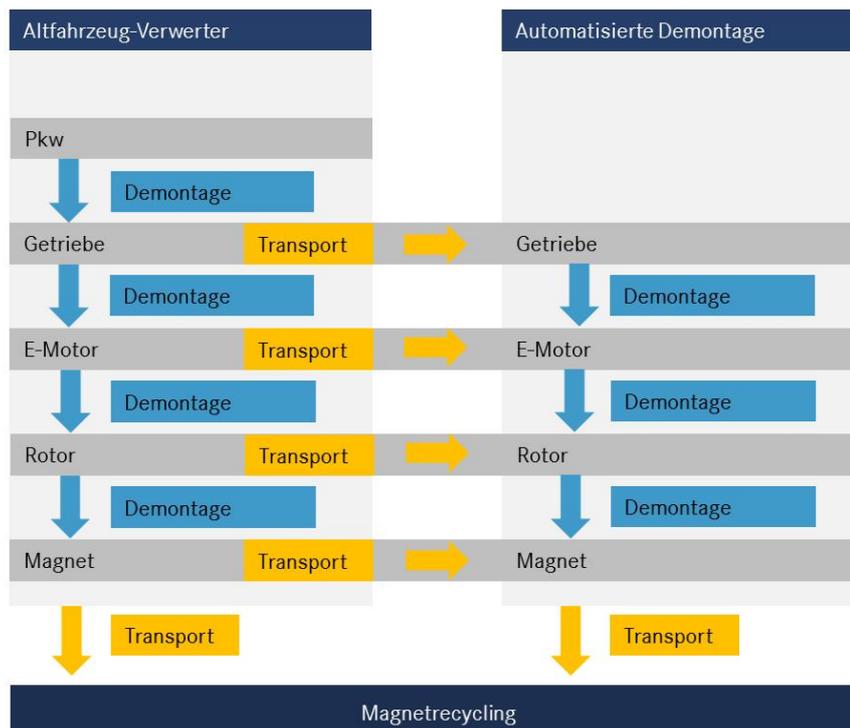


Abbildung 73: Mögliche Demontage- und Logistikketten

Am Anfang der Demontage- und Logistikkette steht immer der Altfahrzeugverwerter. Dieser demontiert den Elektromotor bzw. das Hybrid-Getriebe (mit integriertem Elektromotor). Für die anschließenden Demontageschritte sind auch andere Demontageakteure denkbar, die durch eine Spezialisierung Kostenvorteile erzielen können. Im Rahmen des Projekts wurde die automatisierte Demontage von Elektromotoren genauer betrachtet. Die niedrigeren Demontagekosten stehen dann den zusätzlichen Transportkosten gegenüber.

Demontagekosten

Die Demontagekosten setzen sich zusammen aus dem Produkt aus Demontagezeiten und den Personalkosten. Alle weiteren Kosten zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft sind in der Betrachtung vernachlässigt.

Grundlage für die Bestimmung der Personalkosten bildet der Mindestlohn für die Abfallwirtschaft des Deutschen Gewerkschaftsbunds. Zusätzlich zum Bruttolohn fallen Lohnnebenkosten an. Die zusätzlich anfallenden Kosten werden unter Overhead-Kosten zusammengefasst. Die so berechneten Gesamtkosten (vgl. Tabelle 18) wurden mit Demontagebetrieben diskutiert und verifiziert.

Die Demontagezeiten einer automatisierten Anlage (zentrale Demontage) und eines Altfahrzeugverwerter (dezentrale Demontage) für die zu demontierenden Komponenten sind in Tabelle 19 aufgeführt. Dabei werden die Demontagezeiten für den IPM-Motor und den SPM-Motor aufgeführt. Da es sich bei dem IPM-Motor um einen getriebeintegrierten Hybridmotor handelt, wird der Ausbau des Getriebes mit betrachtet.

Tabelle 18: Personalkosten

	Kosten [in €]	Annahme
Personalkosten gesamt	8,68	DGB, Mindestlohn Abfallwirtschaft
Lohnnebenkosten	1,67	http://www.brutto-netto-rechner.info
Overhead	31,1	Abschätzung (3 mal gesamte Lohnkosten)
Gesamt	41,40	

Tabelle 19: Demontagezeiten für E-Motor Komponenten

Demontageart	Dezentrale Demontage		Zentrale Demontage	
	IPM	SPM	IPM	SPM
Motortyp				
Demontage Getriebe/Elektromotor [in min]	20,5	20,5	-	-
Demontage Hybridmotor [in min]	12	-	5	-
Demontage Rotor [in min]	0	4,5	0	2
Demontage Magnete [in min]	15	36	2	5

Eine zentrale Demontage hat neben deutlich kürzeren Demontagezeiten aufgrund spezialisierter Trennverfahren auch den Vorteil, dass die Entmagnetisierung der Magnete in einem automatisierten Prozess deutlich schneller verläuft.

Transportkosten

Die Transportkosten werden wesentlich durch die Entfernung der zentralen Demontageanlage zu den Altfahrzeugverwertern bestimmt. Die Anzahl und die Wirtschaftlichkeit der zentralen Demontageanlagen hängen vor allem von der zu erwartenden Menge an Elektromotoren ab. Die im Projekt konzipierten automatisierten Demontageanlagen können ebenfalls bei existierenden Altfahrzeugverwertern installiert werden. Für das ganzheitliche Recyclingkonzept wurde eine Transportlogistik festgelegt, welche in Abbildung 74 dargestellt ist. Diese dient zur Ermittlung der durchschnittlichen Entfernungen zwischen Altfahrzeugverwerter und einer zentralen Demontageanlage sowie der Entfernung zwischen der zentralen Demontageanlagen und einer Magnetaufbereitungsanlage.

Es wurde angenommen, dass die Entfernung zwischen den Altfahrzeugverwertern und einer zentralen Demontageanlage im Durchschnitt ca. 500 km beträgt. Unter der Annahme, dass für den Betrachtungsraum Europa zunächst nur eine Magnetaufbereitungsanlage existiert, resultiert eine durchschnittliche Entfernung zu den zentralen Demontageanlagen von ca. 1500 km. Tabelle 20 zeigt die Transportkosten für die betrachteten Entfernungen in Euro pro Kilogramm.

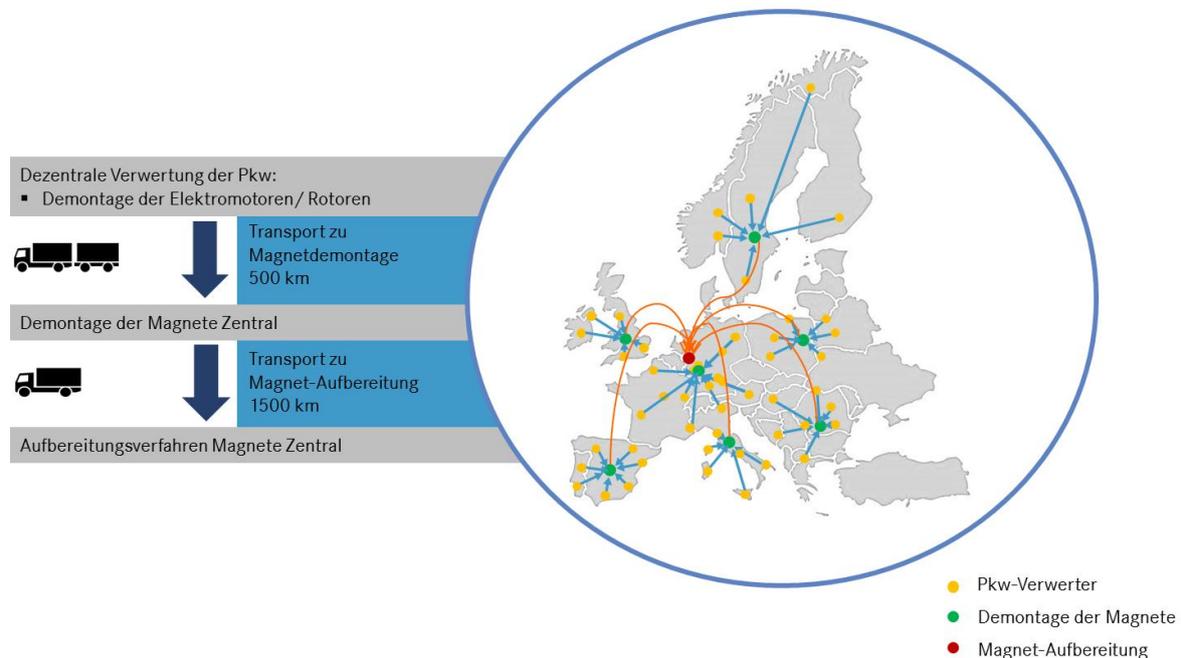


Abbildung 74: Transportlogistik

Tabelle 20: Transportkosten

	Entfernung [in km]	Kosten [bei 500kg]	Kosten [pro kg]
Getriebe, E-Motor, Rotor	500	160	0,32
Magnet	1500	210	0,42

Vergleich möglicher Demontage- und Logistikketten

Die entstehenden Kosten der betrachteten Demontage- und Logistikketten werden in diesem Abschnitt genauer analysiert und gegenübergestellt. Dabei werden die Kosten für den SPM-Motor und den IPM-Motor getrennt betrachtet. Darüber hinaus dienen Sensitivitätsanalysen zur Überprüfung der Ergebnissicherheit.

IPM-Motor

In Abbildung 75 sind die Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den IPM-Motor dargestellt. Dabei werden die folgenden Szenarien betrachtet:

- **Szenario 1:** Die Demontage findet ausschließlich beim Altfahrzeugverwerter statt mit anschließendem Transport der Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage.
- **Szenario 2:** Die Demontage des Getriebes, des Elektromotors und die Trennung von Rotor und Stator erfolgt beim Altfahrzeugverwerter. Der Rotor wird zur zentralen Demontageanlage transportiert und demontiert. Anschließend erfolgt der Transport der Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage.
- **Szenario 3:** Die Demontage des Getriebes und des Elektromotors erfolgt beim Altfahrzeugverwerter und die Trennung von Rotor und Stator sowie die Demontage bis zu den Magneten finden bei der zentralen Demontageanlage statt. Anschließend werden die Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage transportiert.
- **Szenario 4:** Die Demontage des Getriebes erfolgt beim Altfahrzeugverwerter und wird anschließend zur zentralen Demontageanlage transportiert. Alle weiteren Demontageschritte bis zu den Magneten erfolgen zentral. Die Magnete werden zur Magnetaufbereitungsanlage transportiert.

Es wird deutlich, dass die Gesamtkosten für Szenario 2 am niedrigsten sind. Die Demontagekosten betragen bei diesem Szenario insgesamt 24 € und die Transportkosten 4 €. Gegenüber Szenario 1 können insgesamt ca. 6 €, gegenüber Szenario 3 können insgesamt ca. 8 € eingespart werden. Die zentrale Demontage des Getriebes ist aufgrund der hohen Transportkosten deutlich zu kostspielig.

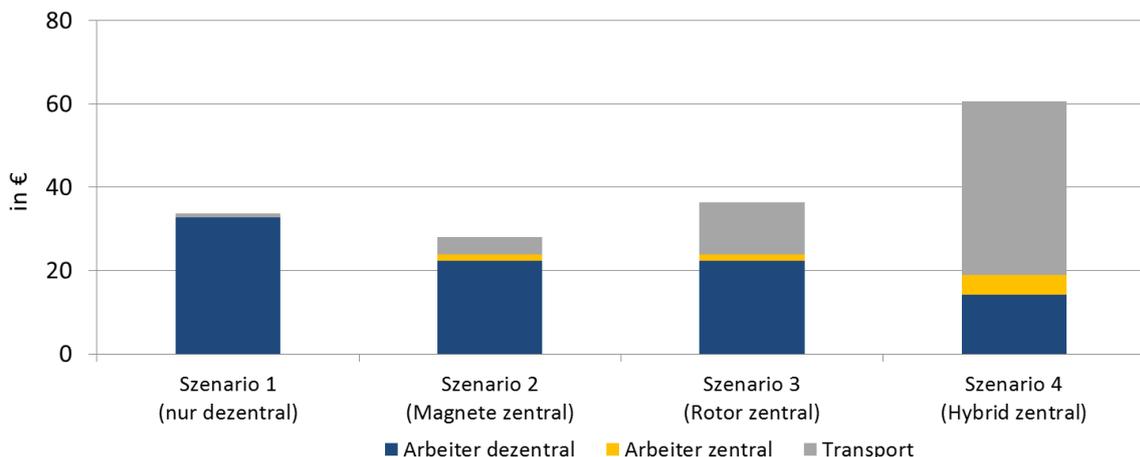


Abbildung 75: Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den IPM-Motor

SPM-Motor :

In Abbildung 76 sind die Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den SPM-Motor dargestellt. Dabei werden die folgenden Szenarien betrachtet:

- **Szenario 1:** Die Demontage findet ausschließlich beim Altfahrzeugverwerter statt mit anschließendem Transport der Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage.

- **Szenario 2:** Die Demontage des Elektromotors und die Trennung von Rotor und Stator erfolgt beim Altfahrzeugverwerter. Der Rotor wird zur zentralen Demontageanlage transportiert und demontiert. Anschließend erfolgt der Transport der Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage.
- **Szenario 3:** Die Demontage des Elektromotors erfolgt beim Altfahrzeugverwerter und wird anschließend zur zentralen Demontageanlage transportiert. Die Trennung von Rotor und Stator sowie die Demontage bis zu den Magneten finden bei der zentralen Demontageanlage statt. Anschließend werden die Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage transportiert.

Wie beim IPM-Motor wird bei der Betrachtung der verschiedenen Demontage- und Logistikketten beim SPM-Motor deutlich, dass eine zentrale Demontage der Magnete Kostenvorteile birgt. Gegenüber Szenario 1 entsteht ein Kostenvorteil von 11 € und gegenüber Szenario 3 können insgesamt 9 € eingespart werden.

Die Vorteile der zentralen Demontage gegenüber der dezentralen Demontage sind bedingt durch die sehr spezifische Bauweise der Elektromotoren und der damit verbundenen Aufwände zur Trennung der Magnete vom Rotor. Wie in Kapitel 4.3.4 aufgezeigt, können durch die Verwendung von Spezialwerkzeugen die Demontageaufwände deutlich reduziert werden. Zudem kann durch die spezialisierte Handhabung der Magnete im magnetischen Zustand erheblich Zeit eingespart werden. Die zentrale Demontageanlage sieht daher auch eine automatisierte Entmagnetisierung der Magnete vor. Diese erzeugt gegenüber einer notwendigen Entmagnetisierung bei einem dezentralen Demontagebetrieb weitere Kostenvorteile.

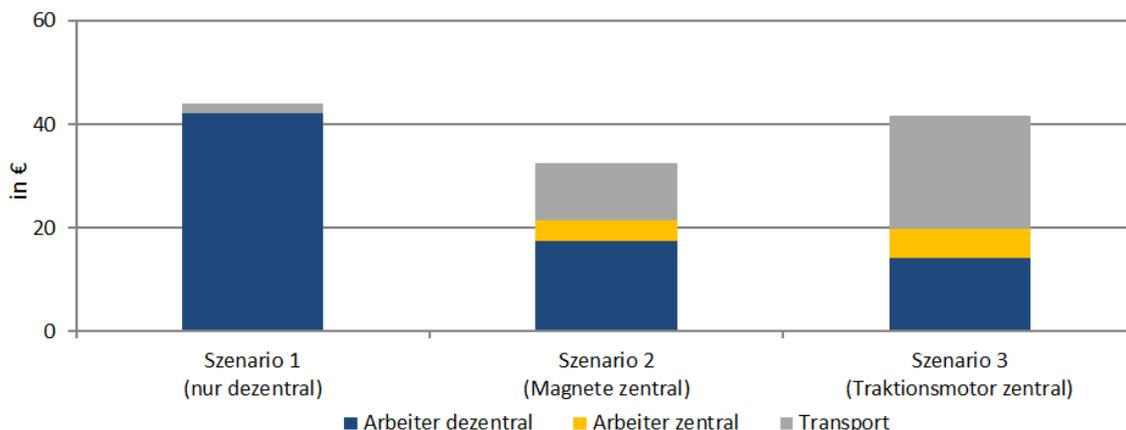


Abbildung 76: Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den SPM-Motor

Sensitivitätsanalysen:

Die Ergebnisse für die bevorzugte Demontage- und Logistikkette hängen von verschiedenen Parametern ab, die sich über die Zeit ändern können. Änderungen können sich vor allem bei den Personal- und Transportkosten ergeben. Zur Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse wurden daher Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Es wurden für die Demontage- und Logistikketten des IPM- und des SPM-Motors zwei Szenarien gerechnet. Zum einen wurden die Personalkosten verdoppelt und zum anderen wurden Transportkosten aus einer alternativen Quelle herangezogen. In Abbildung 77 und in Abbildung 78 werden die Sensitivitätsanalysen dem Ausgangsszenario gegenübergestellt. Für den IPM- und den SPM-Motor wird deutlich, dass Szenario 2 auch bei höheren Personalkosten bzw. bei alternativen Transportkosten die kostengünstigste Variante darstellt.

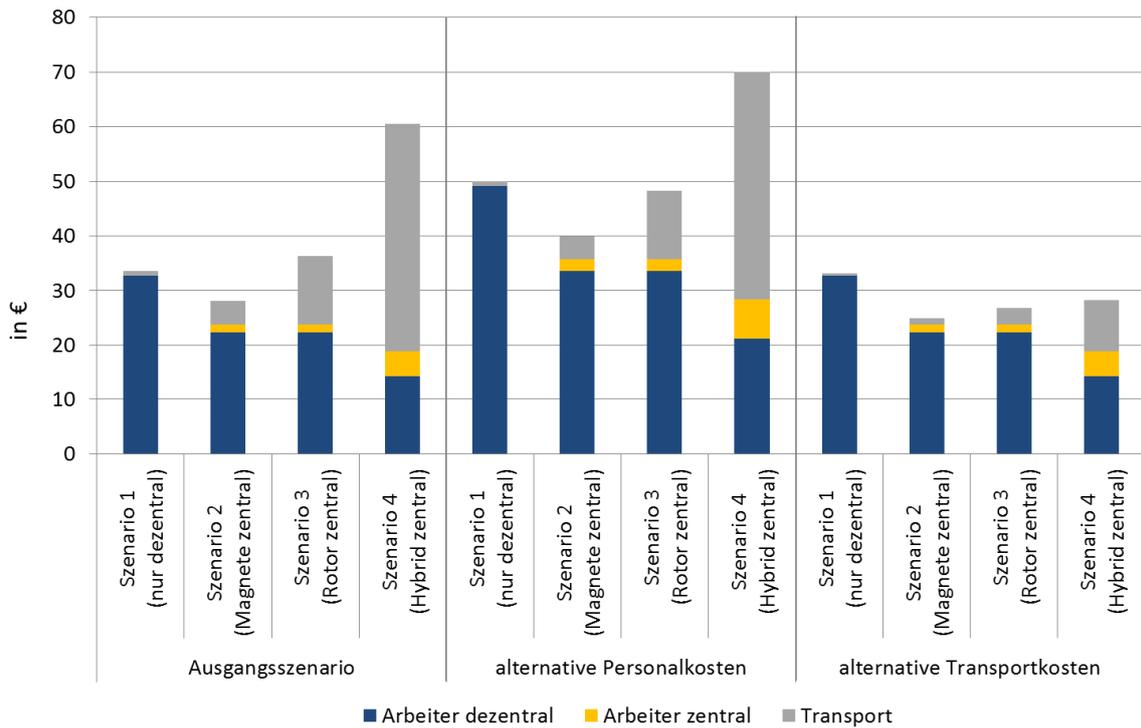


Abbildung 77: Demontage- und Logistikketten für den IPM-Motor (Sensitivitätsanalysen)

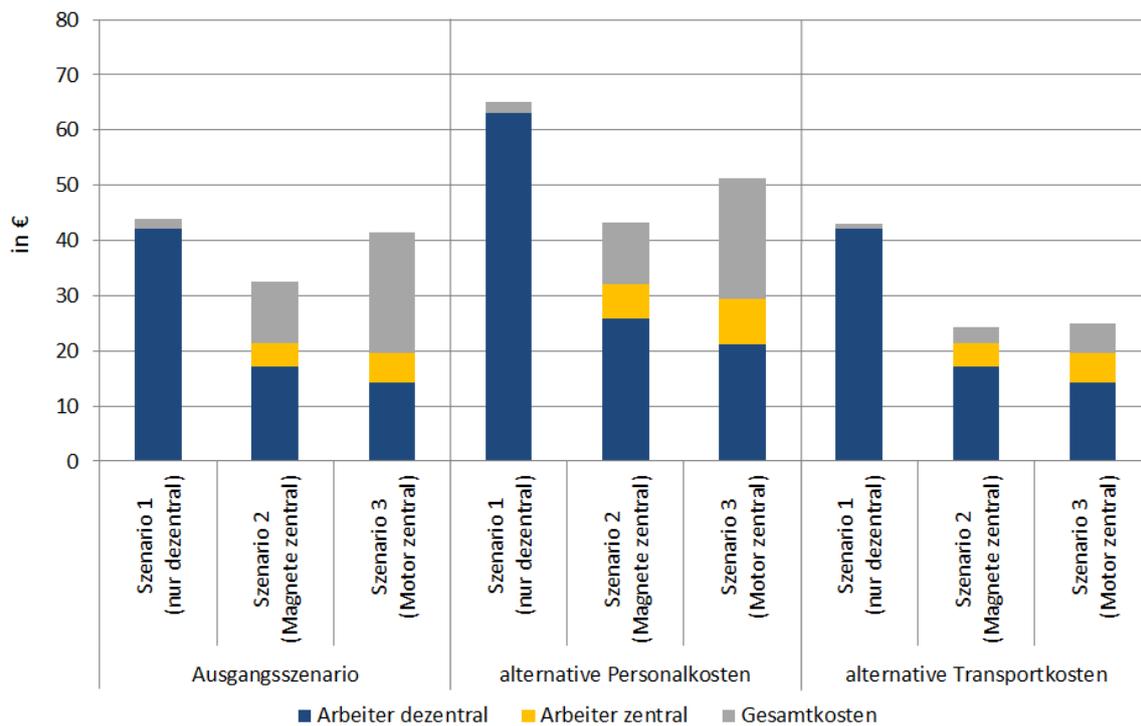


Abbildung 78: Demontage- und Logistikketten für den SPM-Motor (Sensitivitätsanalysen)

Detaillierte Betrachtung der bevorzugten Demontage- und Logistikkette (Szenario 2)

Die Demontage ist nur wirtschaftlich, wenn für den Demontagebetrieb jeder einzelne Demontageschritt wirtschaftlich ist. Daher erfolgte eine genauere Betrachtung der einzelnen Demontageschritte der bevorzugten Demontage- und Logistikkette.

IPM-Motor

In Abbildung 79 werden die Demontagekosten den Erlösen für die Demontage des Getriebes und die Demontage von Rotor und Stator gegenübergestellt. Die Erlöse setzen sich dabei zusammen aus den Erlösen der demontierten Metallfraktionen abzüglich der Opportunitätskosten durch die Verringerung der Pkw-Gesamtmasse.

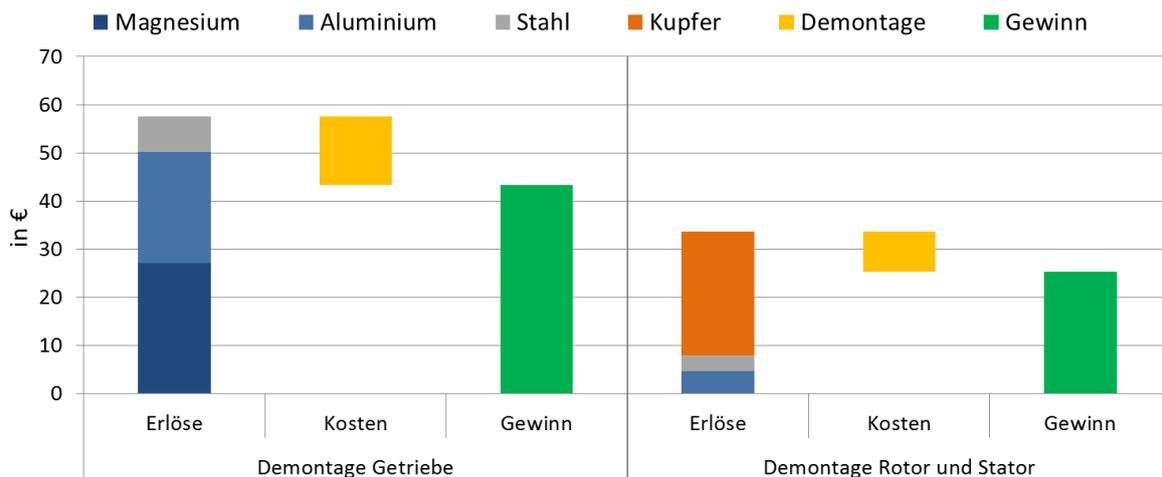


Abbildung 79: Ökonomische Betrachtung der einzelnen Demontageschritte für den IPM-Motor

Für die Demontage des Getriebes entstehen Kosten von 14 €. Diesen Kosten stehen Erlöse von 57 € gegenüber und setzen sich zusammen aus den Materialerlösen des Getriebes abzüglich dem Elektromotor. Für die Demontage von Rotor und Stator entstehen Demontagekosten von 8 €. Durch den Kupferanteil im Stator stehen diesen Demontagekosten Erlöse von rund 34 € gegenüber. Daraus wird deutlich, dass die Demontage bis zum Rotor aus heutiger Sicht bereits wirtschaftlich ist und aus den Werkstoff Erlösen aus Getriebe sowie Rotor und Stator getragen werden. In Abbildung 80 werden die Kosten für die Demontage und den Transport der Magnete den möglichen Erlösen aus den Selten-Erd-Oxiden gegenübergestellt.

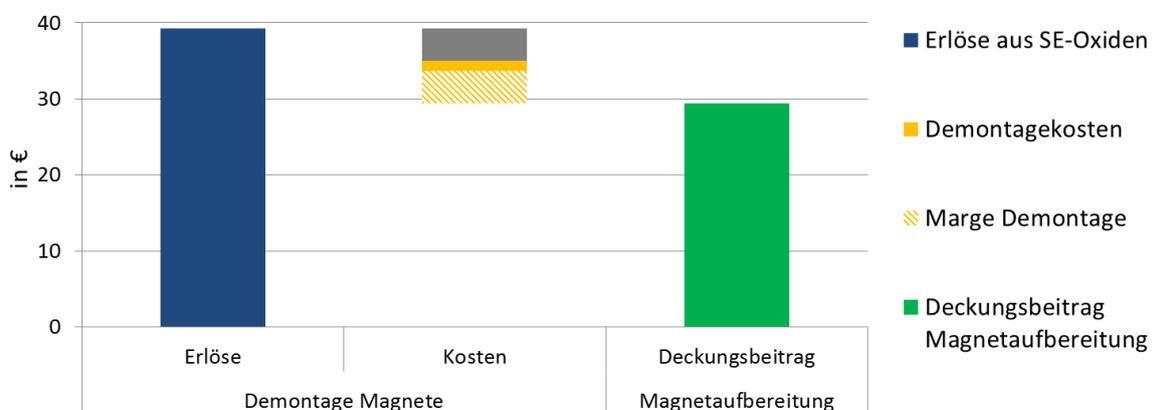


Abbildung 80: Ökonomische Betrachtung der Magnetdemontage für den IPM-Motor

Es wird angenommen, dass die Magnetdemontage wirtschaftlich ist, wenn eine ähnlich hohe Marge erzielt werden kann wie bei den vorherigen Demontageschritten. Daraus ergeben sich Demontagekosten inklusive Marge von ca. 6 € und Transportkosten von ca. 4 €. Den Kosten stehen Erlöse von insgesamt knapp 40 € gegenüber. Die Differenz aus den betrachteten Kosten und Erlösen ergeben den Deckungsbeitrag von knapp 30 €. Der Deckungsbeitrag stellt die Erlössituation für die Magnetaufbereitung dar und dient zur Deckung aller Kosten und zur Erzielung von möglichen Gewinnen.

SMP-Motor

Die detaillierte Betrachtung der Kosten und Erlöse für die beim SPM-Motor anfallenden Demontageschritte werden in Abbildung 81 dargestellt. Wie bei der Demontage des IPM-Motors ist die Demontage beim SPM-Motor bis zum Rotor bereits wirtschaftlich. Den Demontagekosten von insgesamt rund 16 € stehen Erlöse von insgesamt rund 54 € gegenüber. Vor allem das im Stator enthaltene Kupfer führt zu den hohen Erlösen. Es wird daher angenommen, dass die Demontage bis zum Rotor aus heutiger Sicht bereits stattfinden wird.

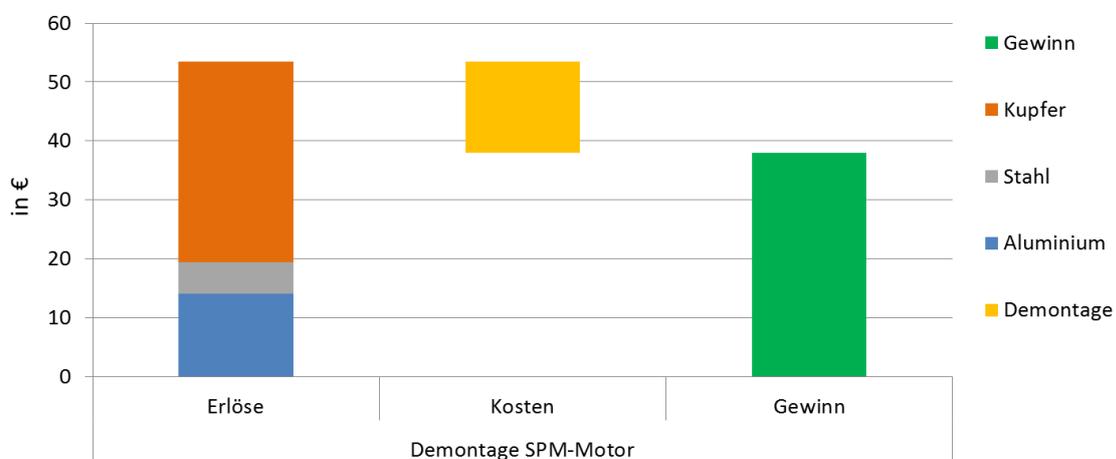


Abbildung 81: Ökonomische Betrachtung der einzelnen Demontageschritte für den SPM-Motor

In Abbildung 82 werden die Kosten für die Demontage und den Transport der Magnete den möglichen Erlösen gegenübergestellt. Die Erlöse ergeben sich aus den im Magnet enthaltenen Seltenen Erden. Die Kosten setzen sich zusammen aus den Demontagekosten inklusive Marge von ca. 14 € und den Transportkosten von ca. 11 €. Die maximal erzielbaren Erlöse belaufen sich auf ca. 57 €. Die Differenz aus den betrachteten Kosten und Erlösen beträgt bei dem SPM-Motor rund 31 € und stellt den Deckungsbeitrag für die Magnetaufbereitung dar.

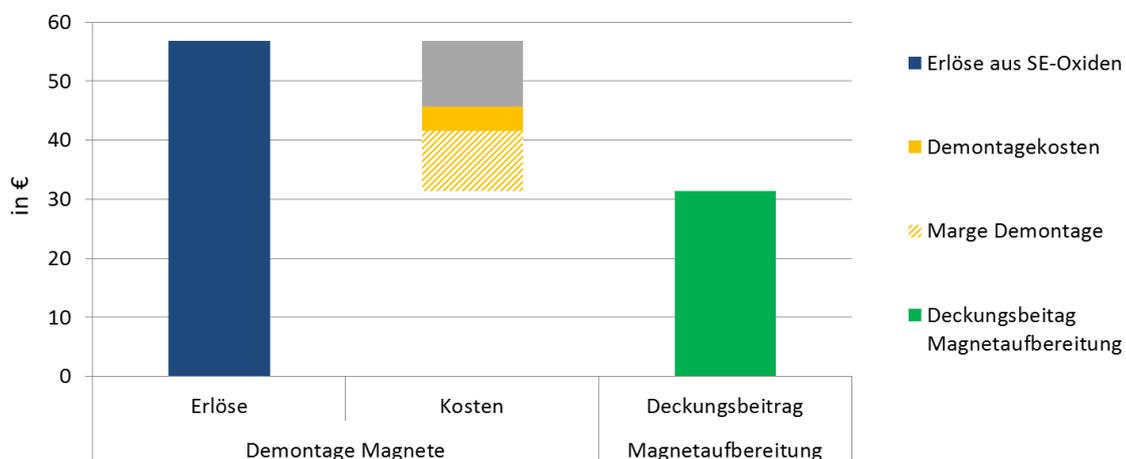


Abbildung 82: Ökonomische Betrachtung der Magnetdemontage für den SPM-Motor

Magnetaufbereitung mittels hydrometallurgischem Prozess zur Magnetaufbereitung

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob die Gewinnung der Seltenen Erden aus den Magneten der Rotoren wirtschaftlich betrieben werden kann. Für die Magnetaufbereitung von 1 kg Magnetmaterial stehen gemäß der im vorherigen Abschnitt durchgeführten ökonomischen Betrachtung beim IPM Motor insgesamt rund 15 € und beim SPM rund 10 € zur Verfügung.

Die Kosten für die hydrometallurgische Aufbereitung von Magnetmaterial, die im Kapitel 4.4.2 ausführlich beschrieben ist, wurden. Für die Berechnung wurden folgende Kosten herangezogen:

- Investitionskosten
- Personalkosten
- Kosten für Chemikalien

Die Kalkulationsgrundlage der betrachteten Kostenarten nachfolgend genauer beschrieben.

Investitionskosten

Ausgehend von den Erfahrungen aus den Laborversuchen an der TU Clausthal wurde für die Kalkulation der Investitionskosten eine Anlage mit einem jährlichen Umsatz von 100 t Magnetmaterial im Jahr ausgelegt. Die Materialmenge kann dabei in einem Einschichtbetrieb aufgearbeitet werden. Im Zweischichtbetrieb kann die Anlage 200 t, im Dreischichtbetrieb 300 t verarbeiten. Es wird angenommen, dass die Anlage über einen Zeitraum von 10 Jahren genutzt werden kann.

Der größte Anteil an den in Abbildung 83 dargestellten Investitionskosten ist bedingt durch die Gebäudekosten für die Anlage. Dabei wird die Lagerung der Chemikalien mit entsprechenden Sicherungsmaßnahmen mitberücksichtigt. Die gesamten Gebäudekosten werden mit 2 Mio. € abgeschätzt. Der Aufbau der Anlage sowie das Engineering werden mit 200.000 € abgeschätzt.

Die Kobalt- und die Oxalatfällungen finden in drei einwandigen Reaktoren aus Edelstahl statt. Aufgrund der stark sauren und oxidierenden Bedingungen bei der Laugung und der Goethitfällung finden diese Prozesse in einem doppelwandigen Reaktor aus Hastelloy statt. Für nicht betrachtete Kosten und Sicherheiten wurde ein Sicherheitszuschlag von über 20 % der Anlagekosten aufgeschlagen.

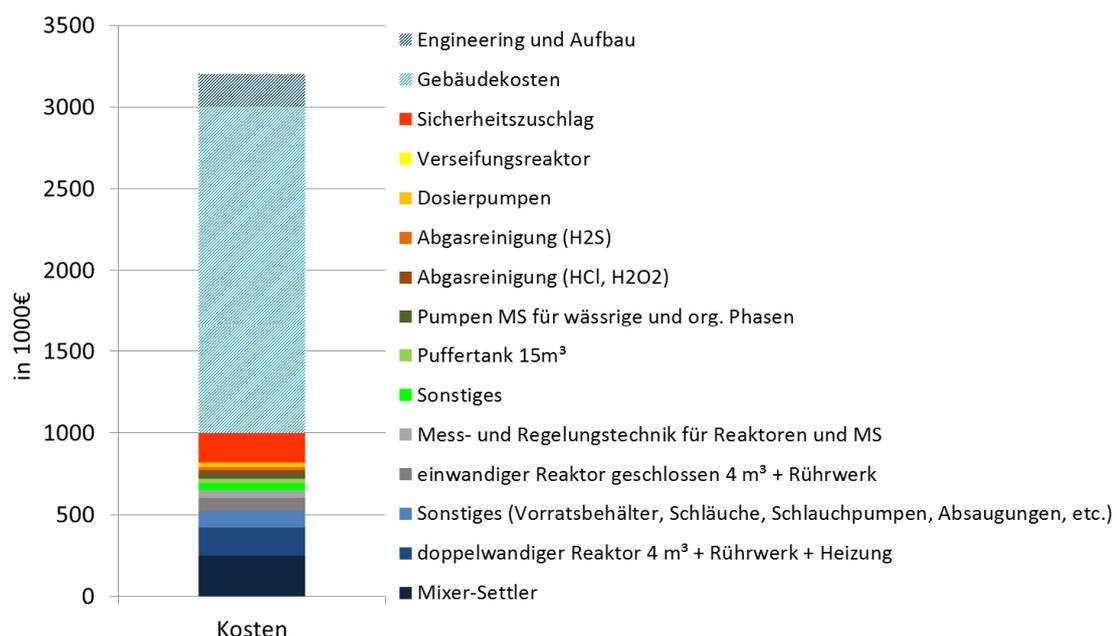


Abbildung 83: Investitionskosten Magnetaufbereitungsanlage

Personalkosten

Die Höhe der Personalkosten hängt von der Anzahl der Arbeitsschichten ab. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage durchgehend durch einen technischen Mitarbeiter überwacht werden muss. Außerdem wird ein technischer Mitarbeiter pro Arbeitsschicht benötigt. Die Kosten für die Analytik und einen Ingenieur, der 50 % seiner Kapazitäten mit der Betreuung der Anlage verbringt, bleiben mit der Anzahl der Schichten konstant. Die entsprechenden Kosten sind in Abbildung 84 dargestellt.

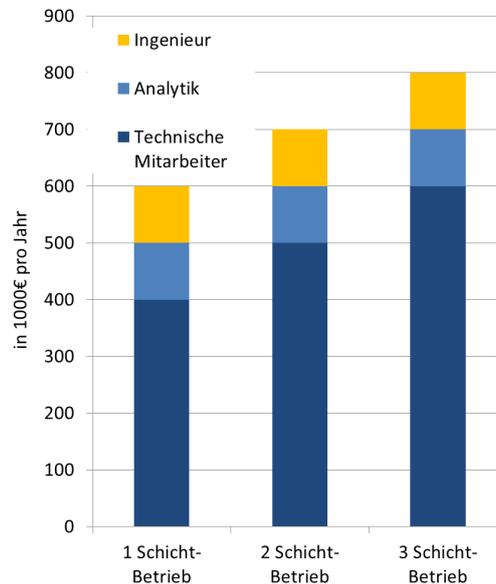
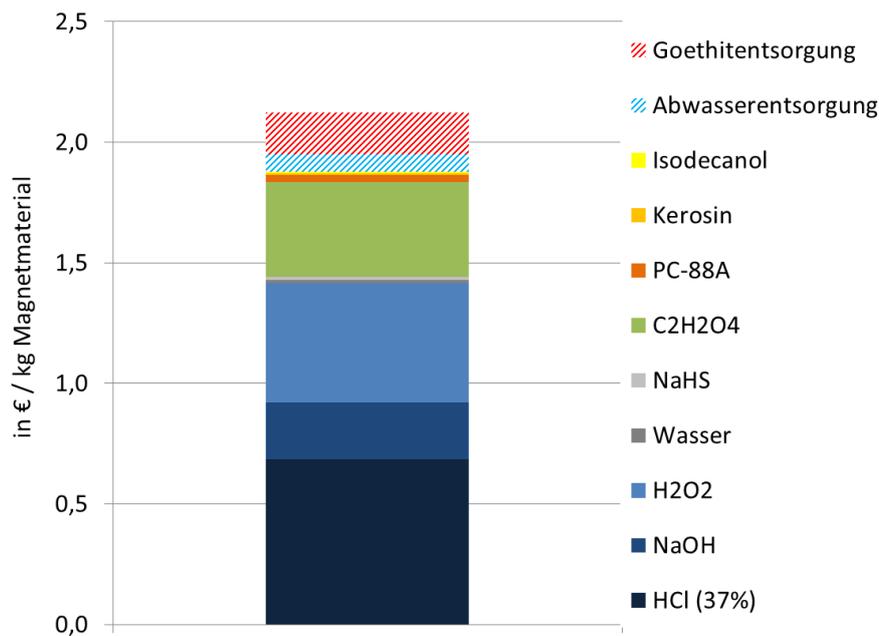


Abbildung 84: Personalkosten nach Schicht-Betrieb

Chemikalienkosten

Als Grundlage für die Berechnungen der Chemikalien- und Entsorgungskosten (vgl. Abbildung 85) dienen die von der TU Clausthal durchgeführten Untersuchungen. Zur Ermittlung der Chemikalienkosten wurden handelsübliche Preise herangezogen.



Kosten für Chemikalien und Entsorgung
Abbildung 85: Kosten für Chemikalien pro kg Magnetmaterial

In Abbildung 86 sind die gesamten Kosten für das Magnetrecycling den möglichen Erlösen gegenüber gestellt. Die Kosten für das Recycling sind abhängig von den verschiedenen Magnetquellen. Während die Magnetaufbereitungskosten nur von der Anzahl der Schichtbetriebe abhängen, sind die Kosten für die verschiedenen Motoren aufgrund der unterschiedlichen Transport- und Demontageaufwände unterschiedlich.

Die Kosten für die Aufbereitung der Magnete aus den betrachteten Elektromotoren werden für die gesamte Verwertungskette dargestellt. Die Kosten für Demontage und Transport resultieren aus der oben vorgestellten favorisierten Demontage- und Logistikkette (Szenario 2).

Die möglichen Erlöse pro kg Magnet hängen wesentlich von den darin enthaltenen Seltenen Erden ab. Der im Projekt festgelegte generische Magnet enthält 20 % Neodym und 10 % Dysprosium. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass zukünftige Magnete einen geringeren Dysprosiumanteil haben werden. Daher werden die Erlöse mit unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Eine weitere Variable bei den Erlösen sind die Preise für Neodym- und Dysprosiumoxid. Um eine möglichst konservative Kostendarstellung zu gewährleisten, wurde mit innerchinesischen Preisen gerechnet. Diese sind aufgrund der Exportzölle rund 30 % niedriger als die Preise außerhalb Chinas.

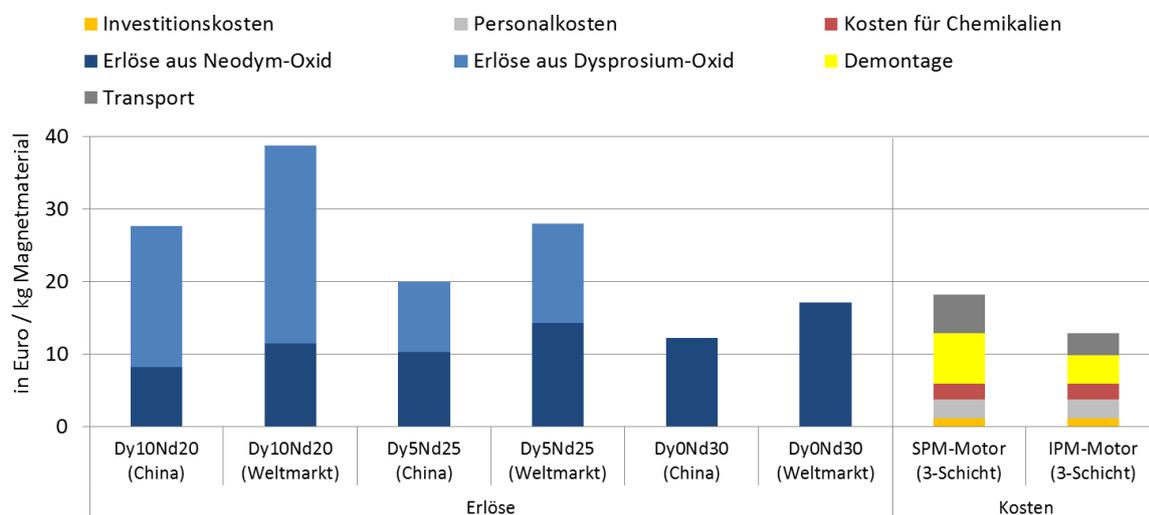


Abbildung 86: Kosten und Erlöse für das gesamte Magnetrecycling

Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit der Magnetaufbereitungsanlage genauer betrachtet. Hierfür werden die möglichen Erlöse aus den produzierten Seltenen Erden den Aufwendungen der Magnetaufbereitung gegenübergestellt. Bei den Kosten für Demontage und Transport handelt es sich bereits um handelsübliche Marktpreise inklusive Margen. Zur Ermittlung der möglichen Margen für eine Magnetaufbereitungsanlage werden die Kosten für die Demontage und Logistikketten daher von den berechneten Erlösen abgezogen und die Differenz ins Verhältnis gesetzt zu den Aufbereitungskosten. Der daraus ermittelte Quotient bildet die Marge für die Magnetaufbereitungsanlage.

Beispiel:

Der Erlös für 1 kg Magnetmaterial mit einem Anteil von 10 % Dysprosium und 20 % Neodym beträgt auf dem chinesischen Markt rund 28 €. Die Kosten für das Recycling des IPM-Motors bestehen aus dem Anteil für die Magnetaufbereitung (6 €) sowie dem Anteil für die Demontage und den Transport (7 €). Die Kosten für Demontage und den Transport enthalten bereits entsprechende Margen und können von den Erlösen abgezogen werden. Daraus resultiert eine Summe von rund 21 € zur Deckung der Kosten für die Magnetaufbereitung von rund 6 €. Dies entspricht einer Wirtschaftlichkeit von rund 350 %.

Die so berechneten Wirtschaftlichkeiten werden für die betrachteten Magnetzusammensetzungen und die untersuchten Motoren in Abbildung 87 dargestellt. Die Differenzen zwischen den Erlösen auf Basis von chinesischen Seltene-Erd-Oxid Preisen und Weltmarktpreisen werden durch die schraffierten Balken angegeben. Abhängig von den betrachteten Dysprosiumanteilen können mit heutigen Weltmarktpreisen Margen von 80 % – 660 % erzielt werden.

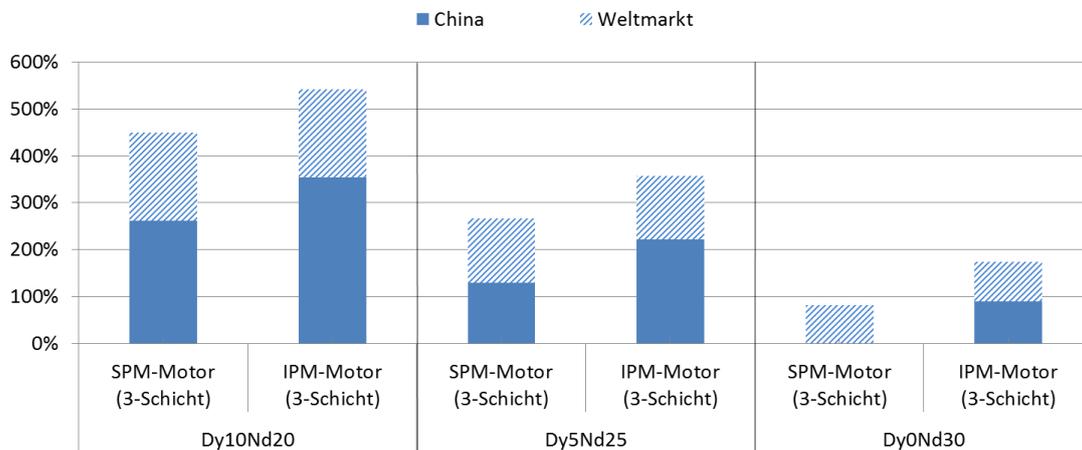


Abbildung 87: Wirtschaftlichkeit für die Magnetaufbereitung bei chinesischen- bzw. Weltmarktpreisen

Die Erlöse ergeben sich aus den Preisen für die bei der rohstofflichen Aufbereitung gewonnenen Seltene-Erd-Oxide. Als Werkstoffzusammensetzung für den Magneten wird der im Projekt definierte generische Magnet herangezogen (vgl. Kapitel 4.5.1). Aufgrund der Exportzölle für Seltene Erden existieren unterschiedliche Preise für China und die restliche Welt. Die durch die unterschiedlichen Preise resultierenden Erlöse werden den Recyclingkosten gegenübergestellt.

Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die aus dem Fahrzeug ausgebauten Komponenten Getriebe und Stator wirtschaftlich recycelt werden können. Bis zu diesem Demontagezustand angefallene Kosten müssen nicht vom Rotor getragen werden. Die dargestellten Recyclingkosten für Seltene Erden setzen sich zusammen aus den Kosten für den Transport, die Demontage und die Magnetaufbereitung. Für den SPM-Motor resultieren höhere Transportkosten als für den IPM-Motor, da der Magnetanteil pro Rotor geringer ist und dieser zur zentralen Demontage transportiert wird. Zudem resultieren aufgrund der aufwendigeren Demontage der Magnete vom SPM-Motor höhere Demontagekosten. Die Kosten für die Magnetaufbereitung sind für beide Motoren identisch. In Abbildung 88 sind die Kosten für das Recycling von einem Kilogramm Magnetmaterial den Erlösen der enthaltenen Seltene Erden gegenübergestellt.

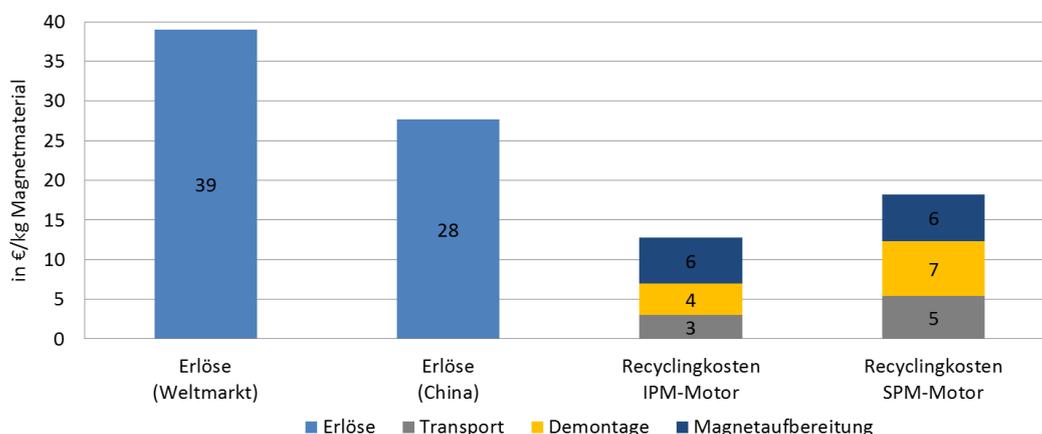


Abbildung 88: Kosten und Erlöse des Magnetrecyclings für den IPM-Motor

Insgesamt stehen den Recyclingkosten für die beiden betrachteten Motoren höhere Erlöse gegenüber. Für den SPM-Motor kann pro Kilogramm Magnetmaterial ein potentieller Gewinn von 10 € mit chinesischen Preisen bzw. 21 € mit Weltmarktpreisen erzielt werden. Für den IPM-Motor ist der Gewinn pro kg Magnetmaterial rund 5 € höher.

Die Magnetaufbereitung wurde für eine Anlage mit 300 t ausgelegt. Die prognostizierte Jahresmenge liegt bereits bei Beginn einer zu erwartenden systematischen Aufbereitung bei 3000 t pro Jahr. Erfahrungsgemäß lassen sich bei den Aufarbeitungsprozessen bei großen Mengen noch deutliche Kostenreduzierungen erzielen.

Der beschriebene Aufbereitungspfad für die Seltenen Erden aus Magneten lässt sich auch für die Aufarbeitung von Schleifschlämmen nutzen, die bei der Magnetherstellung anfallen. Dies bietet die Chance, diesen Prozess bereits bis zum Start des Recyclings von Fahrzeugen in einer Anlage zu fahren und weiterzuentwickeln.

Für das Recycling werden zukünftig große Mengen an Magnetmaterial zur Verfügung stehen. Die möglichen Erlöse, die aus den Altmagneten erzielt werden können, wurden berechnet und dienen als Grundlage zur Ermittlung der Marktgröße und der möglichen Erlöse des Magnetrecyclings.

Die Kosten für das Recycling der Magnete aus den untersuchten Motorenarten wurden beschrieben und um die der Anzahl der Rückläufer erweitert. Es wurde angenommen, dass die reinen Elektrofahrzeuge und die Brennstoffzellenfahrzeuge einen SPM-Motor und die Hybridfahrzeuge und die Plug-In Hybridfahrzeuge einen IPM-Motor verwenden. Die Kosten für die Magnetaufbereitung wurden mit den Kostenschätzungen berechnet, die auf Basis der im Projekt untersuchten Versuchsanlage beruhen. Skaleneffekte wurden nicht mitberücksichtigt. In Abbildung 89 sind Kosten und Erlöse auf Basis der prognostizierten Menge an Magnetmaterial gegenübergestellt.

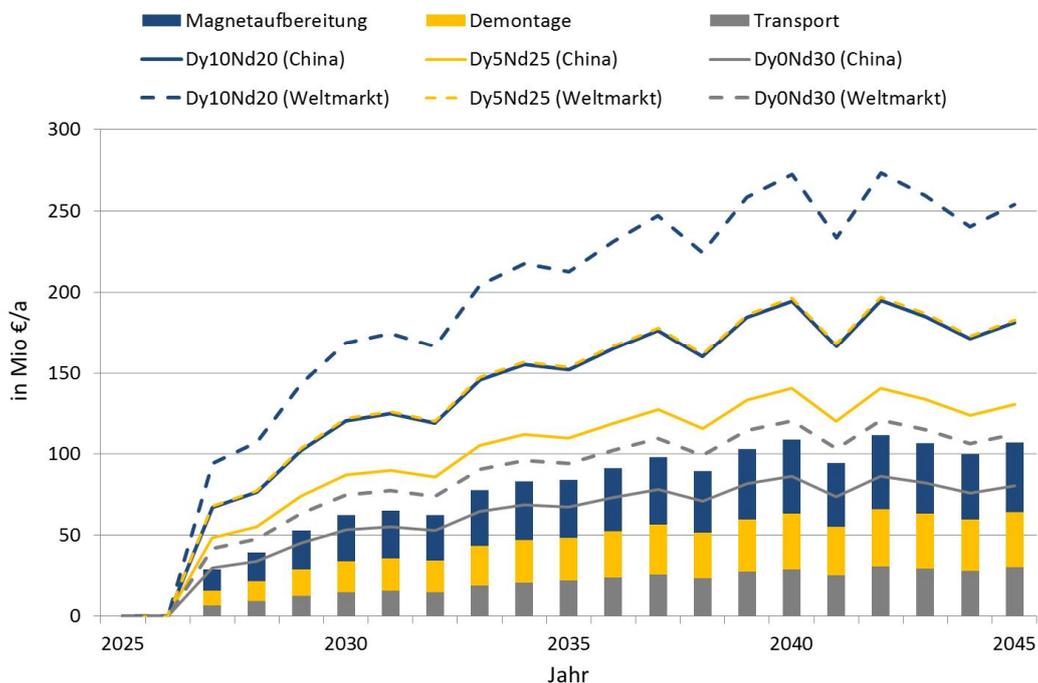


Abbildung 89: Kosten und Erlöse bezogen auf prognostiziertes Marktvolumen

Es erfolgt eine Darstellung der verschiedenen Erlös-Szenarien. Dabei sind die verschiedenen Selten-Erd-Anteile mit der gleichen Farbe gekennzeichnet. Die Erlöse auf Basis der chinesischen Preise sind als durchgezogene Linie dargestellt, die Erlöse auf Basis der Weltmarktpreise sind als gestrichelte Linie gekennzeichnet. Der Bereich zwischen den beiden möglichen Erlösen stellt eine Schwankungsbreite für die jeweiligen Szenarien dar.

Die Differenz zwischen den Erlös-Szenarien und den Kosten ergibt das mögliche Gewinnpotential. Es wird deutlich, dass mit dem aktuellen Stand der Technik hohe Gewinne erzielt werden können. Diese sind stark abhängig vom Dysprosiumanteil in den Magneten und der Preisentwicklung der Seltenen Erden. Während das Magnetrecycling für Magnete ohne Dysprosium mit chinesischen Preisen unwirtschaftlich ist, können mit ansteigendem Dysprosiumgehalt beträchtliche Gewinne erzielt werden. Bei Magneten mit 5 % Dysprosiumanteil kann für den Betrachtungszeitraum ein Gewinnpotential von insgesamt rund 500 Millionen Euro (chinesische Preise) bzw. 2,3 Milliarden Euro (Weltmarktpreise) erzielt werden.

4.6.2 AP 6.2 Geschäftsmodelle und Verwertungskette

Um in Zukunft einen Kreislauf für Elektromotoren und die Magnetverwertung zu gestalten, sollten folgende wichtige Punkte Beachtung finden:

- Derzeit findet nur die Rücknahme und Reparatur von Motoren mit Gewährleistung statt. Weitere Rücknahmen finden nicht statt, der Hauptgrund dafür ist das Einsparen der Transportkosten.
- Es ist jedoch vorstellbar, den Kunden Anreize zur Rückgabe eines alten Motors anzubieten.
- Derzeit wird der Austausch eines Rotors nur erforderlich, wenn sich Bandage löst, was zu Beschädigungen an Rotor und Magneten führt. Oft lösen sich in diesem Fall jedoch auch Magnete vom Rotor und beschädigen den Stator, so dass ggf. der gesamte Motor repariert oder ausgetauscht werden muss.
- Generell muss vor Einsatz eines Recyclingmaterials dieses die gleiche Qualifizierung durchlaufen wie ein „neues“ Primärmaterial.

Die erstellte und im Kapitel 4.6.1 vorgestellte Verwertungskette kann nur dann mit hohem Wirkungsgrad funktionieren, wenn geeignete Maßnahmen getroffen werden, um die Materialien der Fahrzeuge bzw. Komponenten zurück zu erhalten.

Für einen geschlossenen Kreislauf innerhalb Europas, insbesondere Deutschlands, muss vermieden werden, dass ein Abfluss von Materialien, insbesondere der Selten-Erd-Metalle, ins Ausland entsteht. Eine funktionierende Verwertungskette zur Umsetzung der entwickelten Verfahren könnte profitable Geschäftsmodelle, wie z.B. Leasing oder verstärkte Anreize zur Rückgabe, enthalten.

Für einen möglichst geschlossenen Materialkreislauf müssen folgende Maßnahmen berücksichtigt werden:

- Produktionsabfälle können nur dann gezielt für eine erneute Produktion von Elektromotoren wieder aufbereitet werden (Zulieferung), wenn geeignete Zulieferer gefunden werden, die anfallende Abfälle direkt wieder in verwertbare Sekundärrohstoffe umwandeln können. Jedoch wird dies für sämtliche verwendete Materialien nicht nur von einem Zulieferer erreicht werden können.
- Es müssen Recyclingpartner gefunden werden, die eine entsprechende Rücknahme der Wertstoffe ermöglichen. Entspricht der Kunde einen Motor selbst, verlassen die Rohstoffe den Materialkreislauf. Es muss daher ein Entsorgungspartner gesucht werden, welcher ein deutschlandweites Vertriebsnetz unterhält und somit schnell beim Kunden vor Ort sein kann.

Da die Rücknahmekette (vgl. Abbildung 90) entscheidend für eine hohe Recyclingeffizienz ist und die Motoren nicht nur deutschlandweit, sondern auch weltweit verbaut werden, sind regionale Recyclingpartner unter Umständen nicht ausreichend.

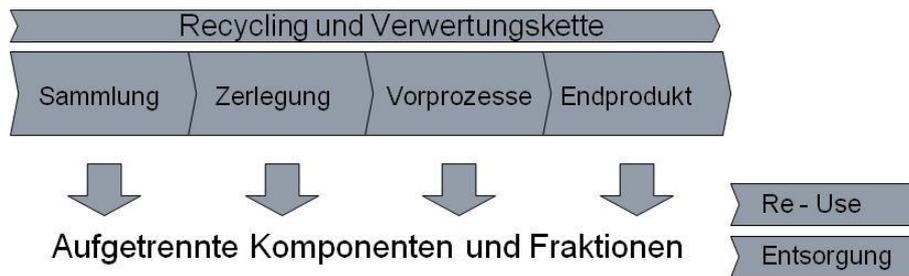


Abbildung 90: Rücknahmekette für Altprodukte

Zu den Aufgaben der Retrologistik würde gehören:

- die geeignete Sammlung (zentral – dezentral)
- kürzester und kostengünstiger Transport und
- Lagerung der Komponenten (inkl. benötigter Verpackung)

jedoch **nicht** die Aufbereitung, von Stoffströmen, aus welchen ein Wert gewonnen werden kann, da aus ihnen Produkte entstehen, die wieder in die Versorgungskette eingespeist werden.

Stoffströme, Logistik und Rücknahme:

Es ist noch kein Rücknahmesystem in Deutschland etabliert, u.a. da die Lohnkosten für die Sammlung einen Hinderungsgrund darstellen. Unterschiedliche Technologien zum Abtrennen der Magnete wurden im Projekt betrachtet (siehe Kapitel 3 und 4). Auf dem Markt in Deutschland bzw. Europa agieren jedoch mehrere große Recyclingunternehmen, welche ein weltweites Logistiknetz besitzen. Somit könnte der Kunde vor Ort erreicht werden.

Im vorherigen Kapitel wurden dazu diverse Szenarien betrachtet, die folgerten, dass im Falle der Demontage des Getriebes, des Elektromotors und die Trennung von Rotor und Stator beim Altfahrzeugverwerter, der Rotor zu einer zentralen Demontageanlage transportiert und demontiert werden muss. Anschließend erfolgt der Transport der Magnete zur Magnetaufbereitungsanlage. Eine zentrale Demontage des Getriebes ist aufgrund der hohen Transportkosten deutlich zu kostspielig.

Die Vorteile der zentralen gegenüber der dezentralen Demontage sind bedingt durch die sehr spezifische Bauweise der Elektromotoren und der damit verbundenen Aufwände zur Trennung der Magnete vom Rotor. Durch die Verwendung von Spezialwerkzeugen können Demontageaufwände deutlich reduziert werden. Zudem kann durch die spezialisierte Handhabung der Magnete im magnetischen Zustand erheblich Zeit eingespart werden. Die zentrale Demontageanlage sollte auch eine automatisierte Entmagnetisierung der Magnete vorsehen. Diese erzeugt gegenüber einer Entmagnetisierung bei einem dezentralen Demontagebetrieb weitere Kostenvorteile.

Letztlich müssen für die Rücknahme für den Motoren- bzw. Automobilhersteller und den Kunden Vorteile entstehen. Die Arbeiten in AP 6.1 (Kapitel 4.6.1) zeigen deutlich, dass sich jeder Demontageschritt der Motoren zur Trennung von Gehäuse (Aluminium), Stator (Kupferwicklung, Bleche), Rotor (Stahlwelle, Magnete) und Elektronik für die dementsprechenden Fachbetriebe durchaus rechnet.

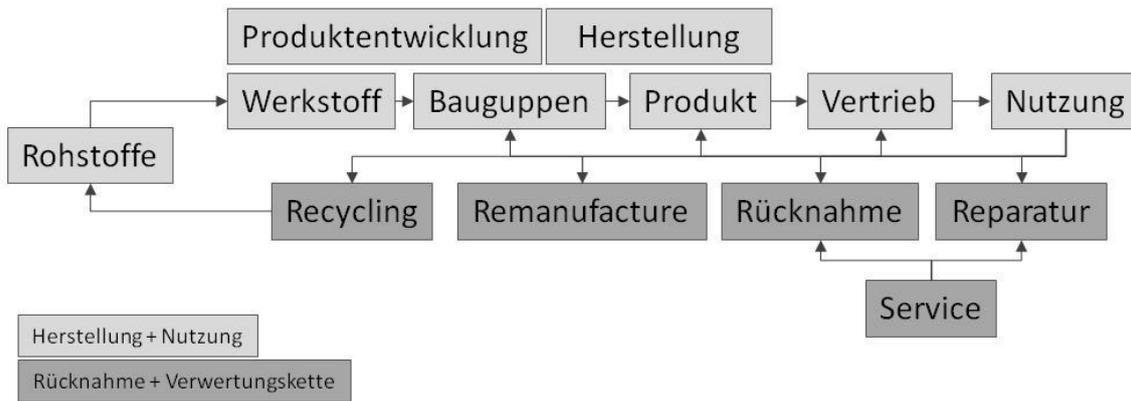


Abbildung 91: Herstellung und Nutzungsphase von Produkten sowie Schnittstellen von Rücknahme und Produktion.

Allgemein sind für die Gewinnung von Recyclingmaterial Anreize für den Kunden möglich. Kunden könnten z.B. Prämien bzw. Nachlässe bei der Entscheidung, Neugeräte zu erwerben, erhalten. Hierdurch kann Einfluss auf die Materialverwertung genommen werden. Der erste Schritt, neues Recyclingmaterial für die Produktion zur Verfügung zu stellen, ist so geschaffen. Weiterhin entstehen folgende Vorteile:

- Verkauf neuer Geräte durch zusätzlichen Anreiz
- Aufbau einer stärkeren Kundenbindung
- Rücknahme kann direkt als Service mit Vorteil für den Kunden gelten.

Diese Überlegungen, wie die Akteure (Hersteller, Nutzer, Rohstoff- und Wertstofflieferanten) sowie beteiligte der Retrologistikkette auf die Verwertung Einfluss nehmen können (vgl. Abbildung 91), sind mit in die Entwicklung einer Roadmap zur zukünftigen Kreislaufwirtschaft eingeflossen.

4.6.3 AP 6.3 Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft

Die wesentlichen Arbeiten wurden in einem Roadmap-Workshop am 19./20. März 2014 in Karlsruhe unter Beteiligung von 16 Projektpartnern durchgeführt, die Formulierungen danach am 23. Mai bei der Daimler AG in Stuttgart überarbeitet. Unter Moderation der Dres. Ewa Dönitz und Björn Moller des Fraunhofer ISI wurde dabei zuerst die Zieldefinition der Roadmap erarbeitet: „Funktionelles End-of-Life-Recycling von 90 % der Magnetwerkstoffe aus Antriebsmotoren der in Europa zur Verwertung anstehenden Altfahrzeuge im Jahr 2040 (Sammlung und Recycling)“. Danach diskutierten die Experten aus den einzelnen MORE-Arbeitspaketen in drei Runden in einem World Café die Roadmap-Ebenen „Gesellschaft, Markt und Politik“, „Produkte und Dienstleistungen“ und „Technologien“. Die drei Ebenen wurden zusammen geführt, Inkonsistenzen besprochen und Maßnahmen aus den identifizierten Entwicklungen abgeleitet. Es wurden drei Maßnahmen vertieft:

<p>1) Sensibilisierung der Verwerter bzgl. Seltenen Erden, Aufnahme von Magnet-Information in IDIS (International Dismantling Information System)</p>	<p>2) Aufbau einer Demontagekette für E-Motoren</p>						
<p>Zielgruppe: Altauto-Verwerter</p> <p>M1: <i>Elektromotor und „High Volt“ als Zertifizierungskriterium</i> Beteiligt: Politik, Zertifizierungsorganisation</p> <p>M2: <i>Aufnahme in IDIS-Datenbank</i> Beteiligt: OEM Info zum Elektromotor und beinhaltenden Magneten</p> <p>M3*: <i>Infos über Vornutzer-Newsletter</i> Beteiligt: Newsletter-Betreiber (Verbände) Informationen zum Separieren von Magneten, dem Stand der Verwertungskapazitäten, Logistik (z. B. zentrale Verwertung von Rotoren, Entmagnetisierung) und den Preisen</p>	<p>Ziel Sauberkeitsanforderungen für a) hydrometallurgischen b) werkstoffliche } Aufbereitung vereinzelte und entmagnetisierte Magnete</p> <p>Nächste Schritte - Sensibilisierung der Verwerter und Kunden - Designvorgaben einhalten - Aufbau von Pilotanlagen (für Motoren ohne Designvorgaben)</p> <p>Beschreibung - Sammlung - Zerlegung in Komponenten - Transport der Rotoren - Demontage: Vereinzelung und Entmagnetisierung - gegebenenfalls Reinigung der Magnete</p> <p>Akteure - Motorenentwickler (OEM) - ELV-Verwerter - Logistik - Spezialisierte Demontagebetriebe - Anlagenbauer und Automatisierung - Aufbereiter für Magnete (Kunde)</p>						
<p>3) Business Case: Vom Altmagnet zum Metall</p>							
<table border="1"> <tr> <th data-bbox="197 936 368 958">Altmagnet</th> <th data-bbox="389 936 544 958">Schleifschlamm</th> </tr> <tr> <td data-bbox="197 965 368 1043"> Mahlen/Homogenisieren (RE+Fe) Chemische Analyse des Pulvers </td> <td data-bbox="389 965 544 1043"> Calzinieren ($RE_2O_3 + Fe$) Homogenisieren Chemische Analyse </td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="264 1061 496 1196"> <ul style="list-style-type: none"> - Auflösen in HCL - Fe-Fällung → Eisen ist raus! - Co-Fällung → Cobalt ist raus! - Separation - Nd_2O_3/Dy_2O_3 aus Oxalattfällung - Reduktion zu Nd-/Dy-Metall </td> </tr> </table>	Altmagnet	Schleifschlamm	Mahlen/Homogenisieren (RE+Fe) Chemische Analyse des Pulvers	Calzinieren ($RE_2O_3 + Fe$) Homogenisieren Chemische Analyse	<ul style="list-style-type: none"> - Auflösen in HCL - Fe-Fällung → Eisen ist raus! - Co-Fällung → Cobalt ist raus! - Separation - Nd_2O_3/Dy_2O_3 aus Oxalattfällung - Reduktion zu Nd-/Dy-Metall 		<p>Mengenszenario</p> <p>Schleifschlamm: 100 t/a</p> <p>Altmagnete: 2014: 5t/a 2020: 20t/a 2030: 100t/a</p> <p>Auslegung: 100 t/a NdFeB</p> <p>Anlage auslegen (nur Separation): - Anlagekosten - laufende Kosten</p> <p>➡ Entscheidung, ob Anlage wirtschaftlich läuft</p>
Altmagnet	Schleifschlamm						
Mahlen/Homogenisieren (RE+Fe) Chemische Analyse des Pulvers	Calzinieren ($RE_2O_3 + Fe$) Homogenisieren Chemische Analyse						
<ul style="list-style-type: none"> - Auflösen in HCL - Fe-Fällung → Eisen ist raus! - Co-Fällung → Cobalt ist raus! - Separation - Nd_2O_3/Dy_2O_3 aus Oxalattfällung - Reduktion zu Nd-/Dy-Metall 							

Es zeigen sich in der Roadmap viele gemeinsame Ansichten, die im Projekt gewonnen wurden. Es gab auch einige kontrovers diskutierte Aspekte, die in der Roadmap auch so dargestellt sind, vgl. Abbildung 93 und Abbildung 94.

Die Roadmap zeigt auf Basis der Erkenntnisse aus dem Projekt, welche Schritte notwendig sind, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft für Magnete aufzubauen und damit das Ziel zu erreichen, eine SE-Recyclinganlage in Deutschland mit den derzeit zur Verfügung stehenden Altmaterialien wirtschaftlich zu betreiben.



Abbildung 1: Impression World Café zur Erstellung der Roadmap

Abbildung 93: MORE-Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft

	2014	kurz- und mittelfristig	2030	mittel- und langfristig	2040
Gesellschaftliche Entwicklungen	Urbanisierung und demografischer Wandel fördert die E-Mobilität und mobilitätskonzepte (weg vom Individualverkehr)		Ressourceneffizienz als politisches Leitbild	Nachhaltigkeit setzt sich als politisches Leitbild durch	
Gesetzliche Anreize	ELV 85 Gew.-% stoffliche Verwertungsquote fördert nicht das Magnetreycling	Transparente Informationen zur Art der Magneten (NiFeB/SmCo...)	Wirtschaftlich orientierte ELV Recyclingquoten unter Einbeziehung derzeit kritischer Rohstoffe	Ausbauvorgaben für Magneten	Hydrometallurgische Anlage zur Separation trägt sich wirtschaftlich
Politische Zielvorgaben		Förderung der Anlage zum hydro-metallurgischen Recycling und Separation	EU-Roadmap 2020 Rohstoffstrategie bedingt Magnetreycling	Unterstützung beim Aufbau eines Stoffstroms für gebrauchte Magnete	
Gesetzliche Recyclingquote		Etablierung von Sekundärmärkten zur Entspannung der Primärmarkte	Schaffung der gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Unterstützung der Genehmigung von Magnetreyclinganlagen in Europa		
Kunden für gebrauchte Motoren, Rotoren, Magneten	Kunden für gebrauchte Motoren und Rotoren in kleiner Stückzahl vorhanden; Kunden für gebrauchte Magnete nicht vorhanden		Kunden für gebrauchte Magnete als Rohstoffquelle vorhanden		
Kunden für recyceltes Magnetmaterial	Wegen 3% niedrigerer Remanenz keine Kunden vorhanden	Aufbau eines Marktes für werkstofflich recycelte Magnete		Markt für gereinigte Magneten für das werkstoffliche Recycling vorhanden	
Kunden für rückgew. SE-Oxide, SE-Met.	Kunden für Metalle vorhanden; keine Kunden für Oxide	Betreiber von Reduzierungsanlagen als Kunden	Kunden für gebrauchte Magnete als Rohstoffquelle vorhanden	Abnehmer für SE-Metalle vorhanden	
Anbieter für gebr. Mot., Rot., Magneten		Anzahl der Anbieter (auf Magnetdemontage spezialisierte Demontagebetriebe) für Altmagneten ist gestiegen			Etablierter Markt für recyceltes Magnetmaterial
Anbieter für recyceltes Magnetmaterial	Anbieter nicht vorhanden	Anzahl der Anbieter gestiegen durch ausreichendes Preisniveau für Magnetmaterial			
Anbieter für rückgew. SE-Oxide, SE-Metalle	Anbieter nicht vorhanden	Substitution auf Systemebene (z.B. Asynchronmotoren) senkt die Nachfrage	SE-Metallhersteller in Europa vorhanden (Oxid-Reduktion)	Anbieter vorhanden	
Nachfrage an NiFeB Magneten	Wenige Hybride und EV-Motoren mit NiFeB-Magneten	Substitutionsmöglichkeiten für Dysprosium	Anzahl der elektrifizierten Antriebe stark angestiegen	Preise Dysprosium im Vergleich zu anderen SE weiterhin steigend	Substitutionspotential auf System- und Werkstoffebene voll ausgeschöpft
Nachfrage nach Dysprosium		Nachfrage steigt	Sammlung von Altmagneten	Anbieter für Nd und Dy; Metallerstellung in Europa	
Recycling-Konzepte	Recycling von Produktionsabfällen in China	Sammlung von Produktionsabfällen			
SE-Motorenleasing	Fahrzeugleasing findet statt	Fahrzeugleasing findet nicht statt			Motorleasing findet in der E-Mobilität nicht statt
Gebrauchte Motoren, Rotoren, Magneten	Austauschkonzepte für Verbrennungsmotor auf E-Motor übertragbar, jedoch kaum Bedarf, da E-Motoren langlebiger als Karosserie		Optionale Verwertung von Rotoren und Motoren als ganzes im rohstofflichen Recycling		
Recyceltes Magnetmaterial	Einzelösungen zur Magnetreycling in Asien vorhanden	Magnete unsortiert bei Recyclingunternehmen vorhanden	Optionale Sekundäranwendung/-anwender für Magnete	Anwendung für gereinigte Magneten für das werkstoffliche Recycling vorhanden	Werkstofflich recyceltes Magnetmaterial als Produkt vorhanden
Rückgewonnene SE-Oxide, SE-Metalle	Nd- und Dy: Oxide vorrangig in China	Existierende Pilotanlagen in Japan für Magnetdemontage	Scale-up der Hydrometallurgie inklusive Reduktionsverfahren (z.B. EU, Japan)	Industrieller Maßstab verfügbar	
Sammlung und Sortierung Magnetreycling	Technikumsmaßstab	Dienstleistung; Zerlegung bzw. Demontage	Retrospektiv wird aufgebaut, Rücklaufquote steigt an	Retrospektiv voll etabliert	

Gesellschaft, Markt und Politik

Produkte und Dienstleistungen

Technologien	Zerlegung bis zum Magneten Magnet ist Technikumsmaßstab	Entwicklung von Trennverfahren (SE-Magnet/Rest) – in Massenstromverfahren als Vorbereitung für das rohstoffliche Recycling (z.B. OZ)	Zerlegung bis zum Magneten: Teilautomatisierte Anlagen inklusive Entmagnatisierung verfügbar	Zerlegung bis zum Magneten: Vollautomatisierte Anlagen als etablierte Technik verfügbar
Sammlung; Infrastruktur/Transport	Technikumsmaßstab	Technikumsmaßstab	In Pilotländern für E-Mobilität verfügbar	EU-weit verfügbar
Reuse: Motoren	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Technisch möglich (Stückzahlen gering)	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)
Remanufacture: Rotoren	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Verwendung wegen der Weiterentwicklung der Materialien unwahrscheinlich	Standardisierung von Magneten nicht sinnvoll
Reuse: Magneten	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Technisch möglich (Fall tritt nicht ein)	Technisch erprobt mit Remanenzverlust je Recyclingstufe	Verfügbar
Recycling Werkstofflich	Verfahren im Technikumsmaßstab entwickelt (Ergebnis MORE)	Scale-up und Kostenoptimierung	Technologieentwicklung für Schmelze aus pyrometallurgischem Verfahren	Verfügbar
Recycling: rohstofflich: Hydrometallurgisches Verfahren, und Separation	Verfahren nicht verfügbar	Notwendige Voraussetzung der Reinigung erfüllbar a) geeignetes Reinigungsverfahren; b) Anwendung Designvorgaben für recyclinggerechtes Produkt	Magnete werden hydrometallurgisch recycelt	Alternative pyrometallurgische Verfahren denkbar
Recycling: rohstofflich: Pyrometallurgisches Verfahren	Verfahren nicht verfügbar	Verfahren nicht verfügbar	Magnete werden hydrometallurgisch recycelt	Alternative pyrometallurgische Verfahren denkbar
Reduktion der Oxide zu Metallen	Stand der Technik (hauptsächlich in China)	Erste Anlage in Europa wird aufgebaut	Kostenoptimierung zur Einhaltung der EU Umweltauflagen	Verfügbar
Konkurrenztechnologien, die Bedarf an Nd, Dy senken	Technisch verfügbar, z.B. Asynchronmotor und Reluktanzmotor für Elektrofahrzeuge	Für Hybridfahrzeuge optimierte Auslegung mit reduziertem Dysprosium-Anteil	Kostensenkung durch Einsatz von Magneten mit reduzierter Remanenz bei reduzierter Leistung	Verfügbar
Politik	Förderung von Elektrofahrzeugen europaweit außerhalb Chinas stärken Magnethersteller Analyse der (weltweit) zu erwartenden Altmotoren Bewusstsein schaffen für den Aufwand des Magnetreyclings	ELV-Ergänzung; Ausbau und Demontage von Antriebs-E-Motoren und deren Magneten beim wirtschaftlichen Betrieb Absicherung von Investitionen in hydrometallurgische Anlagen gegen SE-Preisvolatilität Sensibilisierung der Altsachverständigen bzgl. SE bei Zertifizierung	Staatliche Förderung einer Anlage zur Gewinnung von metallischen Dy/Nd-Magneten Fördermaßnahmen: Günstige bis kostenneutrale Materialverfügbarkeit für Tests ermöglichen	Wirtschaftliche Optimierung sämtlicher Prozesse
Industrie	Aufbau geeigneter Retrolastik, um Recyclinganlage auszuillastieren (Magnete, Schmelzschlamm, Produktionschrott) Motorenhersteller bzw. Magnetenwender forcieren Inhouse-Retrolastik	Aufbau einer Demontagekette und Pilotanlage für E-Motoren zur Herstellung einzelner, entmagnetzierter Magneten Aufbau einer industriellen Hydrometallurgie- und Separationsanlage (Grundlast: Schmelzschlamm)	Aufbau einer Demontagekette und Pilotanlage für E-Motoren zur Herstellung einzelner, entmagnetzierter Magneten Aufbau einer industriellen Hydrometallurgie- und Separationsanlage (Grundlast: Schmelzschlamm)	Exploration neuer Dysprosium-Minen
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion
Forschung und Entwicklung	Scharfung von Bewußtsein um Recyclinggedichtes Design einzusetzen Verringerung des Dy-Gehalts in Magneten bei gleicher Remanenz	Prozessoptimierung Hydrometallurgie (inkl. optimierte Schlackenerzeugung)	FUE zur Evaluierung eines möglichen reduzierter Zerlegungsaufwand z.B. OZ, für ein rohstoffliches Recycling gegenüber der Hydrometallurgie (inkl. optimierte Schlackenerzeugung)	Aufbau der Kooperation zu Magnetzproduktionsabfällen
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion
Forschung und Entwicklung	Materialalternativen zu NeFeB entwickeln Entwicklung effektiverer Extraktionsmittel	Enmagnatisierungstechnologie für haarmagnetsche Werkstoffe entwickeln	FUE zur Fällung von Sm (einzelne SmCo-Magnete werden in den gesammelten NeFeB-Magneten enthalten sein)	Entwicklung bzw. Optimierung der SED-Reduktion

Abbildung 94: MORE-Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft (fortgesetzt)

5. Ausblick

Im 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 E-Motoren 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, 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. Zusätzlich könnten auch grundlegende Aspekte, wie eine Änderung der Klassifikationssystematik für Magnete und Elektromotoren mit eigenen Meldenummern für Produkte mit NdFeB-Magneten, in Betracht gezogen werden.

Zum anderen müssen die Bedingungen für eine Kreislaufführung gerade im Hinblick auf Selten-Erd-Magnete verbessert werden: Während innerhalb des Automobilsektors 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. Wie oben beschrieben, sind „Fehlläufer“ aber unbedingt zu vermeiden, um Magnete hochwertig und effizient werkstofflich recyceln zu können. In bestimmten Märkten, wie etwa bei Heizungspumpen, wäre nach Angaben von Herstellern der Einsatz standardisierter Magnete sinnvoll.

Während der Projektlaufzeit konnten Kompetenzen im Bereich Hydrometallurgie (insbesondere Solventextraktion) erheblich ausgebaut werden. Die neu gewonnen Erkenntnisse werden zum einen in die Lehre des Lehrstuhls für Rohstoffaufbereitung und Recycling der TU Clausthal einfließen, zum anderen sollen die Erfahrungen auch auf andere sondermetallhaltige Stoffströme im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte übertragen werden.

Die Ökobilanzergebnisse, die im Rahmen des Verbundprojektes zu den Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren von NdFeB-Magneten gewonnen wurden, stellen eine wichtige und detaillierte Verwertungsbasis auf wissenschaftlicher Ebene dar. Die in MORE erzielten Ökobilanzergebnisse und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse liefern eine neue Qualität für die Diskussion zu den ökologischen Effekten der Materialkreisläufe von Seltenen Erden. Sie werden daher vom Öko-Institut auf wichtigen Konferenzen (z.B. Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz) im In- und Ausland einem größerem Fachpublikum vorgestellt und in entsprechenden fachlichen Netzwerken verbreitet werden.

Für den Lehrstuhl FAPS und insbesondere für die Forschungsgruppe Elektromaschinenbau besitzt die Ressourceneffizienz nach wie vor großen Stellenwert. Durch das Projekt eignete sich der Lehrstuhl weitere Erfahrung und Kompetenz in der Handhabung von Magnetmaterial, der systematischen Zerlegung elektrischer Maschinen und zum strategischen Einsatz von Seltenen Erden an. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Ausbildung junger Ingenieure mit ein und geben Anstoß in weiteren Disziplinen mit großem Ressourcenbedarf Nachhaltigkeitsansätze zu erforschen.

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. Diese Ergebnisse fließen in die aktuellen Aktivitäten der Daimler AG zur Rohstoffabsicherung ein.

Die Siemens AG betrachtet die Bereitstellung von Technologie und die Sicherung der erforderlichen Rohstoffbasis für die zukünftige Fertigung von Antrieben für die Elektromobilität und darüber hinaus

weiterhin als eine notwendige Grundlage für die Generierung zukünftiger nachhaltiger Geschäfte. 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.

Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, Enterprise and Industry, „Critical raw materials for the EU,“ Brüssel, 2010.
- [2] D. Schüler, M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich und C. Merz, „Study on Rare Earths and Their Recycling,“ Öko-Institut, 2011.
- [3] G. Angerer, „Abschätzung der globalen Angebotsentwicklung von ausgewählten Metallen der Seltenen Erden für Magnetwerkstoffe - Teilbericht im Rahmen des MORE-Projektes,“ Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2012.
- [4] Roskill, „Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015. Fourteenth Edition,“ Roskill Information Services Ltd., London, 2011.
- [5] „TMR, technology metal research: TMR Advanced Rare-Earth Projects Index,“ [Online]: <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/>. [Zugriff am 13. 03. 2013].
- [6] D. J. Kingsnorth, *The Global Rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act*, Berlin, 2012.
- [7] A. Kühn, P. Novinsky und W. Schade, *GLOMO - Global Mobility Model - Beschreibung und Ergebnisse*, 2014.
- [8] „youtube: Seltene Erden - Die dunkle Seite der Hightech-Metalle, 26.00 Minute,“ 2014. [Online].: http://www.youtube.com/watch?v=CLMXxYx_vNc.
- [9] S. Constantinides, „The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets. Arnold Magnetic Technologies,“ in *51st Annual Conference of Metallurgists*, Niagara Falls, 2012.
- [10] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar und P. Liu, „Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient,“ *Advanced Materials*, Bd. 23, pp. 821 - 842, 2011.
- [11] DERA, „Deutschland - Rohstoffsituation 2012,“ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2013.
- [12] M. Buchert, A. Mennhart und J. Sutter, „Untersuchungen zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg,“ Öko-Institut e.V., Freiburg, 2014.
- [13] M. Marwede, M. Klausen und V. Handke, „Bewertung der Verfügbarkeit vier ausgewählter Rohstoffe für Elektromaschinen und Lithium-Ionen-Akkumulatoren mittels Rohstoffbedarfsszenarien und weiterer Faktoren,“ Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA), Forschungsvorhaben Nr. 614 I, Heft 949, Frankfurt, 2010.
- [14] destatis - Statistisches Bundesamt, *Produktionsdaten abgerufen aus der Datenbank Genesis*, verschiedene Jahre.
- [15] M. Buchert, A. Manhart, D. Bleher und D. Pingel, „Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten - LANUV Fachbericht 38,“ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW), Recklinghausen, 2012.

- [16] Handelsdatenbank, verschiedene Jahre. [Online]: <http://www.comtrade.un.org>.
- [17] „Method of extracting rare earth metal oxides from grinding wastes of permanent magnet manufacturing“. Russland Patent RU 2369561, 2009.
- [18] Z. Liu und H. Chen, „The industrial practice of recycling rare earth from NdFeB scraps,“ *Cailiao Yanjiu Yu Yingyong*, pp. 134 - 137, 2009.
- [19] „Verfahren zur Rückgewinnung Seltener Erden aus Leuchtstofflampen“. Deutschland Patent DE 102006025945 A1.
- [20] H. Gao und Y. Tang, „Recovery of rare earth from spent metal hydride-nickel batteries,“ *Shenyang Ligong Daxue Xuebao*, pp. 11 - 15, 2009.
- [21] United Nations Environment Programme, „Recycling Rates of Metals - A Status Report,“ 2011.
- [22] „TU Hamburg,“ [Online]: http://intranet.tuhh.de/aktuell/pressemitteilung_einzeln.php3?id=7792. [Zugriff am 04. 08. 2014].
- [23] „IDW,“ [Online]: <http://www.idw-online.de/pages/de/news520364>. [Zugriff am 04. 08. 2014].
- [24] „RWTH,“ [Online]: http://www.rohstoffe.rwth-aachen.de/cms/Rohstoffe_und_Entsorgungstechnik/Forschung/Menschen/IAR/~bqmt/Siemens_Forschungsbereich/. [Zugriff am 04. 08. 2014].
- [25] M. Zakotnik, E. Devlin, I. R. Harris und A. J. Williams, „Hydrogen Decrepitation and Recycling of NdFeB-type Sintered Magnets,“ in *Proc. 19th Int. Workshop Rare Earth Permanent Magnets and their Applications*, Beijing, 2006.
- [26] M. Zakotnik, I. R. Harris und A. J. Williams, „Possible Methods of Recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process,“ *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 525 - 531, 2008.
- [27] „Leuven,“ [Online]: <http://kuleuven.rare3.eu>. [Zugriff am 04. 08. 2014].
- [28] K. Binnemans, B. Blanpain, M. Buchert, T. Gerven, T. Jones, A. Walton und Y. Yongxian, „Recycling of rare earths: a critical review,“ *Journal of Cleaner Production*, pp. 1 - 22, 2013.
- [29] M. Kaindl, A. Poscher und S. Luidold, „Kreislaufschließung beim Recycling von Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren,“ in *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 7, K. J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann, Hrsg., Berlin, TK Verlag, 2014, pp. 321 -339.
- [30] O. Takeda, K. Nakano und Y. Sato, „Resource recovery from waste of rare earth magnet by utilizing fluoride molten salts,“ *Yooyuen Oyobi Koon Kagaku*, pp. 63 - 70, 2009.
- [31] K. Koyama, A. Kitajima und M. Tanaka, „Selective leaching of rare earth elements from an Nd-Fe-B-magnet,“ *Kidorui*, pp. 36 - 37, 2009.
- [32] V. Chin, S. Fan, B. Hill, M. Kiyota, M. Magassouba, M. Saha, C. Sun, J. Voorhees und F. Wang, „Politics & Economics of Rare Earth,“ Citigroup - Global Commodities Research & Columbia University, School of International and Public Affairs.

- [33] „Financial Times,“ [Online]: <http://www.ft.com/cms/s/0/c70e916e-f4c1-11e0-a286-00144feab49a.html#axzz2LzV2eO9q>. [Zugriff am 26. 02. 2013].
- [34] „Freie Presse,“ [Online]: <http://www.freiepresse.de/LOKALES/ZWICKAU/Firma-aus-Faehrbruecke-holt-aus-Abfall-wertvolle-Rohstoffe-artikel8285677.php>. [Zugriff am 04. 03. 2013].
- [35] „Shin Etsu,“ [Online]: <http://www.shinetsu.co.jp/e/news/s20120124.shtml>. [Zugriff am 21. 02. 2013].
- [36] „Hitachi,“ [Online]: <http://www.hitachi.com/New/cnews/101206.pdf>. [Zugriff am 21. 02. 2013].
- [37] „SDK,“ [Online]: http://www.sdk.co.jp/english/news/2010/aanw_10_1242.html. [Zugriff am 22. 02. 2013].
- [38] „New York Times,“ [Online]: http://www.nytimes.com/2010/10/05/business/global/05recycle.html?pagewanted=all&_r=0. [Zugriff am 21. 02. 2013].
- [39] Ernst & Young, „Technology Minerals - The rare earth race is on,“ 2011.
- [40] „LCM, Less Common metals,“ 2014. [Online]: <http://www.gwmg.ca/alloys-manufacturing/less-common-metals>.
- [41] „GWMG, 2013: Great Western Minerals Group Ltd.: Annual Information Form. For the Financial Year Ended December 31, 2013,“ [Online]: www.gwmg.ca/sites/default/files/financial-documents/20131231%20GWMG%20Annual%20Information%20Form%20FINAL.pdf. [Zugriff am 04. 08. 2014].
- [42] „LCM, Less Common metals,“ 2013. [Online]: <http://www.prnewswire.com/news-releases/great-western-minerals-successfully-produces-neodymium-metal-215139791.html>.
- [43] VDI, *VDI Richtlinie Nr. 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung*, 2002.
- [44] A. Wörz, *Konzeption einer Demontageanlage zur Entnahme der vergrabenen Magnete aus einem permanenterregten Synchronmotor*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- [45] T. Elwert, D. Goldmann, T. Schirmer und K. Strauß, „Affinity of rare earth elements to silico-phosphate phases in the system Al₂O₃-CaO-MgO-P₂O₅-SiO₂,“ *Chemie-Ingenieur-Technik*, Bd. 86, Nr. 6, pp. 840 - 847, 2013.
- [46] T. Elwert, K. Strauß, T. Schirmer und D. Goldmann, „Phase Composition of High Lithium Slags from the Recycling of Lithium Ion Batteries,“ *World of Metallurgy*, Bd. 3, 2012.
- [47] T. Elwert, D. Goldmann, T. Schirmer und K. Strauß, "Recycling of Lithium Ion Traction Batteries - The LiBri Project," in *Raw Materials are the Future, Proc. of the European Mineral Resources Conference 2012*, Wien, 2013.
- [48] T. Elwert, D. Goldmann, F. Schmidt und R. Stollmaier, „Hydrometallurgical recycling of sintered NdFeB magnets,“ *World of Metallurgy - Erzmetall*, Bd. 66, Nr. 4, pp. 209 - 219, 2013.
- [49] T. Elwert und D. Goldmann, „Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete, Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz,“ in *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 7,

- K. J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann, Hrsg., Berlin, TK Verlag, 2014, pp. 147 -159.
- [50] T. Elwert, D. Goldmann und F. Römer, „Separation of lanthanides from NdFeB magnets on an mixer-settler plant with PC-88A,“ *World of Metallurgy - Erzmetall*, Bd. 67, Nr. 5, pp. 287-296, 2014.
- [51] C. K. Gupta und T. K. Mukherjee, *Hydrometallurgy in Extraction Processes*, Bd. 2, Boca Raton: CRC Press, 1990.
- [52] S. Agatzini, A. Kontopoulos, P. Maraboutis und A. Xenidis, "Removal of iron from iron-nickel-cobalt solutions by precepitation and solvent extraction techniques," in *Iron control in hydrometallurgy*, Chichester, Ellis Horwood, 1986.
- [53] C. K. Gupta und N. Krishnamurty, *Extractive Metallurgy of Rare Earths*, 1. Edition Hrsg., Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [54] „Verfahren zur Herstellung eines anisotropen Magnetpulvers und eines gebundenen anisotropen Magneten daraus“. Deutschland Patent DE 10255604.
- [55] „EU,“ [Online]: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm.
- [56] U. Höpfner, J. Hanusch und U. Lamprecht, „Abwrackprämie und Umwelt - eine erste Bilanz,“ IFEU Heidelberg, Heidelberg, 2009.
- [57] C. Merz und G. Mehlhart, „Import und Export von Gebrauchtfahrzeugen in Europa,“ Öko-Institut, Darmstadt, 2012.
- [58] F.M. Firma Batrans, *Preisliste Transportkosten über verschiedene Distanzen*, 2014.

Anhang: Verzeichnisse

Formeln

B_R	Remanenz
$H_{C,J}$	Koerzitivfeldstärke
J	Polarisation
σ_c	Bruchfestigkeit
T_{Curie}	Curie-Temperatur

Liste der Abkürzungen

ADP	Elementarer Ressourcenverbrauch
AlNiCo	Aluminium-Nickel-Kobalt (alternative Magnetlegierung)
AP	Versauerungspotenzial
BEV	Battery Electric Vehicle (reines Elektrofahrzeug)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
C	Kohlenstoff
CED	Kumulierter Energieaufwand
Dy	Dysprosium
EoL	End-of-Life
EP	Eutrophierungspotenzial
ESMA	Elektronenstrahl-Mikroanalyse
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FIB	Focused Ion-Beam
GLOMO	Global Mobility Model
GWP	Treibhauspotential
HAST	Highly Accelerated Stress Test
HD	Hydrogen Decrepitation
HDDR	Hydrogen Disproportionation Desorption Recombination
IPM	Integrated Permanent Magnet (vergrabener Magnet)
LCA	LifeCycle Analysis (Lebenszyklusanalyse)
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
LSEO	Leichte Selten-Erd-Oxide
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NiMH	Nickel-Metallhydrid
O	Sauerstoff
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
POPC	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial
QZ	Querstromzerspaner
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SE	Seltene Erden
SEE	Selten-Erd-Element
SEO	Selten-Erd-Oxid
SiC	SiliziumCarbid
SmCo	Samarium-Kobalt (alternative Magnetlegierung)
SPM	Surface-mounted Permanent Magnet (Oberflächenmontierter Magnet)
SSEO	Schwere Selten-Erd-Oxide
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des Projektes MORE.....	7
Abbildung 2: Ergebnisse der Szenarien „Investor“ und „Operator“ für Bergwerksproduktion von Neodymoxid.....	9
Abbildung 3: Ergebnisse der Szenarien „Investor“ und „Operator“ für Bergwerksproduktion von Dysprosiumoxid.....	9
Abbildung 4: Vergleich der Nutzung von Neodym in den Jahren 2010 und 2030.....	10
Abbildung 5: Jährliche Neodym-Verbräuche und Minenproduktionen weltweit.....	11
Abbildung 6: Vergleich der Nutzung von Dysprosium in den Jahren 2010 und 2030.....	11
Abbildung 7: Jährliche weltweite Dysprosium Nachfrage- und Produktionsmengen.....	12
Abbildung 8: Stofffluss von Magneten in Computern [14], [15], [16].....	15
Abbildung 9: Gesetzliche Vorgaben zur Verwertung von Altfahrzeugen in der EU.....	16
Abbildung 10: Rotor, Elektroblech und Magnete (v.l.) eines Motors mit Oberflächenmagneten.....	23
Abbildung 11: Rotor, Rotorsegment und Magnete (v.l.) eines Motors mit integrierten Magneten.....	23
Abbildung 12: links: stark verschmutzter Rückläuferrotor, rechts: Bruchfläche eines nur äußerlich verschmutzten Magneten dieses Rotors.....	24
Abbildung 13: ausgebauter Rotor aus Fahrzeug-Dauerlauf (Laufleistung ca. 130.000 km).....	25
Abbildung 14: Vergleichende Diagramme der Messergebnisse (aus dem Rotor mit 70.000 km Laufleistung wurden 12 Magnete vermessen, aus den drei neuwertigen Rotoren wurden jeweils fünf Magnete vermessen), Quelle Daimler AG.....	26
Abbildung 15: Hysteresekurven eines oberflächenmontierten Magneten direkt nach der Demontage sowie nach der thermischen Entmagnetisierung und Reinigung.....	26
Abbildung 16: oben: RFA-Spektrum NdFeB; unten: RFA-Spektrum SmCo.....	28
Abbildung 17: LIBS – Spektren von NdFeB (rot) sowie SmCo (blau).....	29
Abbildung 18: Abschleudervorrichtung für Metallpartikel und Versuchsergebnisse.....	30
Abbildung 19: links: Abpressen der Rotorsegmente, rechts: mit abgepressten Segmenten neu aufgebauter Rotor.....	31
Abbildung 20: oben: Rotor nach Bandageentfernung mit beschädigten Magneten, unten: Magnetrückstände auf abgewickelter Bandage.....	32
Abbildung 21: Prinzipskizze des Abscherprozesses für oberflächenmontierte Magnete.....	32
Abbildung 22: Werkzeug für Vorversuche hinsichtlich Umsetzbarkeit und Kraftaufwand.....	32
Abbildung 23: Rotor mit schützender Lochblechhülse.....	33
Abbildung 24: Rotoren nach Entmagnetisierung im Ofen, teilweise mit Bandagierung.....	34
Abbildung 25: Magnetisierter Rotor nach Behandlung in Natronlauge und Entfernung der Bandagierung.....	34
Abbildung 26: Abschieben einzelner Teilblechpakete.....	35
Abbildung 27: Auspressstempel mit Stempelsätzen [44].....	36
Abbildung 28: Anforderungen an geeignete Entmagnetisierungsverfahren.....	36
Abbildung 29: Erwärmung im Durchlaufofen.....	37
Abbildung 30: Erwärmung durch Infrarotstrahlung.....	37
Abbildung 31: Erwärmung durch Bestromung.....	38
Abbildung 32: Erwärmung durch Induktion.....	38
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Bandage-Entfernung.....	39
Abbildung 34: CAD-Skizze der Abnahme von oberflächenbestückten Permanentmagneten.....	40
Abbildung 35: CAD-Modell (links) und realer Aufbau (rechts) des Demonstrators für Rotoren mit oberflächenbestückten Magneten.....	41
Abbildung 36: CAD-Modell einer Demonstrationsanlage für vergrabene Magnete [44].....	41
Abbildung 37: Auspressvorrichtung (links) und Sammelbehälter (rechts) für vergrabene Magnete....	42
Abbildung 38: Auspressvorrichtung für IPM und Abführung der Magnete mittels Rohrsystem.....	42
Abbildung 39: Schema für Sammlung auf zwei Bändern (links); Auspressplatte und Magnetabführung mittels Schräge (rechts).....	42
Abbildung 40: Sammelsystem zum Abtransport der Magnete auf einem Band.....	43

Abbildung 41: Zylinder mit spiralförmigen Transportbahnen [44]	43
Abbildung 42: Auspressstempel mit Stempelsätzen [44].....	44
Abbildung 43: CAD-Modell (links) und realer Aufbau (rechts) des Demonstrators für vergrabene Magnete	44
Abbildung 44: Ankunftszone der Magnete auf dem Drahtgurtgliederband (links) und Auswurf der entmagnetisierten Magnete (rechts).....	44
Abbildung 45: Ergebnisse der Festigkeitsmessungen für verschiedene Rotormagnete	46
Abbildung 46: FIB-Schnitt in Klebstoffrückstände sowie Magnetoberfläche	47
Abbildung 47: Gereinigte Magnete mit Rückständen in den Kerben (Bild verfremdet, Rückstände sind rot eingefärbt).....	48
Abbildung 48: Sammlung von Ausfall-Magneten vor und nach der Reinigung.....	50
Abbildung 49: Einschmelzen von Ausfall-Magneten im Vakuuminduktionsofen	50
Abbildung 50: Entmagnetisierungskurven bei 20 °C und 150 °C von Magneten mit 30 % Recyclingmaterial ($B_r(20\text{ °C}) = 1,09\text{ T}$, $H_{cJ}(150\text{ °C}) = 1180\text{ kA/m}$) und Magneten aus Rohstoffen ($B_r(20\text{ °C}) = 1,12\text{ T}$, $H_{cJ}(150\text{ °C}) = 1220\text{ kA/m}$).....	51
Abbildung 51: Aufmagnetisierungsverhalten von Magneten mit 30 % Recyclingmaterial (links) sowie von Magneten aus Rohstoffen (rechts) (Ziel: > 98 % der Sättigungsmagnetisierung bei einem Feld von 1800 kA/m)	52
Abbildung 52: Versuchsplan des zweiten Versuchsprogramms bei Andritz MeWa.....	55
Abbildung 53: Querstromzersetzer QZ 1600 der Firma ANDRITZ MeWa GmbH	56
Abbildung 54: links: Beispiel für Shredder-Input-Zusammensetzung; rechts: Zerkleinertes Material..	56
Abbildung 55: Rückstreuerelektronenbild (Z-Kontrast) der phosphatfreien Schlacke.....	62
Abbildung 56: Rückstreuerelektronenbild (Z-Kontrast) der Schlacke mit 1,33 Gew.-% P_2O_5	63
Abbildung 57: Rückstreuerelektronenbild (Z-Kontrast) der Schlacke mit 4,56 Gew.-% P_2O_5	63
Abbildung 58: Vereinfachtes Fließbild der entwickelten Prozesse. Die Oxalate können durch thermische Zersetzung bei 900 °C weiter in die Oxide umgewandelt werden, die Doppelsulfate durch Umsetzung mit konzentrierter Natronlauge in die Hydroxide.	65
Abbildung 59: Fällung der SEE mit Oxalsäure aus salzsaurer Lösung. Die Lösung wurde hergestellt, in dem Magnete bei einer Feststoffkonzentration von ca. 160 g/L in 6M HCl aufgelöst wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die SEE bevorzugt vor Eisen und Kobalt ausfallen.....	66
Abbildung 60: Fällung der SEE mit Natriumsulfat aus salzsaurer Lösung. Die Lösung wurde hergestellt, in dem Magnete bei einer Feststoffkonzentration von ca. 80 g/L in 3M HCl aufgelöst wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die LSEE bevorzugt vor den SSEE ausfallen.	66
Abbildung 61: Stabilitätsbereiche von Hämatit (Fe_2O_3), Goethit ($FeOOH$), Eisen(III)hydroxid ($Fe(OH)_3$) und Jarosit (Hydroxy salt) bei Fällung aus 0,5M Eisen(III)sulfatlösung [51].....	67
Abbildung 62: Verfahrensfliessbild des Solventextraktionsprozesses zur Trennung von Tb und Dy von Pr und Nd. Ein Recycling der Waschlösung wurde bisher noch nicht untersucht.	70
Abbildung 63: Einfluss des Gleichgewichts-pH-Wertes auf die Extraktion von Dy, Nd, Pr und Tb bei einem Phasenverhältnis A:O = 2,5:1 und einer Kontaktzeit von 60s	72
Abbildung 64: McCabe-Thiele Diagramm für die vollständige Extraktion von Dy bei pH 1.....	72
Abbildung 65: MEAB MSU 0,5 Mixer-Settler in einer vierstufigen Gegenstromanordnung.....	73
Abbildung 66: SEE-Konzentrationen der wässrigen Phase im Auslauf des Extraktionsexperimentes	73
Abbildung 67: Positionierung der kritischen Rohstoffe nach Versorgungsrisiko und wirtschaftlicher Bedeutung	81
Abbildung 68: Berechnung Rückläuferfahrzeuge.....	83
Abbildung 69: Prognostizierte Anzahl an Elektrofahrzeug-Neuzulassungen pro Jahr	83
Abbildung 70: Prognostizierte Anzahl an Rückläufern	83
Abbildung 71: Prognostizierte Menge an Magnetmaterial für das Recycling	84
Abbildung 72: Mögliche Erlöse durch SE-Oxid in Millionen € pro Jahr	85
Abbildung 73: Mögliche Demontage- und Logistikketten	86
Abbildung 74: Transportlogistik.....	87
Abbildung 75: Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den IPM-Motor.....	88

Abbildung 76: Kosten der möglichen Demontage- und Logistikketten für den SPM-Motor	89
Abbildung 77: Demontage- und Logistikketten für den IPM-Motor (Sensitivitätsanalysen).....	90
Abbildung 78: Demontage- und Logistikketten für den SPM-Motor (Sensitivitätsanalysen)	90
Abbildung 79: Ökonomische Betrachtung der einzelnen Demontageschritte für den IPM-Motor.....	91
Abbildung 80: Ökonomische Betrachtung der Magnetdemontage für den IPM-Motor.....	91
Abbildung 81: Ökonomische Betrachtung der einzelnen Demontageschritte für den SPM-Motor	92
Abbildung 82: Ökonomische Betrachtung der Magnetdemontage für den SPM-Motor	92
Abbildung 83: Investitionskosten Magnetaufbereitungsanlage.....	93
Abbildung 84: Personalkosten nach Schicht-Betrieb	94
Abbildung 85: Kosten für Chemikalien pro kg Magnetmaterial.....	94
Abbildung 86: Kosten und Erlöse für das gesamte Magnetrecycling.....	95
Abbildung 87: Wirtschaftlichkeit für die Magnetaufbereitung bei chinesischen- bzw. Weltmarktpreisen	96
Abbildung 88: Kosten und Erlöse des Magnetrecyclings für den IPM-Motor.....	96
Abbildung 89: Kosten und Erlöse bezogen auf prognostiziertes Marktvolumen.....	97
Abbildung 90: Rücknahmekette für Altprodukte.....	99
Abbildung 91: Herstellung und Nutzungsphase von Produkten sowie Schnittstellen von Rücknahme und Produktion.	100
Abbildung 92: Impression World Café zur Erstellung der Roadmap.....	101
Abbildung 93: MORE-Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft.....	102
Abbildung 94: MORE-Roadmap zur künftigen Kreislaufwirtschaft (fortgesetzt)	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens:	3
Tabelle 2: Liste der Zwischenergebnisse und Meilenstein	6
Tabelle 3: Globale Produktionszahlen für SE-Magnete.....	13
Tabelle 4: Deutsche Selten-Erd-Importe und -Exporte 2009 – 2012 (ohne Halbzeug und Waren;[11])	14
Tabelle 5: Motorenproduktion in Deutschland [14].....	15
Tabelle 6: Möglichkeiten zum Recycling von Neodym(oxid) in unterschiedlichen Anwendungen und für das Recycling relevante Eigenschaften (grün = günstig, gelb = neutral, rot = ungünstig)	19
Tabelle 7: Möglichkeiten zum Recycling von Neodym in unterschiedlichen Magnetanwendungen	20
Tabelle 8: Vergleichsmessungen von Daimler an Magneten mit 30% Recyclingmaterial.....	52
Tabelle 9: Materialübersicht.....	53
Tabelle 10: Qualitative Bewertung von verschiedenen Technologien zum Aufschließen von Motorkomponenten; Bewertung: 10 = maximal erreichbare Punktzahl pro Kriterium.....	54
Tabelle 11: Massenbilanz QZ-Versuch	58
Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung der drei untersuchten Schlacken (nur relevante Elemente). Alle Werte in Gew.-%.....	61
Tabelle 13: Typische Zusammensetzungen des Goethits und des Kobaltsulfids nach Trocknung bei 105 °C.....	68
Tabelle 14: Typische Zusammensetzungen der SEE-Konzentrate gewonnen durch Oxalatfällung bzw. fraktionierte Fällung. Alle Konzentrate sind durch Glühen bei 900 °C für eine bessere Vergleichbarkeit in die Oxide überführt worden. Die Oxide wurden als Dy ₂ O ₃ , Nd ₂ O ₃ , Pr ₂ O ₃ , Tb ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , CaO, CoO, Cr ₂ O ₃ , CuO, Fe ₂ O ₃ , MnO, Na ₂ O und PbO berechnet.....	69
Tabelle 15: Zusammensetzung der wässrigen Phase nach Eisen- und Kobaltfällung	71
Tabelle 16: Werkstoffzusammensetzung der generischen Elektromotoren	84
Tabelle 17: Erlöse Pkw-Schrott und Metalle in Euro pro Kilogramm	85
Tabelle 18: Personalkosten	86
Tabelle 19: Demontagezeiten für E-Motor Komponenten	87
Tabelle 20: Transportkosten	87