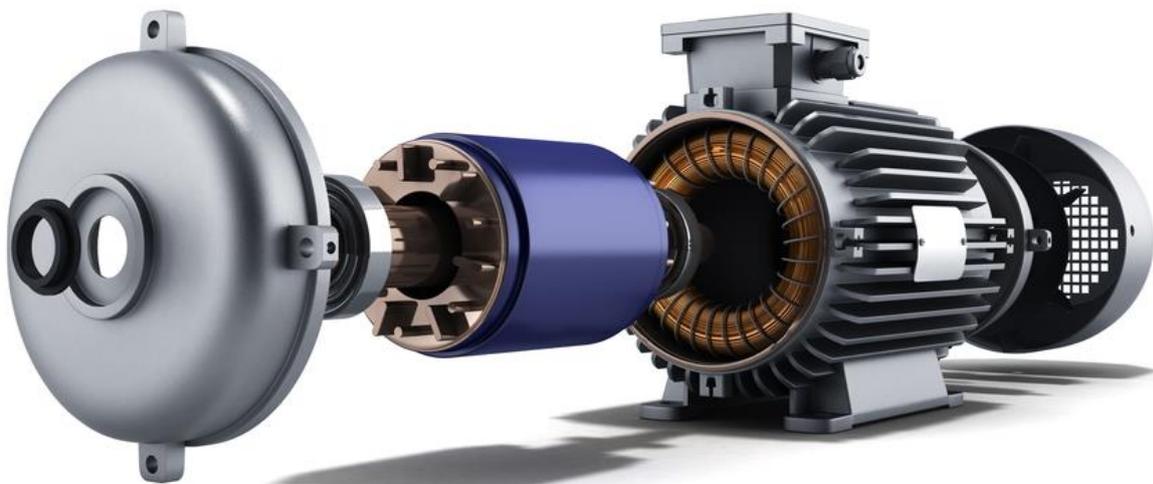


Recycling grüner Zukunftstechnologien

Skalierung durch marktorientierte Regulierung - Eine Analyse am Beispiel der Seltenerd-Permanentmagnete

André Wolf



© shutterstock/NosorogUA

Die Umstellung auf emissionsarme Zukunftstechnologien bringt Europas Wirtschaft in einen temporären Zielkonflikt zwischen Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit. Eine Kreislaufwirtschaft für „Net-Zero“-Technologien stellt einen vielversprechenden Ausweg aus dem Dilemma dar. Doch deren Entwicklung steckt noch in den Kinderschuhen. Ohne regulatorische Impulse droht sie an der Henne-Ei-Problematik zwischen Recycling und Infrastruktur zu scheitern. Dieser ceplnput untersucht am Beispiel der für Windkraft und Elektromobilität zukünftig essenziellen Seltenerd-Permanentmagnete die konkreten Handlungsbedarfe und gibt Empfehlungen.

Kernthesen:

- ▶ Zur Erhöhung der Effizienz von Sammlung und Demontage sollten **Vorgaben zum verbesserten Informationsaustausch** der Akteure in den Lieferketten gesetzt werden. Mittelfristig sollte auf die Standardisierbarkeit von Demontageprozessen hingewirkt werden.
- ▶ Zur Unterstützung des Hochlaufs von Recycling-Kapazitäten sollte **statt kostentreibender Recyclate-Quoten ein marktorientiertes Prämiensystem** eingeführt werden.
- ▶ Die Vielfalt an gegenwärtig erforschten Recycling-Technologien bietet Potenziale für passgenaue Lösungen. **Fördersysteme sollten deshalb möglichst technologie-neutral ausgestaltet sein.**

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	3
2	Lieferketten grüner Zukunftstechnologien	4
2.1	Strategische „Net-Zero“-Technologien	4
2.2	Status Quo von Recycling-Aktivitäten	6
3	Eine Kreislaufwirtschaft für grüne Technologien	7
3.1	Bestehende Markthemmnisse	7
3.2	Ökonomische Argumente für staatliche Förderung	9
3.3	Regulatorische Instrumente	11
4	Detailanalyse für Seltenerd-Permanentmagnete	13
4.1	Technische Beschreibung	13
4.2	Marktentwicklung	14
4.3	Technologien der Wiederverwertung	18
4.4	Rentabilität des Recyclings	21
4.5	Ansätze für eine zielgerichtete Förderung	24
4.6	Permanentmagnete-Recycling in den Gesetzesplänen der Kommission	27
5	Fazit	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Hürden in der Verwertungskette von EoL-Produkten	9
Abbildung 2:	Verteilung globale Nachfrage nach NdFeB-Magneten	15
Abbildung 3:	Prognosen zum Recycling-Potenzial von NdFeB-Magneten	16
Abbildung 4:	Stilisierte Kosten entlang der Lieferkette von Seltenerd-Permanentmagneten	21
Abbildung 5:	Kostenstruktur eines hydrometallurgischen Recyclings von NdFeB-Magneten	23
Abbildung 6:	Recycling-Hemmnisse bei Permanentmagneten	24

1 Hintergrund

Europas Streben nach Resilienz ist neben den erforderlichen Ressourcen und Kompetenzen auch ein Koordinationsspiel. Klimaneutralität und Versorgungssicherheit als zentrale strategische Ziele sind nur zusammenzubringen, wenn es gelingt, gemeinsam mit Partnern verlässliche neue Lieferketten für ein ganzes Bündel an grünen Zukunftstechnologien aufzubauen. Ohne eigene wettbewerbsfähige Produktion von Lithium-Batterien, Elektromotoren oder Windkraft-Turbinen käme die EU im post-fossilen Zeitalter wirtschafts- wie sicherheitspolitisch vom Regen in die Traufe. Dafür ist der gesicherte Zugang zu schonend gewonnenen und zugleich bezahlbaren Ressourcen unverzichtbare Voraussetzung.

Das Recycling der in Zukunftstechnologien enthaltenen seltenen Metalle wie Lithium, Kobalt oder der Gruppe der Seltenerdmetalle hat alles Potenzial, hierfür einen wichtigen Beitrag zu leisten. Nicht nur können auf diesem Wege schwer substituierbare Rohmaterialien theoretisch beliebig oft und ohne Qualitätsverluste wiederverwertet werden. Recycling ist auch eine nachhaltige Ergänzung zu einem mit Umwelt- und Akzeptanzrisiken behafteten heimischen Bergbau. Und der Rohstoffschatz liegt direkt vor unseren Augen, in einer Vielzahl an Produktions- und Konsumgütern, die unseren Alltag prägen. Ein Übergang in die Kreislaufwirtschaft bei grünen Zukunftstechnologien eliminiert so die Abhängigkeitsverhältnisse der linearen Fertigung und wird zum Gebot für strategische Souveränität.

Der Aufbau signifikanter Recycling-Kapazitäten wird jedoch einige Zeit in Anspruch nehmen. Denn im Hinblick auf ihr Rohstoffpotenzial zentrale Technologien wie Windkraft und Elektromobilität befinden sich erst am Beginn der Skalierungsphase und sind durch lange Nutzungsdauern gekennzeichnet. Der Entwicklungsstand der Recycling-Verfahren hat in vielen Fällen noch nicht das Stadium der Marktreife erreicht. Und auch mangelnde Koordination und unzureichender Informationsfluss entlang der Lieferketten stehen einer effektiven Wiederverwertung derzeit noch im Wege. Damit zukünftige Potenziale ausgeschöpft werden können, müssen in Europa jetzt die richtigen Rahmenbedingungen für den Markthochlauf einer Recyclingwirtschaft für grüne Technologien gesetzt werden. Das beinhaltet auch, aber längst nicht nur, Formen direkter Förderung. Der Aufbau einer effizienten Recycling-Infrastruktur erfordert dezentrale Kooperation von sämtlichen Akteuren in der Lieferkette – mit dem Staat in der Rolle als Katalysator. Die Europäische Kommission hat unlängst mit Ihren Vorschlägen für einen *Critical Raw Materials Act*¹ sowie einen *Net Zero Industry Act*² wichtige Impulse in diese Richtung gesetzt. Diese müssen aber konkretisiert und in ihrer Anreizwirkung geschärft werden.

Dieser cepInput identifiziert Recycling-Potenziale und bestehende Hemmnisse bei grünen Zukunftstechnologien, mit einem Fokus auf die für Windkraft und Elektromobilität zukünftig unverzichtbaren Seltenerd-Permanentmagnete. Zunächst erfolgt in Abschnitt 2 eine Status Quo-Betrachtung der Lieferketten zentraler grüner Technologien, mit einem Fokus auf die Rohstoffsituation und gegenwärtige Recycling-Aktivitäten. Abschnitt 3 beschäftigt sich allgemein mit den beim Aufbau einer Kreislaufwirtschaft für grüne Technologien zu überwindenden ökonomischen Hemmnissen und präsentiert eine Übersicht möglicher regulatorischer Instrumente. Abschnitt 4 untersucht im Detail Recycling-

¹ European Commission (2023a). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (COM(2023) 160 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>

² European Commission (2023b). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act) (COM(2023) 161 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0161>

Potenziale und -Hemmnisse für die Technologie der Seltenerd-Permanentmagnete. Daraus entwickelt er Empfehlungen für eine zielgerichtete Förderung und stellt diese abschließend den aktuellen Gesetzesvorschlägen der Kommission gegenüber.

2 Lieferketten grüner Zukunftstechnologien

2.1 Strategische „Net-Zero“-Technologien

Es herrscht allgemein Einigkeit, dass Europa nur durch komplementären Einsatz einer Vielzahl an jungen Technologien langfristig klimaneutral werden kann. Verfahren zur Gewinnung von Energien aus regenerativen Quellen stellen dabei nur den Ausgangspunkt dar. Um die Energie auch effizient nutzen zu können, bedarf es Technologien des Transports, der Zwischenspeicherung und der sektorübergreifenden Verteilung. Gegenwärtig diskutierte Technologien unterscheiden sich in ihrem Entwicklungsstadium, aber auch in den Versorgungsrisiken, die aus externen Abhängigkeiten in der Beschaffung notwendiger Rohstoffe oder Zwischenprodukte resultieren. Inwieweit die Existenz EU-interner Lieferketten im Einzelfall von strategischer Bedeutung ist, ist schwierig zu bewerten.

Die Europäische Kommission hat jüngst mit ihrem Vorschlag für einen *Net Zero Industry Act* eine Liste an strategischen „Net-Zero“-Technologien vorgelegt. Die insgesamt acht Technologien wurden auf Basis von drei Kriterien ausgewählt: Technologischer Reifegrad, erwarteter Beitrag zu den EU-Emissionszielen bei Treibhausgasen, gegenwärtige Import-Abhängigkeit. Erfasst werden dabei jeweils nicht nur die mit einer Technologie verbundenen Endprodukte, sondern auch wichtige Vorleistungen in der Produktion.³ Die Liste ist Gegenstand des laufenden Gesetzgebungsprozesses und wird auf dem Weg zur politischen Einigung höchstwahrscheinlich noch Veränderungen erfahren. Aber der Entwurf hat insofern den Rahmen abgesteckt, als dass - neben der energiesystemischen Bedeutung der Technologien - die Kritikalität der Versorgungswege zum wesentlichen Parameter im Auswahlprozess wird.

Tabelle 1 stellt Anwendungsfelder und Input-Bedarfe für die von der Kommission ausgewählten Technologien dar. **Sie haben gemeinsam, dass sie nicht nur von der Bereitstellung einer Vielzahl an wissens- und kapitalintensiv hergestellten Komponenten, sondern auch von als kritisch bewerteten Mineralrohstoffen abhängen.** Bei einzelnen Technologien wie Batteriespeicher und Windenergie ist es ein ganzes Bündel an kritischen Rohstoffen, das in der Fertigung gegenwärtig nur schwer oder gar nicht ersetzbar ist. Die Kommission möchte zukünftig Projekte zur Erhöhung der EU-internen Fertigungskapazitäten in diesen Feldern bei Genehmigungsverfahren und beim Zugang zu öffentlichen Fördermitteln priorisieren.

Die Marktpositionen Europas bei den ausgewählten Technologien stellen sich gegenwärtig als sehr unterschiedlich dar, sowohl im Hinblick auf die Produktion als auch die Patentaktivitäten. Tabelle 2 fasst die Einschätzungen der Kommission zur Marktlage zusammen. Während die EU bei der Produktion von Windkraft-Turbinen und Biomethan (noch) als Weltmarktführer bezeichnet werden kann, kommt sie etwa bei der Lithium-Batterie- und der Solarmodul-Produktion auf globale Marktanteile von deutlich weniger als 10 %. Bezüglich der Innovationskraft hat sie zudem an den Patentzahlen gemessen bei einigen Technologien an Boden verloren. Als globaler Technologieführer wird die EU gegenwärtig nur noch im Fall von Wärmepumpen eingestuft.⁴ Der komplementäre Einsatz der Technologien macht

³ Vgl. European Commission (2023b).

⁴ European Commission (2023c). Investment needs assessment and funding availabilities to strengthen EU's Net-Zero technology manufacturing capacity. Commission Staff Working Document. SWD(2023) 68.

bereits Anteilsverluste auf einzelnen Märkten potenziell systemkritisch: Unterentwickelte Technologiefelder werden zur Limitation für das übergeordnete Resilienz-Ziel.

Tabelle 1: Charakteristika strategischer „Net-Zero“-Technologien (Kommissionsvorschlag)

Bezeichnung Technologie	Output		Inputs		Systemische Rolle in der grünen Transformation
	Art	Anwendungsfelder	Zentrale Komponenten	Kritische Mineralrohstoffe ⁵	
Batteriespeicher	Elektrische Energie	Sämtliche Sektoren	Anode, Elektrolyt, Kathode	Grafit, Kobalt, Kupfer, Lithium, Mangan, Nickel, Niobium, Phosphor, Silizium, Titan	Verbesserte Synchronisation von Energie-Angebot und -Nachfrage
CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung	Gespeichertes CO ₂	Energiesektor, Industrie	Kompressor, Pipelines	Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel	Vermeidung von CO ₂ -Emissionen in die Atmosphäre, Senkung CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre (Direct Air Capture)
Fortgeschrittene Biokraftstoffe	Kinetische Energie	Verkehr	Prozessoren, Pumpen, Speicherbehälter	Kupfer, Nickel	Nutzung regenerativer Energiequellen im Verkehrssektor
Netztechnologien	Energietransport	Energiesektor	Messgeräte, Stromkabel, Umspannwerke	Kupfer, Nickel	Verbesserte Synchronisation von Energie-Angebot und -Nachfrage
Solar-Photovoltaik	Elektrische Energie	Sämtliche Sektoren	Solarzellen	Bor, Gallium, Kupfer, Nickel, Silizium	Emissionsarme Bereitstellung von Energie
Wärmepumpen	Wärme	Gebäudebeheizung, Industrie	Kompressor, Kondensator, Verdampfer	Fluorit, Kupfer, Nickel, Platingruppe, Silizium	Ausweitung Nutzungsmöglichkeiten EE-Strom durch Sektorkopplung
Wasser-Elektrolyse	Wasserstoff	Industrie (v.a. Chemie, Stahl), Verkehr	Anode, Elektrolyt, Kathode	Grafit, Kobalt, Kupfer, Nickel, Platingruppe, Seltenerdmetalle (u.a. Scandium, Yttrium), Strontium	Ausweitung Nutzungsmöglichkeiten EE-Strom durch Sektorkopplung
Windenergie	Elektrische Energie	Sämtliche Sektoren	Generator, Getriebe, Rotorblätter	Bor, Kupfer, Mangan, Niobium, Seltenerdmetalle (u.a. Dysprosium, Neodym), Silizium	Emissionsarme Bereitstellung von Energie

Quellen: European Commission (2023a); JRC (2023)⁶; Marscheider-Weidemann et al. (2021)⁷; Eigene Darstellung.

Tabelle 2: Marktsituation bei strategischen „Net-Zero“-Technologien (Kommissionsvorschlag)

Bezeichnung Technologie	Produktion		Globaler Technologieführer	Innovation	
	Betrachtetes Industrieprodukt	Globaler Anteil EU-Produktion: Status Quo		Globaler Anteil EU-Patente: Status Quo	Globaler Anteil EU-Patente: Trend
Batteriespeicher	Lithium-Ionen-Batterie	Relativ gering	Japan	Relativ gering	Stabil
CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung	CCS-Technologien allgemein	Hoch	USA	Hoch	Sinkend
Fortgeschrittene Biokraftstoffe	Biomethan	Weltmarktführer	USA	Hoch	Leicht sinkend
Netztechnologien	Smart Meter	Hoch	k.A.	k.A.	k.A.
Solar-Photovoltaik	Solarmodul	Gering	Japan	Gering	Leicht sinkend
Wärmepumpen	Wärmepumpe	Hoch	EU	Sehr hoch	Stabil
Wasser-Elektrolyse	Elektrolyseur	Relativ hoch	Japan	Hoch	Leicht steigend
Windenergie	Windkraft-Turbine	Weltmarktführer	China	Hoch	Sinkend

Quelle: European Commission (2023c); Eigene Darstellung.

⁵ Gemäß Vorschlag der Kommission für ein Update der Liste kritischer Rohstoffe (European Commission, 2023a). Die Kritikalität wird auf Basis von zwei indikatorgestützten Kriterien ermittelt: Ökonomische Bedeutung und Versorgungsrisiko.

⁶ JRC (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Joint Research Centre of the European Union. Luxembourg. doi:10.2760/334074, JRC132889.

⁷ Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Rückschloss, J.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Ter-cero Espinoza, L.; Tippner, M. (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. DERA Rohstoffinformationen 50, Berlin.

2.2 Status Quo von Recycling-Aktivitäten

Europas Abhängigkeit von externen Rohstoffquellen und sein begrenztes Gewicht auf internationalen Technologie-Märkten lassen den Blick auf alternative interne Versorgungswege richten. Recycling-Prozesse bieten die Möglichkeit, die in Europa kursierenden Endprodukte als Rohstoffquelle für eigene Fertigungskapazitäten zu nutzen. Die Versorgungssicherheit kann so erhöht werden, ohne dass hierfür bestehende internationale Lieferketten komplett repliziert werden müssten. Bei den für strategische Technologien benötigten kritischen Rohstoffen handelt es sich zudem weitüberwiegend um Metalle. Deren Beständigkeit bildet die Grundlage für eine potenziell hohe Recycling-Effizienz.⁸

Die Kommission untersucht im Rahmen ihrer Kritikalitätsbewertung auch regelmäßig den Status-Quo der Recycling-Aktivitäten in der EU. Dazu nutzt sie als Indikator die End-of-Life Recycling-Input-Rate. Sie soll den Anteil der gesamten EU-Nachfrage nach einem Rohstoff ausdrücken, der aus EU-internen Sekundärquellen befriedigt werden kann. Da die Höhe der Nachfrage auf Basis bestehender Erhebungen nicht direkt gemessen werden kann, wird sie indirekt als Summe der EU-intern genutzten Rohstoffe aus EU-Quellen und der Rohstoff-Importe in die EU gemessen.⁹ Die Präzision dieses Indikators wird kontrovers diskutiert¹⁰, für die in strategischen Technologien eingesetzten kritischen Rohstoffe zeigt sich aber ein eindeutiges Bild (siehe Tabelle 3). Demnach ist der Anteil EU-interner Sekundärgegewinnung am Rohstoffverbrauch gegenwärtig mit wenigen Ausnahmen (Kupfer, Kobalt, Nickel) gering bis sehr gering ausgeprägt, wird bei fünf Rohstoffen (Gallium, Lithium, Niobium, Phosphor, Strontium) sogar auf null geschätzt. Auch bei den vielfältig eingesetzten Seltenerdmetallen ist er nahezu bedeutungslos. Die geringsten Recycling-Aktivitäten werden dabei für solche Rohstoffe gemessen, bei denen auch allgemein die Import-Abhängigkeit besonders stark ausgeprägt ist. Das macht eine nähere Untersuchung der Gründe für den geringen Entwicklungsstand der Recycling-Systeme äußerst wichtig.

Tabelle 3: Recycling-Input-Raten und Import-Abhängigkeit bei kritischen Mineralrohstoffen

Rohstoff	Import-Abhängigkeit ¹¹	Recycling-Input-Rate	Rohstoff	Import-Abhängigkeit	Recycling-Input-Rate
Bor	100%	1%	Mangan	96%	9%
Gallium	98%	0%	Nickel	75%	16%
Germanium	42%	2%	Niobium	100%	0%
Fluorit	60%	1%	Phosphor	100%	0%
Grafit	99%	3%	Platingruppe	96%	12%
Kobalt	81%	22%	Schwere Seltenerdmetalle	100%	1%
Kupfer	48%	55%	Silizium	64%	1%
Leichte Seltenerdmetalle	100%	1%	Strontium	0%	0%
Lithium	100%	0%	Titan	100%	1%

Quelle: European Commission (2023d)¹².

⁸ Hagelüken, C. (2014). Recycling of (critical) metals. Critical metals handbook, 41-69.

⁹ Eurostat (2023). Contribution of recycled materials to raw materials demand - end-of-life recycling input rates (EOL-RIR) (cei_srm010) – Metadata. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_srm010_esmsip2.htm

¹⁰ Arduin, R. H., Mathieux, F., Huisman, J., Blengini, G. A., Charbuillet, C., Wagner, M., ... & Perry, N. (2020). Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE: Focus on screens. Resources, Conservation and Recycling, 157, 104772.

¹¹ Berechnet als: (Importe – Exporte) / (EU-Produktion + Importe – Exporte).

¹² European Commission (2023d). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>

3 Eine Kreislaufwirtschaft für grüne Technologien

3.1 Bestehende Markthemmnisse

Die Wiederverwertung der in grünen Zukunftstechnologien enthaltenen Rohmaterialien kann eine ähnlich große Zahl an einzelnen Prozessschritten erforderlich machen wie die Primärproduktion. Dementsprechend komplex und kleinteilig sind die Herausforderungen beim Aufbau eines Recycling-Systems. Die Heterogenität der grünen Technologien führt zu stark produktspezifischen Problemen und erschwert die Entwicklung einer allgemeinen Kreislaufwirtschaftsstrategie. Grundsätzlich lassen sich produktübergreifend vier potenzielle Problembereiche ausmachen: Das Angebot an End-of-Life (EoL) Produkten, die Sammlung und Übermittlung der EoL-Produkte in die Systeme der Wiederverwertung, die angemessene Sortierung und Allokation der in den Produkten enthaltenen kritischen Rohmaterialien sowie die ökonomische Effizienz der Wiederverwertung (siehe Abbildung 1). Jeder dieser Bereiche ist mit charakteristischen Hemmnissen verbunden, die produktabhängig mehr oder weniger stark ausgeprägt sein können. Die teilweise stark ausgeprägte Arbeitsteilung bei den Schritten zur Wiederverwertung erhöht die Komplexität der regulatorischen Aufgabe. Für den Aufbau einer tragfähigen Recycling-Ökonomie reicht es nicht aus, die Effizienz des Gesamtsystems zu erhöhen, es müssen auch ausreichende individuelle ökonomische Anreize für alle Akteure im System geschaffen werden.

1. Zeitverzögertes Angebot an EoL-Produkten

Bei den diskutierten Technologien handelt es sich produktseitig um relativ langlebige Gebrauchsgüter. Das starke Nachfragewachstum, das für viele dieser Produkte prognostiziert wird¹³, schlägt sich erst mit teilweise deutlicher Verzögerung in einem wachsenden Angebot an EoL-Produkten nieder. Die Wiederverwertung kann zu Anfang also nur wenig zur Befriedigung der rasch steigenden Nachfrage beitragen. Das birgt die Gefahr, dass im Interesse einer schnellen Lösung Kapital zunächst relativ einseitig in andere, auf Primärrohstoffe setzende Versorgungswege gelenkt wird. Der zeitliche Nachteil beim Aufbau von Kapazitäten könnte – in Abwesenheit spezifischer Förderung – aufgrund der Fixkostenproblematik (siehe Punkt 4) den Weg von Recycling-Technologien in die Wettbewerbsfähigkeit erschweren und so den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft für grüne Technologien auch langfristig behindern.

2. Unzureichende Sammelquoten

Die erste praktische Herausforderung bei der Verwertung ist die Sicherung der Zukunftstechnologien einsetzenden Produkte nach Ablauf ihrer Nutzungsphase. Dabei ist zwischen Konsumprodukten und in Industrie oder Energiewirtschaft eingesetzten Produktionsmitteln zu unterscheiden. Bei den relevanten Konsumprodukten handelt es sich in erster Linie um Elektronikprodukte (Mobiltelefone, Fernseher, IT-Ausstattung etc.) sowie Haushaltsgeräte. Verbraucherseitig sind ausreichende Anreize für eine sachgerechte Entsorgung von Elektroschrott erforderlich. Bei Elektrogeräten liegen die Kosten für den Verbraucher tendenziell höher als bei Haushaltsabfällen, da zusätzliches Wissen erforderlich ist (Lage von Depotcontainern, Wertstoffhöfen) und ein höherer Zeitaufwand entsteht.¹⁴ Mit der WEEE-

¹³ Vgl. Marscheider-Weidemann et al. (2021).

¹⁴ Otto, S., Henn, L., Arnold, O., Kibbe, A. (2015). Die Psychologie des Recyclingverhaltens. In: Recycling und Rohstoffe – Band 8. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.

Richtlinie 2012/19/EU hat die EU den Mitgliedstaaten das Ziel aufgetragen, die Sammelquoten¹⁵ bei Elektroschrott zu erhöhen, ab 2019 auf einen Wert von mindestens 65%.¹⁶ Dieser Wert wurde 2020 im EU-Durchschnitt deutlich verfehlt (46%), lediglich drei Mitgliedstaaten (Bulgarien, Finnland, Kroatien) überschritten die 65%-Marke.¹⁷ Neben der unsachgemäßen heimischen Entsorgung stellt der illegale Export von Elektronikschrott zur billigen Entsorgung Richtung Länder wie China einen wesentlichen Teil des Problems dar.¹⁸ Zu niedrige Sammelquoten senken nicht nur unmittelbar das Potenzial an Recyclaten, sondern tragen auch zur Verstärkung der Fixkostenproblematik (siehe Punkt 4) bei. Aktuelle Forschung zu Elektroschrott zeigt einen stabilen positiven Zusammenhang zwischen der Menge an gesammelten EoL-Produkten und der Höhe der Recyclingrate in einem Land.¹⁹

3. Mangelnde Koordination bei der Stofftrennung

Im Anschluss an die Sammlung bedarf es eines effizienten Systems der Sortierung und Entnahme/Demontage, dass die rohstoffreichen Abfälle nach der Art ihrer Verwertbarkeit trennt und nicht verwertbares Material aussortiert. Die Separierung kritische Rohstoffe enthaltender Komponenten kann dabei erforderlich sein, um deren anschließende Wiedergewinnung zu ermöglichen. Die bei der Separierung auftretenden technischen Hürden und Kostenhemmnisse sind stark produktspezifisch. Vielfalt im Produktdesign und unzureichender Informationsaustausch über Produkteigenschaften stellen Unsicherheitsfaktoren dar und können zum Kostentreiber in der Demontage werden. Kapitel 4 erläutert die Problematik näher anhand des Beispiels der Seltenerd-Permanentmagnete. Unzureichende oder unsachgemäße Separierung kann die Effizienz nachfolgender Recycling-Prozesse stark beeinträchtigen, sowohl im Hinblick auf die Art an wiedergewinnbaren Ressourcen als auch deren Qualität/Reinheitsgrad.

4. Technologische Vielfalt und Komplexität der Wiederverwertung

Unterschiede im Produktdesign betreffen auch die chemische Zusammensetzung, und damit die Frage, mit welchen Mitteln welche Rohstoffe für die Wiederverwertung erschlossen werden können. Die große Variabilität im Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien ist hierfür ein gutes Beispiel.²⁰ Das erschwert in der Folge die Standardisierung von Recycling-Prozessen. Im Zusammenhang mit der typischen Kostenstruktur von Verfahren zum Recycling seltener Metalle führt das zu einem Wirtschaftlichkeitsproblem. Sie sind typischerweise durch hohe Fixkosten (Arbeit, Kapital) gekennzeichnet, was starke Größenvorteile impliziert. Der Einsatz lohnt sich kostenseitig erst bei großen Mengen an verwertbaren Stoffen.²¹ Zusätzlich erschwert wird das Upscaling durch die technologische Vielfalt bei den Recycling-

¹⁵ Die Sammelquote ist definiert als das Verhältnis des Gesamtgewichts der in einem Jahr gesammelten Elektroaltgeräte zum gemittelten Gesamtgewicht der in den drei Vorjahren in den Verkehr gebrachten Elektrogeräte.

¹⁶ European Union (2018). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012L0019-20180704>

¹⁷ Eurostat (2023). Waste statistics – electrical and electronic equipment. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment#cite_note-1

¹⁸ Illés, A., & Geeraerts, K. (2016). Illegal Shipments of E-waste from the EU to China. Fighting environmental crime in Europe and beyond: The role of the EU and its member states, 129-160.

¹⁹ Boubellouta, B., & Kusch-Brandt, S. (2022). Driving factors of e-waste recycling rate in 30 European countries: new evidence using a panel quantile regression of the EKC hypothesis coupled with the STIRPAT model. Environment, Development and Sustainability, 1-28.

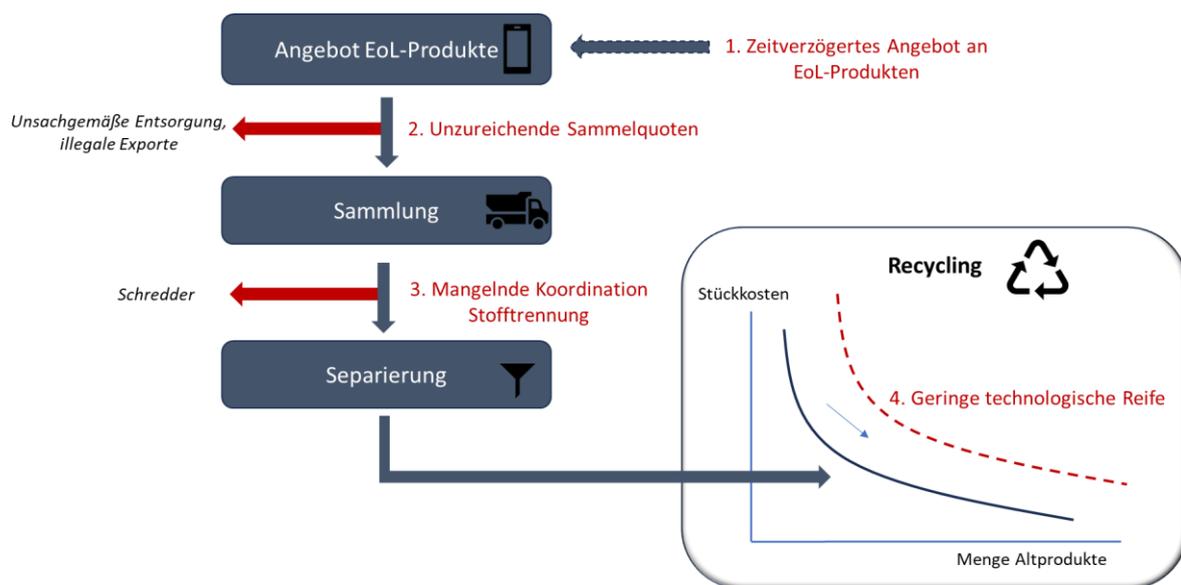
²⁰ Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J., Heidrich, O., ... & Offer, G. (2021). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. Iscience, 24(7), 102787.

²¹ KU Leuven (2022). Metals for clean energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. Report for Eurometaux.

Verfahren selbst. Die Technologien können sich im Hinblick auf Kostenstruktur und Recycling-Output erheblich unterscheiden, wie z.B. der Vergleich hydro- und pyrometallurgischer Verfahren zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zeigt.²² Da sich viele dieser Technologien noch in einem frühen Entwicklungsstadium mit unsicherer Aussicht auf zukünftige Effizienzsteigerungen befinden, entstehen hohe Informationskosten bei der Technologiewahl. Einnahmeseitig stellen zudem Preisschwankungen an den Märkten der besonders lukrativen seltenen Metalle sowie die Gefahr der mittelfristigen Materialsubstitution (Beispiel: Trend zur Senkung der Kobaltintensität von Lithium-Ionen-Batterien²³) besondere Risikofaktoren für Recycling-Unternehmen dar.

Die in den einzelnen Stufen bestehenden Probleme verstärken sich über den Kostenzusammenhang z.T. wechselseitig. Dahinter steht die klassische Henne-Ei-Problematik. Ohne eine etablierte Infrastruktur der Kreislaufwirtschaft gelangen zu geringe Mengen an EoL-Produkten zu spezialisierten Recyclern, was ein Wirtschaftlichkeitsproblem auslöst. Das hemmt wiederum die technologische Entwicklung geeigneter Recycling-Verfahren (geringer Erfahrungsgewinn, geringe Anreize zur F&E-Investition). Die niedrige Recycling-Effizienz senkt in der Folge private Anreize zum Aufbau einer Recycling-Infrastruktur. Als Lösung kommt nur ein externer Impuls in Frage, der wohlfahrtsökonomisch allerdings zunächst der Rechtfertigung bedarf.

Abbildung 1: Hürden in der Verwertungskette von EoL-Produkten



Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 Ökonomische Argumente für staatliche Förderung

Ein wesentliches Argument für die staatliche Förderung eines Recycling-Systems bei grünen Zukunftstechnologien stellt die Vermeidung externer Kosten dar. Diese bestehen unmittelbar in den **vermiedenen Umweltschäden aus Abbau und Verhüttung von Primärrohstoffen**. Das betrifft im besonderen Maße kritische Rohstoffe wie Lithium und Seltenerdmetalle. So können mit den Vorkommen häufig

²² Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J., Heidrich, O., ... & Offer, G. (2021). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *Iscience*, 24(7), 102787.

²³ Ganesh, A., Subramaniam, P., Kaur, A., & Vaidyanathan, L. (2021). Comparison of hydrometallurgical and hybrid recycling processes for lithium-ion battery: an environmental and cost analysis. Working paper.

vergesellschaftete Giftstoffe wie Arsen oder Quecksilber ein Umweltrisiko darstellen, vor allem wenn eine Kontamination des Grundwassers nicht ausgeschlossen werden kann.²⁴ Im Falle von Lithium kann je nach geologischen Bedingungen auch ein hoher Wasserverbrauch als Problem hinzukommen.²⁵ Umweltanalysen des chinesischen Seltene-Erden-Bergbaus benennen als Probleme die Entstehung von Giftmüll durch Nutzung chemischer Reaktionsmittel, die Radioaktivität des freigesetzten Thoriums, sowie die Emission von CO₂, Schwefeldioxid und Ammoniak.²⁶ Ein Versuch, diese Vielfalt an Effekten in einen Wohlfahrtsschaden umzurechnen, kommt immerhin auf eine Größenordnung von umgerechnet 4-5 Euro pro kg Seltenerdmetalle,²⁷ eine in Relation zu den Marktpreisniveaus vieler Seltenerdmetalle beträchtliche Summe.²⁸ Die erwarteten Schäden eines möglichen Austritts von radioaktivem Material sind hier mangels Messbarkeit noch gar nicht berücksichtigt. Vergleichende Untersuchungen zu den Umweltwirkungen der Primär- und Sekundärgewinnung kritischer Rohstoffe kommen auf deutlich geringere Umweltschäden bei der Sekundärgewinnung.²⁹

Eine weitere, deutlich schwerer greifbare Form von vermiedenen sozialen Kosten betrifft die Versorgungssicherheit. **Die Förderung einer heimischen Recycling-Wirtschaft trägt zur Verringerung der Abhängigkeit von externen Rohstofflieferanten bei.** Dabei handelt es sich im Bereich der kritischen Rohstoffe in vielen Fällen um monopolistische Strukturen.³⁰ Sie machen Europas Lieferketten im Bereich der Zukunftstechnologien anfällig für natürliche (Katastrophenergebnisse) oder menschlich verursachte (Veränderungen in Rohstoff- und Handelspolitik) Ausfälle der Rohstoff-Lieferungen einzelner Länder. Dieses Ausfallrisiko ist für sich betrachtet allerdings noch kein externer Effekt. Denn es schlägt sich unmittelbar in der internen Risiko-Rendite-Verteilung der betroffenen Rohstoff-Importeure nieder. Soziale Kosten resultieren hier aber aus der mangelnden Versicherbarkeit. Bei vielen kritischen Rohstoffen besteht kurzfristig keine technische Substitutionsmöglichkeit. Und eine finanzmarktseitige Absicherung durch Hedging-Instrumente wird bei zukünftig systemrelevanten Zukunftstechnologien durch die gesamtwirtschaftliche Wirkung von Versorgungsausfällen erschwert. Denn sie führt zu einer starken positiven Korrelation der rohstoffbezogenen Risiken mit den Ertragsrisiken anderer Branchen.

Aus geopolitischer Perspektive ließe sich zudem **das Ziel der strategischen Souveränität** ins Spiel bringen, auf EU-Ebene ausgedrückt durch das Konzept der „**Offenen Strategischen Autonomie**“ als neues Leitbild der EU-Handelspolitik. Damit betont sie einerseits, auch weiterhin für einen offenen und regelbasierten Welthandel einzutreten, der auf multilateraler Kooperation beruht. Andererseits macht sie aber deutlich, dass die EU in die Lage versetzt werden muss, innerhalb der Welthandelsordnung

²⁴ Kaunda, R. B. (2020). Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of energy & natural resources law*, 38(3), 237-244. Huang, X., Zhang, G., Pan, A., Chen, F., & Zheng, C. (2016). Protecting the environment and public health from rare earth mining. *Earth's Future*, 4(11), 532-535.

²⁵ Bustos-Gallardo, B., Bridge, G., & Prieto, M. (2021). Harvesting Lithium: water, brine and the industrial dynamics of production in the Salar de Atacama. *Geoforum*, 119, 177-189.

²⁶ Zhou, B. L., Li, Z. X., Zhao, Y. Q., & Wang, S. Q. (2016). The life cycle assessment of rare earth oxides production in Bayan Obo. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 39(2), 832-839.

²⁷ Zhou, B., Li, Z., & Zhao, Y. (2017). Evaluation of externalities associated with rare earth exploitation at Bayan Obo. *Geo-Resources Environment and Engineering (GREE)*, 2, 35-40.

²⁸ SMM (2023). Latest Update in the SMM Rare Earth Metals Market. <https://www.metal.com/Rare-Earth-Metals>

²⁹ Z.B. Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2016). Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: virgin production versus magnet-to-magnet recycling. *Procedia CIRP*, 48, 45-50.

³⁰ Wolf, A. (2022). Europas Umgang mit den Rohstoffen der Zukunft. [ceplnput Nr.11/2022](#).

ihre strategischen Interessen und Werte eigenständig und selbstbewusst zu verteidigen. Das schließt Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz und Nachhaltigkeit ihrer Lieferketten explizit ein.³¹

Letztere beide Argumente lassen sich grundsätzlich auch als Rechtfertigung der Förderung heimischer Primärbeschaffung, d.h. unionsinternen Bergbaus, einsetzen. Hohe Umweltstandards und strenge Vorgaben für die Genehmigung von Bergbauprojekten in der EU sollten zudem zu einer Verringerung der Umweltkosten gegenüber den gegenwärtigen Abbaubedingungen beitragen. Genuin für die Förderung von Recycling-Technologien spricht jedoch die prinzipiell unbegrenzte Wiederverwertbarkeit der recycelten Metalle. Während geologische Vorkommen langfristig endlich und in ihrem Ausmaß unsicher sind, verheißt eine Kreislaufwirtschaft für seltene Metalle einen nicht versiegenden Stoffstrom, jedenfalls solange ein Rückgang der Nachfrage nicht den Bedarf obsolet macht.

3.3 Regulatorische Instrumente

Eine wohlfahrtsökonomische Ideallösung wäre die Internalisierung der Differenz an externen Kosten, die sich zwischen den unterschiedlichen Beschaffungswegen der Rohstoffe ergibt. Einzelne Technologien würden dann gemäß dieser Differenz subventioniert bzw. durch Besteuerung sanktioniert, um die Kostenlücke zu schließen. Ein solches Vorhaben würde aber an den hohen Informationshürden (Betroffenheit ganzer Lieferketten) und methodischen Schwierigkeiten (Vielfalt der Kostenkomponenten) scheitern. So würde etwa eine alleinige Orientierung am CO₂-Preis als existierenden Benchmark zur technologischen Verzerrung führen, wie sich etwa im Vergleich hydrometallurgischer und pyrometallurgischer Recycling-Verfahren zeigt. Während pyrometallurgische Verfahren bei gegenwärtigem Energiemix tendenziell CO₂-intensiver sind als hydrometallurgische Verfahren, werden bei Letzteren stärkere lokale Umwelteffekte durch Chemikalien-Nutzung erwartet.³² Generell ist ein direkter Vergleich lokaler Umwelteffekte mit den Effekten von Treibhausgasemissionen aufgrund von Unterschieden in der Fristigkeit und der räumlichen Dimension der Wirkung kaum möglich. Die Politik muss deshalb jenseits einer exakten Kostenkompensation praktikablere Lösungen finden, um eine Kreislaufwirtschaft für grüne Zukunftstechnologien aufzubauen.

Die bislang von der EU auf Basis von zwei Aktionsplänen für eine EU-Kreislaufwirtschaft (2015, 2020) angestoßenen Maßnahmen betreffen z.T. auch das Feld strategischen „Net-Zero“-Technologien.³³ Das gilt unmittelbar für die vor kurzem beschlossene **Neufassung der EU-Batterieverordnung**.³⁴ Sie enthält zahlreiche Neuregelungen für eine Kreislaufwirtschaft bei Batterien, einschließlich der als Zukunftstechnologie identifizierten Lithium-Ionen-Batterien. Sie richten sich zum einen an die Batterie-Hersteller. Ihnen werden Zielvorgaben für die Sammlung von Gerätealtbatterien gesetzt. Sie betragen 63 % bis Ende 2027, und ab dann 73 % bis Ende 2030. Für Altbatterien aus leichten Verkehrsmitteln gelten

³¹ European Commission (2021). The European economic and financial system: Fostering openness, strength and resilience (Communication from the Commission COM(2021) 32 final). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5487-2021-INIT/en/pdf>

³² Li, Z., Diaz, L. A., Yang, Z., Jin, H., Lister, T. E., Vahidi, E., & Zhao, F. (2019). Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste. *Resources, conservation and recycling*, 149, 20-30.

³³ European Commission (2020). A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. Communication from the Commissions to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM/2020/98 final. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF

³⁴ Council of the European Union (2023). Council adopts new regulation on batteries and waste batteries. Press release, 10 July 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on-batteries-and-waste-batteries/>

gesonderte Ziele (51 % bis Ende 2028 und 61 % bis Ende 2031). Die Hersteller der Endprodukte, in denen Batterien eingebaut sind, müssen sicherstellen, dass die Batterien von den Endnutzern entfernt und ersetzt werden können. Diese Verpflichtung gilt ab dem Jahr 2027. Der Aufbau eines Recyclate-Marktes soll zudem nachfrageseitig unterstützt werden. Dazu sieht die Verordnung einen verpflichtenden Mindestanteil für den Einsatz von Recyclaten bei der Herstellung von Industrie-, Starter- und Traktionsbatterien vor. Dieser ist rohstoffspezifisch festgelegt und beträgt zunächst 16 % für Kobalt, 85 % für Blei, 6 % für Lithium und 6 % für Nickel. Für den Nachweis ist eine Labelling-Pflicht vorgesehen.³⁵

Die Batterieverordnung bringt damit Instrumente in die regulatorische Praxis, die zukünftig auch auf andere Zukunftstechnologien ausgedehnt werden könnten. **Gemeinsame Klammer ist ein lieferkettenorientierter Ansatz:** Für den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft werden alle Akteure - vom Batterie-Hersteller bis zum Endverbraucher - in den Blick genommen und mit spezifischen Vorgaben oder Anreizen adressiert. Tabelle 4 listet gegenwärtig allgemein diskutierte Instrumente nach betroffenen Akteuren und spezifischen Zielen auf. Die faktische Eignung der Instrumente, zu den genannten Zielen beizutragen, ist stark produktabhängig. So ist die Einführung einer Rücknahmeverpflichtung nur bei Produkten effektiv, für deren Verwertung nach Nutzungsende keine Abkommen oder standardisierte Prozeduren existieren. Die Effektivität von Pfandsystemen hängt u.a. wesentlich von der Nutzungsdauer und dem Marktpreis der Produkte ab. Bei langlebigen, hochpreisigen Gebrauchsgütern müsste ein Pfand sehr hoch gesetzt sein, um Entscheidungen über die Entsorgung beeinflussen zu können. Die Wirkung von Mindestquoten für den Recyclate-Einsatz hängt wesentlich von der Entwicklung der Recycling-Effizienz bei den betroffenen Rohstoffen ab.

Tabelle 4: Überblick über regulatorische Instrumente zur Förderung von Recycling-Systemen

Instrument	Adressierte Akteure	Intention				Mögliche Spannungsfelder		
		Erhöhung Sammelquote	Koordination Verwertung	Erhöhung Recycling-Effizienz	Erzeugung Recyclate-Nachfrage	Wettbewerbsfähigkeit Downstream-Industrie	Wettbewerbsfähigkeit Upstream-Industrie	Innovationskraft
Rücknahmeverpflichtung	Downstream-Industrie	■						
Pfandsysteme	Downstream-Industrie, Handel, Endverbraucher	■				■		
Verschärfte Ausfuhrkontrollen Abfälle	Abfall-Exporteure	■						
Labelling: Zusammensetzung Produkte	Upstream-Industrie		■					
Produktdesignvorgaben	Upstream-Industrie, Downstream-Industrie		■	■		■	■	
F&E-Förderung Recycling	Forschung, Recycling-unternehmen			■				
Labelling: Herkunft Rohstoffe	Upstream-Industrie				■			
Mindestvorgaben Einsatz Recyclate	Downstream-Industrie			estl	■	■		

Quelle: Eigene Darstellung.

Zugleich drohen bei vielen Instrumenten Zielkonflikte. Die Einrichtung von Pfandsystemen kann die Wettbewerbsfähigkeit von Herstellern belasten, sowohl kostenseitig (Einrichtung und Management der Systeme) als auch preislich (Pfand als wahrgenommener Preis-Bestandteil). Vorgaben zum Produktdesign, die auf die leichtere Entnahme und/oder verbesserte Recycling-Fähigkeit von Produkten abzielen, könnten die Kosten der Herstellung erhöhen und bei starker technologischer Restriktion

³⁵ European Union (2023). Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/en/pdf>

mittelfristig auch zum Innovationshemmnis werden.³⁶ Mindestvorgaben zum Einsatz von Recyclaten führen ebenfalls zu steigenden Herstellungskosten, solange das Recycling gegenüber der Primärgewinnung der Rohstoffe kostentechnisch nicht konkurrenzfähig ist. Eine genauere Bewertung der verschiedenen Instrumente in ihren Spannungsfeldern kann nur auf der Produktebene erfolgen. Wir wählen dazu das mit Blick auf Europas Transformation wichtige Beispiel der Seltenerd-Permanentmagnete.

4 Detailanalyse für Seltenerd-Permanentmagnete

4.1 Technische Beschreibung

Bei Permanentmagneten handelt es sich um eine Klasse von Magneten, die in der Lage ist, dauerhaft ein gleichbleibendes Magnetfeld aufrechtzuerhalten, ohne dass hierfür die Zuführung elektrischer Energie notwendig ist. Gegenüber Elektromagneten haben sie deshalb den grundsätzlichen Vorteil einer höheren energetischen Effizienz. Zudem sind sie technisch weniger komplex gebaut. Im Marktangebot können gegenwärtig vier verschiedene Klassen unterschieden werden, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und Herstellungsweise unterscheiden.

1. Ferrite
2. Aluminium-Nickel-Kobalt-Magnete (Alnico-Magnete)
3. Samarium-Kobalt-Magnete
4. Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete)

Die unterschiedlichen chemischen Beschaffenheiten haben nicht nur starke Auswirkungen auf die Rohstoffkosten, sondern auch auf die Magnetkraft und sonstige verfahrensrelevante Eigenschaften. Ferrite sind die klassischste Form von Permanentmagnet. Sie werden aus relativ kostengünstigen Metallen (Eisen, Barium) hergestellt und sind nicht auf versorgungskritische Rohstoffe angewiesen. Ihre Magnetkraft und Temperaturstabilität sind jedoch vergleichsweise gering. Alnico-Magnete punkten mit einer hohen Temperaturstabilität, sind jedoch anfällig gegenüber Entmagnetisierung. Die letzten beiden Klassen (Samarium-Kobalt-Magnete und NdFeB-Magnete) haben eine hohe Magnetkraft gemeinsam, aber auch die Tatsache, dass sie auf die Verwendung von Seltenerdmetallen (Samarium, Neodym, Praseodym³⁷) angewiesen sind. **NdFeB-Magnete weisen die größte Stärke auf.³⁸ Das macht sie vor allem für zwei Arten von Anwendungstechnologien attraktiv, die für die grüne Transformation Europas beide absolut essenziell sind: Windkraft-Generatoren und Elektromotoren.** Zugleich sind sie günstiger als Samarium-Kobalt-Magnete.

Im Falle von Windkraft-Generatoren erlaubt der Einsatz von NdFeB-Magneten eine signifikante Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Windstromerzeugung. Je stärker das erzeugte Magnetfeld, umso weniger muss über das zwischen Windrotor und Generator geschaltete Getriebe eine Geschwindigkeitssteigerung des Drehmoments im Generator herbeigeführt werden. Das begrenzt die dabei entstehenden Energieverluste.³⁹ Im Falle der Elektromobilität kommt die hohe Magnetstärke vor allem dem Wunsch nach Einsparungen bei der notwendigen Antriebsenergie entgegen. Die Magnete können

³⁶ Hierzu: Schwind, S., & Reichert, G. (2022). Ökodesign von Produkten. cepAnalyse Nr. 10/2022. <https://www.cep.eu/eu-themen/details/cep/oekodesign-von-produkten-cepanalyse.html>

³⁷ Praseodym ist oft in einer Oxid-Verbindung mit Neodym im Magnet präsent.

³⁸ Supermagnetic (2016). Dauermagneten – diese Typen gibt es. <https://supermagnetic.de/dauermagnete-magnettypen/>

³⁹ IMA (2018). Windenergie: Wie man Elektrizität durch Magneten erhält. <https://imamagnets.com/de/blog/windenergie-wie-man-elektrizitaet-durch-magneten-erhaelt/>

so entsprechend klein gebaut werden und belasten das Gewicht der Elektromotoren nicht unnötig.⁴⁰ In beiden Fällen kann die verbreitete Nutzung von NdFeB-Magneten deshalb einen entscheidenden Faktor für die zukünftige Wirtschaftlichkeit der Technologien darstellen – und damit für den Siegeszug erneuerbarer Energien insgesamt.

Zugleich weisen NdFeB-Magnete weitere Eigenschaften auf, die für ihre Anwendung und Wiederverwertung technisch wie wirtschaftlich eine Herausforderung darstellen. Erstens sind NdFeB-Magnete ohne Legierungszusätze nicht sehr hitzebeständig. Damit sie auch im Hochtemperaturbereich wie etwa bei Einsätzen in Elektromotoren ihre Magnetkraft bewahren, werden weitere Stoffe der Grundlegierung beigemischt. Dabei kommt vorrangig Dysprosium, in geringerem Maße auch Terbium, beides weitere Seltenerdelemente, zum Einsatz. Die Einsatzverhältnisse können deutlich variieren.⁴¹ Insbesondere Dysprosium stellt aufgrund seiner besonderen Seltenheit und des damit zusammenhängenden Preises einen Unsicherheitsfaktor für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Zweitens sind sie anfällig für Korrosion und physische Schadenseinwirkungen, weshalb sie im Einsatz durch eine Hülle geschützt werden müssen.⁴² Für diese Hülle existiert kein industrieller Standard, es kommen verschiedene Materialien wie Nickel, Gold und Zink in unterschiedlicher Kombination zum Einsatz.⁴³ Das macht die Wirtschaftlichkeit der Herstellung sensitiv gegenüber den Preisen und der Versorgungslage bei weiteren kritischen Rohstoffen, zusätzlich zu der Abhängigkeit von Seltenerdmetallen. Die fehlende Standardisierung der Hülle stellt zudem ein Hindernis für den Recycling-Prozess dar, da je nach Beschaffenheit unterschiedliche Techniken für die Entfernung und Wiederverwertung der Hülle erforderlich sein können.⁴⁴

4.2 Marktentwicklung

Permanentmagnete sind gegenwärtig nur eine von vielen Verwendungsformen für die vielseitige Gruppe der Seltenerdmetalle. Verschiedene Seltenerdelemente dienen u.a. zur Dotierung von Leuchtmitteln, als Katalysatoren für chemische Prozesse, als Hilfsstoffe in der Glas- und Keramikindustrie, als Poliermittel sowie als Bestandteile einiger Stahl-Legierungen.⁴⁵ Aktuellen Schätzungen zufolge gehen global derzeit etwa 35 % der Masse an raffinierten Seltenerdmetallen in die Herstellung von Permanentmagneten. In Wertgrößen ausgedrückt ist der Anteil mit 90 % jedoch deutlich größer⁴⁶. Das zeigt die hohe wirtschaftliche Bedeutung der Permanentmagnete-Produktion für die Rentabilität der Rohstoffgewinnung. NdFeB-Magnete machen dabei etwa zwei Drittel der Gesamtproduktion von Permanentmagneten aus.

Die Produktion von Seltenerd-Permanentmagneten ist global stark konzentriert. Den Schätzungen der European Raw Materials Alliance (ERMA) gemäß betrug der Weltmarktanteil Chinas im Jahr 2019

⁴⁰ IMA (2018). Wie Neodym-Magnete in Motoren verwendet werden. <https://imamagnets.com/de/blog/wie-neodym-magnete-in-motoren-verwendet-werden/>

⁴¹ UBA (2019). Seltene Erden in Permanentmagneten. Factsheet – Stand: 15 Mai 2019. Umweltbundesamt, Dessau.

⁴² Fujita, Y., McCall, S. K., & Ginosar, D. (2022). Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. *MRS Bulletin*, 47(3), 283-288.

⁴³ Vgl. Fujita et al. (2022).

⁴⁴ Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., ... & Binnemans, K. (2017). REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3, 122-149.

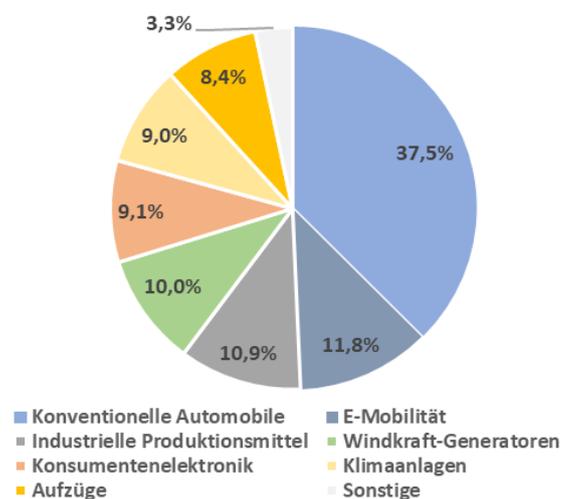
⁴⁵ Gaustad, G., Williams, E., & Leader, A. (2021). Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105213.

⁴⁶ Rizos, V., Righetti, E., Kassab, A. (2022). Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU. CEPS in-depth analysis 07/2022.

94 %.⁴⁷ Daneben konnte nur noch Japan einen nennenswerten Anteil (5 %) verzeichnen. Dessen Marktaktivität ist allerdings weitgehend beschränkt auf das High-Grade-Segment. Der Marktanteil Japans betrug insgesamt weniger als 1 %. Die Rolle des Weltmarktführers hat China Anfang der 2000er Jahre von Japan übernommen und seitdem massiv ausgebaut.⁴⁸ Es ist der Volksrepublik gelungen, die globale Dominanz, die sie bei Abbau und Raffinade von Seltenerdmetallen seit geraumer Zeit besitzt,⁴⁹ auch zunehmend auf einen wichtigen nachgelagerten Teil der Verwertungskette auszudehnen. Der Verkauf der Magnet-Tochter von General Motors an ein chinesisches dominiertes Konsortium Mitte der 1990er Jahre wird hierbei als ein zentraler Wendepunkt gesehen.⁵⁰

Auch die Verwendung hat seit der Erfindung der NdFeB-Magnete in den 1980er Jahren starke Veränderungen erlebt. Nach van Nielen et al. (2023) kann man von drei Wellen sprechen, die zu einem zunehmend breiteren Anwendungsradius geführt haben. In der ersten Welle war die Konsumentenelektronik die treibende Kraft hinter dem Marktwachstum, zunächst insbesondere der Einsatz als Magnetspeicher in Festplatten und in Laufwerken, später dann auch in Lautsprechern, Kopfhörern und Spielekonsolen. Ab Mitte der 2000er Jahre begann der massenhafte Einsatz von NdFeB-Magneten in Industrieanwendungen wie Robotern, Pumpen und Motoren von Verbrennerfahrzeugen. Die beschleunigte grüne Transformation der letzten Jahre hat dann mit Elektromobilität und Windkraft (Onshore und Offshore) eine dritte Welle an stark wachsenden Anwendungsfeldern hervorgebracht.⁵¹ Abbildung 2 zeigt die Schätzungen von Ma & Henderson (2021) zur Verteilung der globalen NdFeB-Nachfrage nach Anwendungsfeldern im Jahr 2019. Demnach hatte der Fahrzeugbau den mit Abstand größten Anteil an der Nachfrage, wobei die konventionell angetriebenen Fahrzeuge (Permanentmagnete in elektrischen Anlassern) noch dominierten.

Abbildung 2: Verteilung globale Nachfrage nach NdFeB-Magneten



⁴⁷ ERMA (2021). Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster. European Raw Materials Alliance.

⁴⁸ Ma, D., & Henderson, J. (2021). The impermanence of permanent magnets: A case study on industry, Chinese production, and supply constraints. <https://macropolo.org/analysis/permanent-magnets-case-study-industry-chinese-production-supply/>

⁴⁹ Vgl. Wolf (2022).

⁵⁰ Vgl. Ma & Henderson (2021).

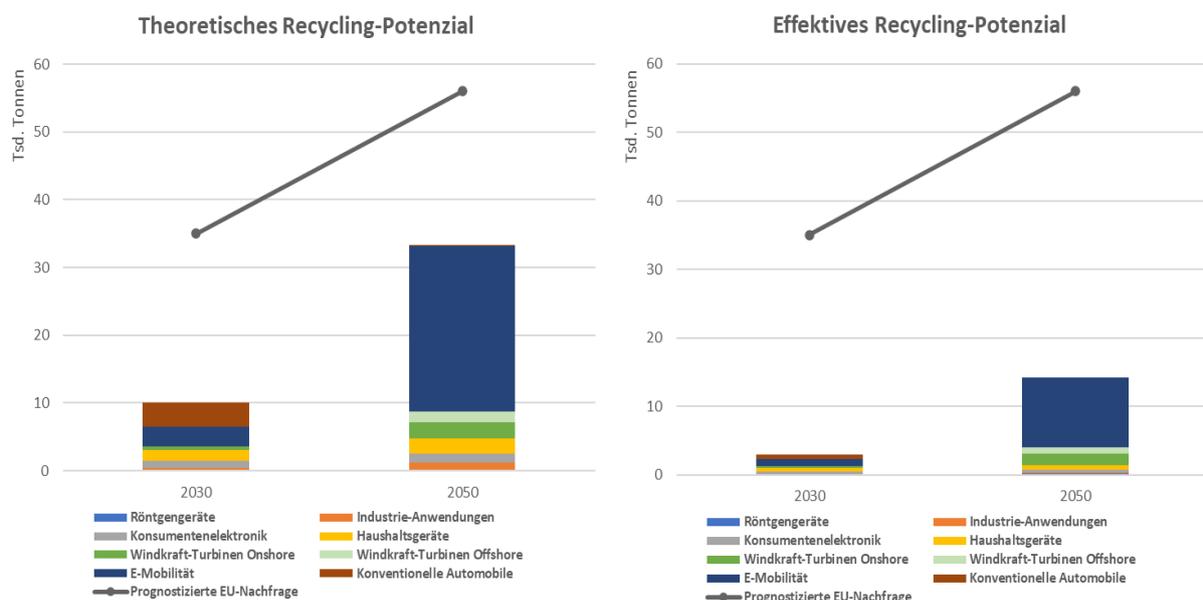
⁵¹ van Nielen, S. S., Sprecher, B., Verhagen, T. J., & Kleijn, R. (2023). Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136252.

Quelle: Ma & Henderson (2021); Eigene Darstellung.

Die gegenwärtige Abhängigkeit im Bereich der Seltenerdmetalle macht für Europa die Recycling-Potenziale, die sich aus den diversen Anwendungsfeldern ergeben, besonders relevant. **Dabei ist zwischen dem theoretischen und dem effektiven Potenzial zu unterscheiden.** Das theoretische Potenzial zeigt die Menge an Magneten an, die im jeweiligen Jahr ihre Nutzungsphase beenden. Prognosen hierzu ergeben sich aus der Nachfrageentwicklung der vergangenen Jahre sowie Annahmen zu den durchschnittlichen Nutzungsdauern. Das theoretische Potenzial sagt somit nichts über den Entwicklungsstand von Recycling-Infrastruktur und -Technologie aus. Das effektive Potenzial misst das voraussichtlich in einem Jahr aus dem Recycling gewonnene Magnetmaterial. Es ergibt sich aus Multiplikation des theoretischen Potenzials mit Sammelrate, Demontagerate und Recycling-Effizienz. Es berücksichtigt somit die Materialverluste, die im Sammlungsprozess (Abfallexport, unsachgerechte inländische Entsorgung), bei der Demontage (keine separate Verwertung, unsachgemäßer Ausbau) sowie beim Recycling selbst (prozessbedingte Verluste) entstehen könnten.

Die Tatsache, dass sich Größe und Verbautechnik der NdFeB-Magnete von Produkt zu Produkt deutlich unterscheiden, hat auch große Auswirkungen auf die Recyclebarkeit. Rizo et al. (2022) haben produktspezifische Szenarien zur Entwicklung der Potenziale für den Zeitraum bis 2050 geschätzt (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Prognosen zum Recycling-Potenzial von NdFeB-Magneten



Quelle: Rizo et al. (2022) – Prognose- Szenario: 1; Eigene Darstellung.

Bei der Menge an theoretisch recyclebaren Altmagneten dominieren demnach bis 2030 noch die Verbrennerfahrzeuge. Der allgemeine Trend im Automobilbereich zur Leichtbauweise und Fahrzeuggrößenreduktion führen auch hier zu einem wachsenden Bedarf an Permanentmagneten.⁵² Elektroräder stellen zu diesem Zeitpunkt ebenfalls eine potenziell wichtige Quelle dar, zurückzuführen auf einen deutlichen Nachfrageanstieg und eine im Vergleich zu Elektroautos geringeren mittleren

⁵² Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D., & Sutter, J. (2015). Current developments and challenges in the recycling of key components of (hybrid) electric vehicles. *Recycling*, 1(1), 25-60.

Nutzungsdauer. Die Windkraft-Generatoren spielen dagegen 2030 zunächst noch eine eher untergeordnete Rolle, da Permanentmagnete verstärkt erst in jüngeren Modellen zum Einsatz gekommen sind. Auch ist die erwartete mittlere Nutzungsdauer (25-30 Jahre) unter allen Anwendungsfeldern die mit Abstand Längste. Bis 2050 nimmt die Bedeutung von Windkraft aber kontinuierlich zu. Das betrifft vor allem den Offshore-Bereich. Mit Permanentmagneten betriebene Windkraft-Generatoren sind für Offshore-Anwendungen besonders attraktiv, da sie weniger wartungsintensiv sind.⁵³ Auch Elektroautos gewinnen immer mehr an Bedeutung und liefern im Jahr 2050 nach dieser Prognose deutlich mehr als die Hälfte des Gesamtgewichts an Altmagneten. Die Konsumentenelektronik wird als Quelle dagegen immer unbedeutender, auch weil HDD-Festplatten seit einigen Jahren durch die ohne NdFeB-Magnete auskommende SDD-Technologie verdrängt werden.⁵⁴

Das effektive Recycling-Potenzial speist sich anteilig jeweils noch stärker aus Windkraft-Generatoren und Elektroautos. Bei Windkraft-Generatoren liegt das an sehr hohen Sammel- (90-99 %) und Demontageraten (90-95 %). In Windkraft-Generatoren eingebaute NdFeB-Magnete sind verhältnismäßig groß, relativ leicht entnehmbar und werden aufgrund ihres Wertes von vorneherein getrennt entsorgt. Dafür existiert zumindest in Ansätzen bereits eine entsprechende Infrastruktur. Die Gefahr von Wertungsverlusten durch Vermengung mit den übrigen Abfällen ist somit gering.⁵⁵ Bei Elektroautos ist die Demontage komplexer, aber in deutlich geringerem Maße als bei den verhältnismäßig kleinen Permanentmagneten, die in den Anlasser-Motoren von Verbrenner-Autos verbaut sind.⁵⁶

Die Demontage der Magnete stellt daher eine bedeutende Restriktion für die Entfaltung der Recycling-Potenziale dar. Der technische Vorgang ist komplex und fehleranfällig. Die Entnahme erfordert zunächst die Beseitigung der Hülle (meist aus Nickel und Kupfer) und die Entmagnetisierung.⁵⁷ Das Klebematerial muss restlos beseitigt werden, da Rückstände Verunreinigungen auslösen können, die die Effizienz des Recycling-Prozesses reduzieren. Die Magnete selbst sind spröde. Luftkontakt kann zu Oxidation führen, die relevante Eigenschaften der Magnete verändert.⁵⁸ Eine Automatisierung der einzelnen Prozessschritte erfordert stark spezialisierte Maschinen.⁵⁹ Wird auf die Entnahme verzichtet und die Magnete als Teil des Endprodukts geschreddert, sind die enthaltenen Rohstoffe anschließend kaum noch im Recycling-Prozess zu separieren. Denn die Magneteilchen kleben am Stahlschrott. Eine beträchtliche Menge an Seltenerdmetallen endet so gegenwärtig in Europa als Fremdpartikel in der Sekundärstahlproduktion.⁶⁰

Für die Effizienz des Recycling-Prozesses selbst nehmen Rizos et al. (2022) produktübergreifend Werte von 90 % (Szenario 1) bzw. 99 % (Szenario 2). Hier zeigt sich in der Realität derzeit noch ein großer Unsicherheitsfaktor: Es existiert eine Vielzahl an gegenwärtig erforschten Recycling-Technologien mit erheblichen Unterschieden bei Input-Bedarfen und Recycling-Output. Noch hat keine der

⁵³ Vgl. Fujita et al. (2022).

⁵⁴ Vgl. Van Nielen et al. (2023).

⁵⁵ Vgl. Rizos et al. (2022).

⁵⁶ Vgl. Yang et al. (2017).

⁵⁷ Vgl. Yang et al. (2017).

⁵⁸ Li, Z., Kedous-Lebouc, A., Dubus, J. M., Garbuio, L., & Personnaz, S. (2019). Direct reuse strategies of rare earth permanent magnets for PM electrical machines—an overview study. *The European Physical Journal Applied Physics*, 86(2), 20901.

⁵⁹ Vgl. Fujita et al. (2022).

⁶⁰ Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A., Escalon, V., Tuduri, J., Charles, N., ... & Fargier, H. (2015). Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production*. 107, 215-228.

Technologien einen industriellen Maßstab erreicht. Das zukünftige Recycling-Potenzial von NdFeB-Magneten wird deshalb auch wesentlich von den Ergebnissen eines Technologie-Wettbewerbs bestimmt.

4.3 Technologien der Wiederverwertung

Die Wiedergewinnung von Seltenerd-Permanentmagneten kann grundsätzlich an zwei Stufen des Lebenszyklus ansetzen: an der Verwertung von Industrieabfällen oder von EoL-Magneten. Geeignete Industrieabfälle entstehen bei den letzten Schritten der Primärproduktion der Permanentmagnete. Die finale Formung der Magnete für den jeweiligen Anwendungsfall erzeugt Magnetspäne als Abfallmaterial. Sie können abhängig von der Formung 6 bis 73 % der gesamten Produktion ausmachen.⁶¹ Diese Abfälle stellen somit eine bedeutende Ressourcenquelle dar. Ihr zentraler Vorteil ist die unmittelbare Verfügbarkeit der Ressourcen in der für die Wiederverwertung notwendigen Form. Es entstehen keine organisatorischen Probleme bei Sammlung und Demontage, die die effektiven Potenziale des End-of-Life-Recycling schmälern (siehe unten). Als aussichtsreiche Technologie wird die Behandlung der Magnetspäne mit Kupfernitrat beschrieben. Hiermit kann eine Mischung von Seltenerdoxiden mit hohem Reinheitsgrad aus den Spänen extrahiert werden. Die unmittelbare Verwertbarkeit sorgt Tests zur Folge für Wirtschaftlichkeit und eine gute Umweltperformance.⁶² Angesichts der gegenwärtigen Verteilung globaler Produktionskapazitäten (siehe Abschnitt 4.2) ist diese Technologie für Europas Versorgungssicherheit aber zunächst wenig interessant.

Für Europas Bedarfe deutlich relevanter ist die Wiederverwertung von Altmagneten. Dem Priorisierungsgedanken der EU-Kreislaufwirtschaftspläne entsprechend⁶³ wäre hier unmittelbar an „Reuse“, d.h. die direkte Wiedernutzung ohne wesentliche Bearbeitung, als ressourcenschonendste Option zu denken. Das kann die Nutzung eines gesamten Magnetringes oder seiner Komponenten beinhalten.⁶⁴ Die Heterogenität der Produktcharakteristika (Magneiteigenschaften, chemische Zusammensetzung, Dimensionierung) und die spezifischen Bedarfsanforderungen erzeugen jedoch große Koordinationsprobleme für eine lieferkettenübergreifende Reuse-Strategie. Auch die unmittelbare Wiederverwertung im selben Produkt (z.B. im Rahmen der Demontage von E-Autos) ist durch die Länge der Nutzungsphase und die zugleich starke technologische Dynamik (Optimierung chemischer Strukturen, neue Bautypen) nicht in jedem Fall wirtschaftlich.⁶⁵

Das Recycling von Magneten, d.h. die Wiederaufbereitung der Stoffe in EoL-Magneten für einen neuerlichen Produktionsprozess, ist deshalb eine vieldiskutierte Option. Dabei hat sich bislang kein Verfahren als technologischer Standard herauskristallisiert. In der Fachliteratur werden eine Vielzahl an Recycling-Verfahren mit unterschiedlichen technologischen Reifegraden und Anwendungsspektren diskutiert. Sie lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen. Eine Kategorie bilden Verfahren der direkten Wiedergewinnung von Magneten aus den Legierungen der Altmagnete („**direktes**

⁶¹ Arshi, P. S.; Vahidi, E.; Zhao, F. Behind the Scenes of Clean Energy: The Environmental Footprint of Rare Earth Products. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018, 6 (3), 3311–3320.

⁶² Chowdhury, N. A., Deng, S., Jin, H., Prodius, D., Sutherland, J. W., & Nlebedim, I. C. (2021). Sustainable recycling of rare-earth elements from NdFeB magnet swarf: techno-economic and environmental perspectives. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15915-15924.

⁶³ Vgl. European Commission (2020).

⁶⁴ Li, Z., Kedous-Lebouc, A., Dubus, J. M., Garbuio, L., & Personnaz, S. (2019). Direct reuse strategies of rare earth permanent magnets for PM electrical machines—an overview study. *The European Physical Journal Applied Physics*, 86(2), 20901.

⁶⁵ Vgl. Elwert et al. (2015).

Recycling“). Diese auch als „magnet-to-magnet recycling“ bezeichneten Technologien kommen ohne die chemische Zersetzung der Altmagnete aus, sondern dienen der unmittelbaren Wiederverwertung des Altmaterials in einem integrierten Prozess. Ein vieldiskutiertes spezifisches Verfahren ist die Wasserstoff-Dekrepiation. Dabei wird das Magnetmaterial in Kontakt mit Wasserstoff gebracht. Die kleinen, reaktionsfreudigen Wasserstoff-Atome drängen sich zwischen die Metallkörner und bilden so durch Druck Mikrorisse im Material, die zur Versprödung und graduellen Desintegration führen. Dieses vorbereitende Aufbrechen des ansonsten sehr stark verbundenen Materials wiederum erhöht die Effizienz des anschließenden Mahlvorgangs, der neues Magnetpulver hervorbringt.⁶⁶ Im Laufe des Prozesses können Änderungen an der chemischen Konfiguration des Ausgangsmaterials vorgenommen werden, z.B. in dem es mit zusätzlichen Mengen an Neodym oder Dysprosium vermischt wird.⁶⁷ Im Vergleich zum „Reuse“-Fall besteht deshalb mehr Flexibilität bei den Verwendungsoptionen.

Die zweite Kategorie an Recyclingverfahren zielt auf die chemische Zersetzung der Magnetlegierungen ab. Bei diesem sogenannten „**elementaren Recycling**“ wird die chemische Struktur auf Ausgangsrohstoffe (zum Teil in Form von Oxid-Verbindungen) reduziert, für die dann auch jenseits der Magnetherstellung die gesamte Palette an Nutzungsoptionen zur Verfügung steht. Spezifische Verfahren unterscheidet sich in den Mitteln, mit denen die Magneteigenschaften aufgebrochen werden, sowie in der Effizienz der Wiedergewinnung einzelner Metalle. Grundsätzlich wird zwischen hydrometallurgischen, pyrometallurgischen und elektrochemischen Prozessen unterschieden.⁶⁸ **Hydrometallurgische Verfahren** weisen gegenwärtig den höchsten technischen Reifegrad auf. Startpunkt ist die Auswaschung des Altmaterials in einem Lösungsmittel (zumeist eine Säure). Anschließend erfolgt eine Stofftrennung z.B. mittels Lösungsmittelextraktion, und Abscheidung der getrennten Stoffe. Je nach Verfahren kann das abgeschiedene Material aus einem Mix aus Seltenerdmetallen oder aus einzelnen Metalloxiden bestehen. Eine Herausforderung für die Auswaschung speziell bei NdFeB-Magneten stellt der hohe Eisengehalt dar.⁶⁹ Die Strategie von **pyrometallurgischen Verfahren** besteht darin, mittels Hochtemperaturprozesse die Seltenerdmetalle von den übrigen Magnetbestandteilen in unterschiedliche chemische Phasen zu trennen. Dazu werden z.B. die Seltenerdbestandteile in geschmolzenen Metallen wie Magnesium oder Calcium gelöst und separiert.⁷⁰ **Elektrochemische Verfahren** schließlich basieren auf dem Prinzip der Trennung der Magnetverbindungen mittels Elektrolyse (d.h. unter Zuführung elektrischer Energie), wofür geschmolzene Salze als Elektrolyte eingesetzt werden.⁷¹ Diese Verfahren befinden sich gegenwärtig noch nicht im Stadium der Kommerzialisierung.

Ein Grund, warum sich aus der Vielzahl an erforschten und im Labor erprobten Verfahren noch kein klarer Kandidat für den kommerziellen Scale-up herauskristallisiert hat, liegt in ihren Trade-offs. Im Zentrum stehen die Faktoren Materialanforderungen, Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen. Direktes Recycling setzt die höchsten Anforderungen an den Reinheitsgehalt des Ausgangsmaterials, da Fremdstoffe hier nicht über die Stofftrennung automatisch separiert werden. Ist das Ausgangsmaterial

⁶⁶ Habibzadeh, A., Kucuker, M. A., & Gökelma, M. (2023). Review on the Parameters of Recycling NdFeB Magnets via a Hydrogenation Process. ACS omega.

⁶⁷ Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2016). Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: virgin production versus magnet-to-magnet recycling. Procedia CIRP, 48, 45-50.

⁶⁸ Coelho, F., Abrahams, S., Yang, Y., Sprecher, B., Li, Z., Menad, N. E., ... & Decottignies, V. (2021). Upscaling of Permanent Magnet Dismantling and Recycling through VALOMAG Project. Materials Proceedings, 5(1), 74.

⁶⁹ Vgl. Yang et al. (2017).

⁷⁰ Vgl. Yang et al. (2017).

⁷¹ Kobayashi, S., Kobayashi, K., Nohira, T., Hagiwara, R., Oishi, T., & Konishi, H. (2011). Electrochemical formation of Nd-Ni Alloys in molten LiF-CaF₂-NdF₃. Journal of the Electrochemical Society, 158(12), E142.

in Folge von Oxidation oder fehlerhafter Demontage (siehe Abschnitt 4.2) verunreinigt, kann das zu Verlust an Kraft oder sonstiger relevanter Eigenschaften bei den Recyclaten führen. In der Folge sinkt die Energieeffizienz der entsprechenden Endanwendungen. Das wäre vor allem bei Anwendungen mit starken Platzrestriktionen beim Magnete-Einsatz problematisch, wie dies bei Elektromotoren der Fall ist.⁷² Entsprechend hoch sind die Qualitätsanforderungen an den Demontageprozess und der dabei entstehende ökonomische Aufwand.

Bei der Ressourceneffizienz des Recyclingprozesses selbst weist das direkte Recycling gegenüber dem elementaren Recycling dagegen klare Vorteile auf. Das Altmaterial wird hier unmittelbar zur Neuproduktion von Magneten eingesetzt. Beim elementaren Recycling nimmt das Reprocessing dagegen den Umweg über die Wiedergewinnung der Rohstoffe, die anschließend noch mit den üblichen Verfahren der Primärproduktion zu Magneten verarbeitet werden müssen. Der geringere Material- und Energieverbrauch des direkten Recyclings führt zugleich zu einer überlegenen Umweltbilanz.⁷³

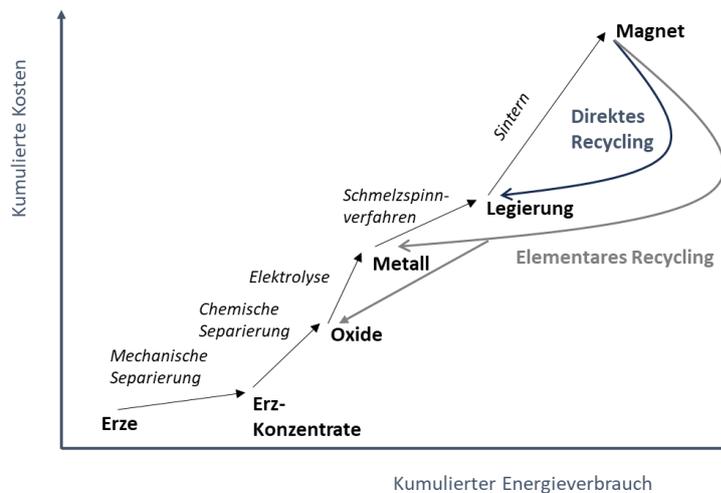
Auch ein Vergleich der Verfahren des elementaren Recyclings untereinander offenbart Trade-offs. Pyrometallurgische Verfahren erfordern für die Herstellung der Hoch-Temperatur-Umgebung einen besonders hohen Energieverbrauch. Abhängig von der Rolle fossiler Energieträger im Energiemix sind damit unter Umständen hohe Emissionen an Treibhausgasen und lokalen Luftschadstoffen verbunden. Bei hydrometallurgischen Verfahren sind dagegen der hohe Wasserverbrauch und potenzielle Umweltschädigungen aus der Nutzung säurehaltiger Lösungsmittel die Schwachstellen.⁷⁴ Mit wachsender Dekarbonisierung der Energiegewinnung könnte sich die Umweltbilanz als Ganzes deshalb zugunsten pyrometallurgischer Verfahren verschieben. Das erschwert zusätzlich Prognosen über die zukünftige Marktdurchdringung von Recycling-Technologien.

Eine übersichtliche Form der Vergegenwärtigung der Trade-offs ist die Betrachtung als unterschiedliche Ansatzpunkte in der Produktionskette (siehe Abbildung 4). Elementares Recycling geht eine größere Zahl an Fertigungsschritten rückwärts. Entsprechend höher ist der Ressourcenaufwand für die Herstellung neuer Permanentmagnete. Zugleich bietet der Weg zurück aber auch mehr Flexibilitätsoptionen: Je elementarer der Recycling-Output, umso breiter dessen Anwendungsspielraum für neue Endprodukte. Speziell mit Blick auf die Seltenerdmetalle kann das ein wertvolles Asset sein. Denn auch zukünftig werden Seltenerdmetalle mit ihren attraktiven Materialeigenschaften höchstwahrscheinlich für verschiedene, darunter heute vielleicht noch unbekannte Anwendungen als Ideallösung in Frage kommen, sowohl innerhalb als auch jenseits des Feldes der Permanentmagnete. **Aus europäischer Perspektive verheißt Elementares Recycling von Seltenerd-Permanentmagneten damit wachsende Versorgungssicherheit bei Seltenerdmetallen, ohne Bindung an bestimmte Verwertungsformen.** Europa bewahrt sich so ressourcenseitig die Chance, in zukünftigen Anwendungsfeldern eine Pionierrolle einzunehmen und First-Mover Vorteile zu realisieren. Der Preis für diese Flexibilität sind jedoch höhere Kosten in der Herstellung von NdFeB-Magneten und damit geringere Chancen, in diesem absehbar wichtigen Marktsegment gegenüber der chinesischen Konkurrenz einen Fuß in die Tür zu bekommen.

⁷² Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., ... & Binnemans, K. (2017). REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3, 122-149.

⁷³ Ganesh, A., Subramaniam, P., Kaur, A., & Vaidyanathan, L. (2021). Comparison of hydrometallurgical and hybrid recycling processes for lithium-ion battery: an environmental and cost analysis. Working Paper.

⁷⁴ Vgl. Yang et al. (2017).

Abbildung 4: Stilisierte Kosten entlang der Lieferkette von Seltenerd-Permanentmagneten

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Chinwego et al. (2022)⁷⁵.

Vor diesem Hintergrund ist ein Portfolio-Ansatz für den Aufbau von Recycling-Kapazitäten ein sinnvoller Weg. Damit Europa seine Abhängigkeit von Permanentmagneten „Made in China“ reduzieren und zugleich an zukünftigen Technologiewellen teilhaben kann, braucht es direktes wie elementares Recycling. Innerhalb der beiden Kategorien sollten Förderkanäle und Rahmenbedingungen für den Marktaufbau zugleich möglichst technologieneutral angelegt sein. Welcher Mix an Recycling-Technologien sich etabliert, bleibt das Ergebnis marktbezogener Erkundung. Entscheidender Faktor ist die unternehmerische Rentabilität.

4.4 Rentabilität des Recyclings

Die Ausgestaltung eines effektiven Fördersystems erfordert den Blick aus der Investorenperspektive. Wie bei anderen Bestandteilen der industriellen Transformation gilt auch für den Aufbau von Recyclingsystemen, dass die notwendigen Investitionen kapitalmarkt-gängig sein müssen. Das Beispiel der Seltenerd-Permanentmagnete zeigt die Komplexität einer solchen Betrachtung. Denn die Rentabilität von Recycling-Verfahren ist nicht isoliert bewertbar, sondern eng in einen Kontext von Verwertungsstufen eingebunden, die in diesem Fall (mindestens) die Schritte Sammlung, Demontage, Wiederaufbereitung und Endverwertung der Recyclate beinhalten. Die einzelnen Schritte können dabei je nach Ausgangsprodukt wirtschaftlich mehr oder weniger stark integriert, d.h. in einem Unternehmen gebündelt, erfolgen. Auch technologisch und hinsichtlich der Kostenstrukturen können sie zwischen den Ausgangsprodukten stark variieren, wie sich vor allem bei der Demontage zeigt (siehe Abschnitt 4.2).

Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund des noch frühen technologischen Entwicklungsstadiums wenig öffentliche Informationen zu Materialintensitäten und Energieverbräuchen verschiedener Recycling-Technologien für Seltenerd-Permanentmagnete vorliegen. Die vorhandenen Daten basieren in der Regel auf hochskalierten Ergebnissen von Labor-Tests und sind deshalb für eine zukünftige kommerzielle Produktion nur eingeschränkt repräsentativ. In Kombination mit qualitativen Erwägungen und Befragungsergebnissen lässt sich nichtsdestotrotz ein aussagekräftiges Bild gewinnen.

⁷⁵ Chinwego, C., Wagner, H., Giancola, E., Jironvil, J., & Powell, A. (2022). Low-Cost Distillation Technology for Rare-Earth Recycling. In *Rare Metal Technology 2022* (pp. 41-50). Cham: Springer International Publishing.

Das betrifft zum einen den Rentabilitätsvergleich des Recyclings mit der Primärproduktion, d.h. der Herstellung von Permanentmagneten ausgehend von der Bergbauförderung und Verhüttung von Seltenerdmetallen. Da die EU zukünftig prinzipiell in ihrer Rohstoffstrategie auf beide Versorgungswege setzen will,⁷⁶ wird der **Rentabilitätsunterschied zum entscheidenden Faktor für den zukünftigen Versorgungsmix**. Als allgemeiner Vorteil des Recyclings lässt sich die zielgerichtete Ressourcengewinnung ausmachen. Der Gehalt an spezifischen Seltenerdmetallen in den Altmagneten ist – abgesehen von Variationen bei den genauen Mengenanteilen und der Einbindung von Zusatzstoffen – grundsätzlich bekannt. Ganz anders die Situation bei einer bergbaulichen Gewinnung der Rohstoffe: Die Seltenerdmetalle treten in den Erzen in komplexen, im Vorfeld unsicheren Mischverhältnissen auf. Dabei werden auch nicht für die Produktion notwendige Seltenerdelemente zu Tage gefördert. Das erhöht das Ertragsrisiko und erzeugt zusätzliche Kosten im Rahmen der notwendigen Separierung und Lagerung der überschüssigen Elemente. Am Markt ist das charakteristische „Balance-Problem“ der unterschiedlichen Seltenerdmetalle die Folge⁷⁷, was die Preise für überschüssige Elemente drücken und gesamtwirtschaftlich zu einer ineffizienten Ressourcenallokation führen kann. Als Vorzug vor allem des direkten Recyclings gegenüber der Primärgewinnung ist zudem der geringere CO₂-Fußabdruck zu nennen,⁷⁸ der sich mit weiter steigenden CO₂-Preisen am EU-ETS auch zu einem zunehmenden Kostenvorteil entwickeln wird.

Wirtschaftlich gegen das Permanentmagnete-Recycling von Altprodukten spricht der hohe Aufwand im Rahmen der Entnahme/Demontage der Magnete aus den Endprodukten, ein Schritt, der bei der Primärproduktion entfällt. Die Vielfalt an Größen und Verbautechniken der Magnete in den Produkten – und die divergierenden Praktiken der Hersteller – erschweren die Automatisierung der Demontage, was zu kostentreibend hoher Arbeitsintensität führen kann, oder zu einem entsprechend hohen Kapitalaufwand für die nötigen Maschinen aufgrund geringer Stückzahl.⁷⁹

Auf der Erlösseite stellt die hohe Volatilität der Märkte für Seltenerdmetalle einen Unsicherheitsfaktor dar. Aufgrund der geringen Marktliquidität und der Tatsache, dass die Seltenerd-Oxide abseits von Börsen („over-the-counter“) gehandelt werden, sind sie starker Preisunsicherheit ausgesetzt. Das gilt auch für die im (elementaren) Permanentmagnete-Recycling hauptsächlich gewonnenen Metalle Neodym und Dysprosium. Dysprosium wird zwar in geringeren Mengen hervorgebracht, ist zugleich aber aufgrund seiner besonderen Seltenheit wesentlich teurer.⁸⁰ Da sein Mengenanteil je nach Materialanforderung stark von Magnet zu Magnet schwanken kann, ergibt sich hieraus besondere Erlösunsicherheit.⁸¹ Hinzu kommt als variable Größe die Preisentwicklung von möglichen weiteren aus dem Magnet-Recycling gewonnenen Nebenprodukten, insbesondere von Eisen-Oxiden.⁸² Im direkten Recycling betrifft die Erlösunsicherheit vor allem die Qualität der Magnet-Recyclate auf dem qualitativ stark segmentierten Markt für Seltenerd-Permanentmagnete. Ein für beide Recycling-Kategorien bestehende langfristige Unwägbarkeit ist die zukünftige Entwicklung der Marktstruktur. Ein durch Förderung von

⁷⁶ Vgl. European Commission (2023a).

⁷⁷ Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018). Rare earths and the balance problem: how to deal with changing markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4, 126-146.

⁷⁸ Vgl. Ganesh et al. (2021).

⁷⁹ Vgl. Yang et al. (2017).

⁸⁰ Die Marktagentur SMM schätzt für das Preisniveau von Neodym einen Bereich von 79–81 USD / kg, für das Preisniveau von Dysprosium einen Bereich von 371-378 USD / kg (Stand: 04.07.2023). <https://www.metal.com/Rare-Earth-Metals>

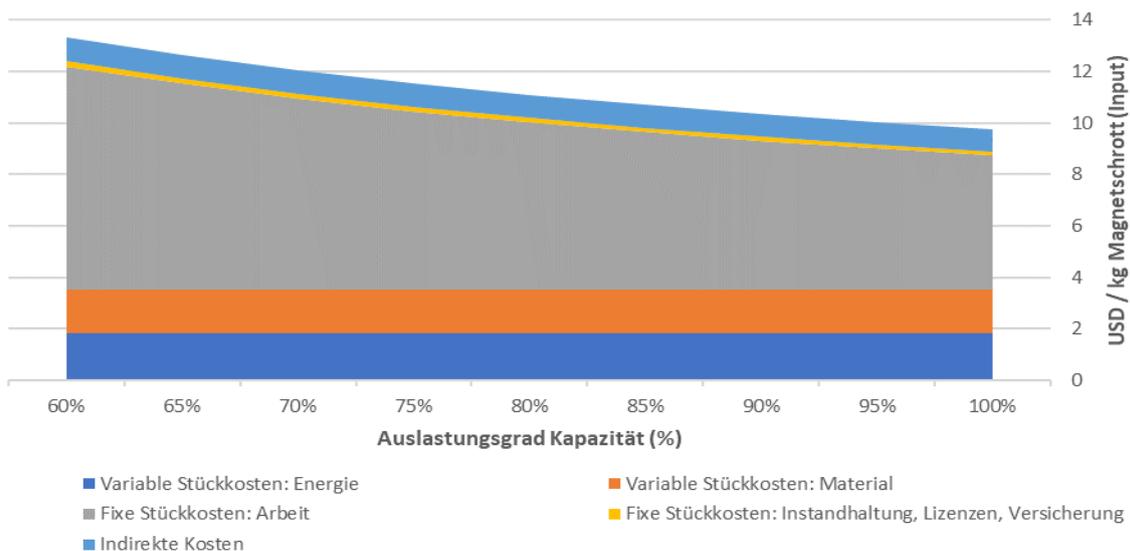
⁸¹ Vgl. Chinwego et al. (2022).

⁸² Fujita, Y., McCall, S. K., & Ginosar, D. (2022). Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. *MRS Bulletin*, 47(3), 283-288.

Primärproduktion und Recycling ausgelöster Markteintritt europäischer Anbieter könnte die chinesische Quasi-Monopolstellung langfristig aufbrechen. Es ist unsicher, wie die bislang dominierenden Anbieter hierauf reagieren werden. Die Gefahr eines Preiskampfes bei Seltenerdmetallen und Permanentmagneten, um die europäische Konkurrenz aus dem Markt zu treiben, ist real.

Die Kosten des Recycling-Prozesses selbst sind naturgemäß technologiespezifisch. Chowdhury et al. (2021) schätzen, dass das Neodym-Recycling basierend auf Magnetabfällen aus der Produktion bereits heute rentabel ist.⁸³ Für das elementare Recycling von Altmagneten liegen bislang keine vollständigen Schätzungen zu den erwarteten Kapitalkosten vor. Chinwego et al. (2022) präsentieren Schätzszenarien zu den operativen Kosten des Elementaren Recyclings von NdFeB-Magneten basierend auf einem hydrometallurgischen Prozess, mit den USA als fiktiven Produktionsstandort (siehe Abbildung 5). Die Fixkosten im Zusammenhang mit dem Arbeitseinsatz dominieren demnach deutlich gegenüber den variablen Kosten des Material- und Energieverbrauchs. Die Prozesse der Materialbearbeitung selbst sind zwar automatisiert, das Material-Handling zwischen den Prozessschritten (Befüllen der Maschinen, Entnahme und Qualitätskontrolle der Prozess-Outputs) erfordert aber in beträchtlichem Maße manuelle Arbeitskraft.⁸⁴ Eine Automatisierung auch dieser Schritte würde nach Ansicht der Autoren die Kapitalintensität deutlich erhöhen und den Prozess erst bei noch größeren Mengen rentabel gestalten.

Abbildung 5: Kostenstruktur eines hydrometallurgischen Recyclings von NdFeB-Magneten



Quelle: Eigene Darstellung. Ergebnisse aus Calculation Spreadsheet (Supplementary Material zu Chinwego et al. (2022)).

In Beziehung zu den erwarteten Einnahmen gesetzt (Verkauf der gewonnenen Mengen an Neodym und Dysprosium) würde sich zu aktuellen Marktpreisen demnach bei Vollaustattung ein beträchtlicher jährlicher operativer Überschuss ergeben, der aber mit sinkender Auslastung deutlich abnimmt. Die jährliche Input-Kapazität des Prozesses erreicht dabei ein Niveau von 876 Tonnen Magnetmaterial. Das beleuchtet den Kern des Wirtschaftlichkeitsproblems beim Permanentmagnete-Recycling: Eine

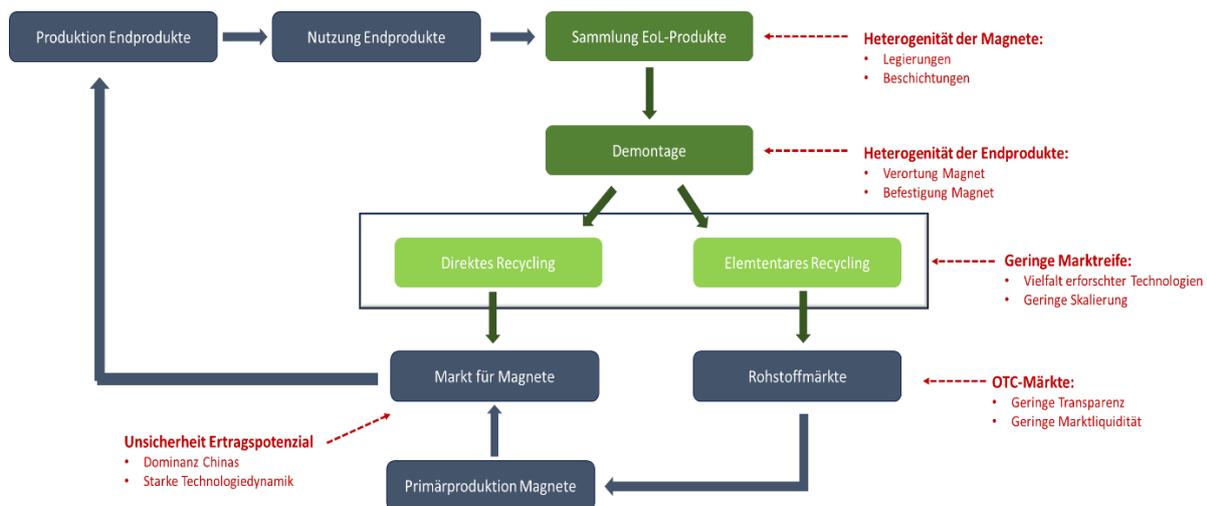
⁸³ Chowdhury, N. A., Deng, S., Jin, H., Prodius, D., Sutherland, J. W., & Nlebedim, I. C. (2021). Sustainable recycling of rare-earth elements from NdFeB magnet swarf: techno-economic and environmental perspectives. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15915-15924.

⁸⁴ Vgl. Chinwego et al. (2022).

jährliche Inputmenge von 876 Tonnen in einer einzelnen Produktionsanlage würde – in Beziehung zu den Schätzungen von Rizos et al. (2022) gesetzt (siehe Abschnitt 4.2) – szenarioabhängig etwa 16 bis 37 % des gesamten erwarteten Angebots an EoL-NdFeB-Magneten in der EU im Jahr 2025 ausmachen, und immerhin noch etwa 11 bis 16 % des erwarteten Angebots im Jahr 2030. Und selbst diese Menge wäre gemäß Chinwego et al. (2022) noch nicht ausreichend, um eine kostensenkende Prozessoptimierung durch Automatisierung wirtschaftlich zu machen. Eine so starke Konzentration der Kapazitäten auf eine einzelne Anlage und Technologie wäre volkswirtschaftlich im Sinne des Portfolio-Gedankens (siehe Abschnitt 4.2) nicht wünschenswert. Andere, unter Umständen ressourcenschonendere Recycling-Verfahren wie das direkte Recycling würden in ihrer Marktdurchdringung behindert.

Der entscheidende Impuls für einen zügigen Kapazitätsaufbau muss deshalb von der Input-Seite des Systems ausgehen. Damit bereits in naher Zukunft auch ohne starke räumliche Konzentration von Recycling-Kapazitäten die für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Materialflüsse erreicht werden, bedarf es eines deutlich steileren Anstiegs der Menge an verfügbaren Altmagneten als bislang erwartet. Die beiden Stellschrauben hierfür sind die Sammel- und Demontagequoten. Angesichts der starken Variation dieser Größen zwischen den Endanwendungen (siehe Abschnitt 4.2) ist dabei ein produktspezifisches Vorgehen angemessen. Abbildung 6 fasst die Rentabilitäts-Hemmnisse entlang der Lieferketten zusammen.

Abbildung 6: Recycling-Hemmnisse bei Permanentmagneten



Quelle: Eigene Darstellung.

4.5 Ansätze für eine zielgerichtete Förderung

Die Analyse der Angebotspotenziale und Wirtschaftlichkeit des Permanentmagnete-Recyclings hat gezeigt, dass für den Aufbau eines effizienten Recyclingsystems der Blick auf die technischen Details in der Verwertung wesentlich ist. Die finanzielle Förderung von Recycling-Kapazitäten allein ist als Politikansatz nicht ausreichend. Die Regulatorik muss die gesamte Verarbeitungskette in den Blick nehmen, angefangen bei der Sammlung von Altprodukten bis hin zur Endverwertung der Recyclate. Die Vielfalt an Magnettypen und Verbauungstechniken bringt es mit sich, dass keine regulatorischen „one size fits all“-Lösungen angemessen sind. Stattdessen braucht es produktgruppenspezifische Regeln, ohne in ein Mikromanagement zu verfallen und Innovationspfade einzuengen. Der entscheidende Gradmesser sollte das Verhältnis aus gesamtwirtschaftlichen Mengenpotenzialen an Recyclaten zu den der Industrie und den Verbrauchern auferlegten Kosten sein.

Ein entscheidendes Element ist die verbesserte Koordination der Akteure entlang der z.T. stark integrierten Verarbeitungsketten.⁸⁵ Informationen über magnetspezifische Eigenschaften und Anforderungen müssen zeitnah ausgetauscht werden. Das beginnt auf Ebene der Primärproduktion der Magnete mit Informationen über die genaue chemische Zusammensetzung (Gewichtsanteile Stoffe in den Legierungen, Verwendung von Materialien für die Magnethüllen). Sie erlauben es Recycling-Betrieben, die Erlöspotenziale genauer einschätzen zu können und ihre Technologien zu optimieren. Bei der Verwertung der Magnete in den Endanwendungen sind Kenntnisse über Ort und Art der Verbauung wichtig. Sie verringern den Aufwand für Demontagebetriebe und somit das Risiko, dass die Magnete zusammen mit anderen Produktkomponenten geschreddert und im Metallschrott für die Wiederaufbereitung verloren gehen.

Demontagebetriebe sollten ihrerseits verpflichtet werden, an ein digitales Zentralregister regelmäßig Informationen über die von ihnen gehaltenen Lagerbestände an (potenziell) Permanentmagneten enthaltender Altprodukte zu übermitteln. Das ist wichtig, um die bestehenden Informationslücken im Sekundärrohstoffangebot zu schließen (siehe Abschnitt 2.2). Genauere Kenntnis über den Umfang an unausgeschöpftem Recyclingpotenzial ermöglicht eine Verbesserung der Recycling-Indikatoren und damit eine bessere politische Zielsteuerung. Die Produzenten recycelter Permanentmagnete (d.h. direktes Recycling) sowie generell Permanentmagnete-Hersteller, die Sekundärrohstoffe einsetzen, sollten schließlich zertifizierte Informationen über Art und Umfang der recycelten Materialien sowie die verwendete Recycling-Technologie an ihre Käufer übermitteln. Das eröffnet den Herstellern von Permanentmagneten enthaltender Endprodukte die Möglichkeit, den Rückgriff auf recycelte Materialien als positives Signal am Markt zu verwerten.

Die Einrichtung eines solchen lieferkettenweiten Informationssystems ist aufwendig und steht nicht bei allen Anwendungen von Permanentmagneten in einem günstigen Verhältnis zum erwarteten Recycling-Ertrag. Zumindest in der Anfangsphase sollte es deshalb auf die zukünftig besonders potenzielreichen Anwendungen Windkraft-Generatoren und Elektrofahrzeuge begrenzt sein.

Jenseits des Informationsaustauschs sind für einen zügigen Kapazitätsaufbau auch konkrete Schritte zur Senkung der Verwertungskosten zu gehen. **Um aus der Vielfalt der Einsatzbereiche resultierende Mehrkosten zu senken, können mittelfristig Vorgaben zur technologischen Standardisierung ein Weg sein.** Über (produktgruppenspezifische) Standards zur Verbauung der Permanentmagnete in den Endanwendungen können Prozessschritte in der Demontage standardisiert und so kostensenkende Automatisierungsprozesse eingeleitet werden. Eine höhere Demontage-Effizienz wiederum bringt mehr Altmagnete in die Recycling-Betriebe und ermöglicht Kostensenkungen im Recycling durch Fixkostendegression (siehe Abschnitt 4.4). Standardisierung verheißt so eine doppelte Dividende. Zugleich birgt ausgeprägte Standardisierung aber langfristig die Gefahr zum Innovationshemmnis zu werden. Und ohne eigene Innovationskraft in der Permanentmagnete-Produktion wird Europa seinen Kostennachteil gegenüber China bei dieser grünen Technologie nicht reduzieren können. Gesetzlich definierte Standards sollten deshalb auf die für den Demontage-Prozess relevanten Parameter beschränkt sein, und die Herstellung betreffende chemische Magneteigenschaften ausklammern.

Auf der Ebene des Recyclingprozesses sollten die Anstrengungen darauf abzielen, den technologischen Reifegrad der gegenwärtig erforschten Lösungen zügig zu erhöhen. **Im Sinne des Portfolio-Gedankens (siehe Abschnitt 4.3) sollte staatliche Forschungsförderung dabei möglichst diversifiziert angelegt**

⁸⁵ Vgl. van Nielsen et al. (2023).

sein und nicht einzelne Recycling-Technologien von vorneherein bevorzugen. Die Existenz von Größenvorteilen im Recycling – in Kombination mit der starken Verzögerung im Angebotswachstum von EoL-Magneten - rechtfertigt auch übergangsweise eine über den F&E-Bereich hinausgehende finanzielle Förderung. **Damit Europa den in 15 bis 20 Jahren zu erwartenden sprunghaften Anstieg im Angebot an Altmagneten ausnutzen kann, müssen jetzt die Strukturen für die schrittweise Steigerung der Recycling-Effizienz geschaffen werden.** Das geht nur über Skalierung. Staatliche Anschubfinanzierung ist dabei der Schlüssel, um Einnahmeengpässe in der Anfangszeit zu überbrücken und so private Investitionsanreize bereits in der Gegenwart zu erhöhen.

Damit der notwendige Technologiewettbewerb nicht ausgehebelt oder gar Kapazitäten ohne Marktperspektive geschaffen werden, sollte die Förderung die Form einer wettbewerblich fixierten Prämienzahlung annehmen. Die gegenwärtig in die Umsetzungsphase gehende Europäische Wasserstoffbank ist hierfür ein mögliches Vorbild. **Nach diesem Prinzip würden die erwarteten Markteinnahmen aus dem Verkauf der Recyclate um eine staatlich finanzierte, mengenabhängige Prämie ergänzt, deren Höhe sich aus einem Gebotsverfahren unter den Recycling-Unternehmen ergibt.** Bei wettbewerblich effizienter Ausgestaltung des Gebotsverfahrens sollte die Höhe der Gebote der notwendigen Kompensation entsprechen, die die Recycling-Unternehmen zur Deckung der anfänglich hohen fixen Durchschnittskosten benötigen. Mit im Zeitverlauf steigender Angebotsmenge an Altmagneten und zunehmender Realisierung von Größenvorteilen sinken die notwendige Kostenkompensation und damit die sich im Gebotsverfahren einspielenden Prämien. Um zu verhindern, dass in einem solchen System Recycling-Technologien mit gegenwärtig noch geringem Reifegrad ausgebremst werden, könnte für das Gebotsverfahren das *pay-as-bid*-Prinzip angewendet werden. Gegenwärtig noch verhältnismäßig teure junge Technologien hätten so die Chance auf höhere Prämienzahlungen, sofern die Unternehmen mit ihren Geboten unterhalb einer gewissen Schwelle bleiben.

Ein Vorteil eines solchen Prämiensystems gegenüber Alternativen wie staatlichen Preisgarantien oder dem Aufbau spezifischer Recyclate-Märkte ist die Bewahrung der preislichen Lenkungswirkung. Jenseits der gewährten Prämie hängen die Erträge der Recycling-Unternehmen von der Preisentwicklung an den internationalen Rohstoff- und Magnete-Märkten ab. Die Höhe der Prämie kompensiert zum Teil auch für dieses gegenwärtige Ertragsrisiko, sie hebt aber die Abhängigkeit der zukünftigen Erlöse von der Preisentwicklung nicht aus. Potenziale und Risiken im Zusammenhang mit der Substitution von Rohstoffen durch technologischen Wandel oder der Eroberung neuer Anwendungsgebiete bleiben so Bestandteil des unternehmerischen Kalküls.

Ein solches System wäre auch robust gegenüber politisch induzierten Anpassungen der Markterwartungen, insbesondere gegenüber zukünftigen Veränderungen in der Handels- und Industriepolitik Chinas. Das gerade bei Seltenerd-Permanentmagneten als noch recht junger Technologie bestehende Risiko, durch staatliche Förderung ungewollt einen technologischen Lock-in Europas beim Rohstoff-Recycling zu verursachen, wäre so insgesamt geringer. Zudem würden im Vergleich zu einem durch Beschaffungsvorgaben an Unternehmen aufgebauten Recyclate-Markt (siehe Abschnitt 4.6) auch keine unmittelbaren Kostenrisiken für europäische Downstream-Industrien auf den globalen Märkten entstehen. Auch das ist vor dem Hintergrund der Konkurrenz zu China ein wichtiger Faktor, denn echte Versorgungssicherheit gibt es für Europa nur mit integrierten Lieferketten. Das staatliche Kostenrisiko kann zugleich über feste Budgetierungen der Ausschreibungen begrenzt werden.

Eine Herausforderung bei der praktischen Ausgestaltung aller Arten von Förderinstrumenten in diesem Bereich ist die Heterogenität der gewonnenen Recyclate. Im Falle des Prämiensystems müssten

Ausschreibungen grundsätzlich rohstoffspezifisch erfolgen. Als Orientierungsgröße für die Kontingenzierung der einzelnen Ausschreibungen könnten die rohstoffspezifischen Zielmengen dienen, wie sie in den Recycling-Zielen des Kommissionsvorschlags zum Critical Raw Materials Act angelegt sind.⁸⁶

Schließlich ist auch der Ausbau europäischer Produktionskapazitäten für Permanentmagnete eine wichtige langfristige Aufgabe. Denn Rohstoff-Recycling dient nur insoweit auch dem Resilienz-Ziel, wie eigene Kapazitäten für die Weiterverarbeitung existieren. Ein massiver Export prämiengeförderter Recyclate in Drittstaaten löst nicht das Versorgungsproblem und könnte die EU zudem in Anti-Dumping-Konflikte ziehen. **Vor diesem Hintergrund sollten die für Projekte im Bereich strategischer „Net-Zero“-Technologien vorgeschlagenen Priorisierungsmaßnahmen (siehe Abschnitt 2.1) auch auf die Herstellung von Seltenerd-Permanentmagneten als wichtiger Vorleistung angewendet und zügig umgesetzt werden.** Andernfalls droht der Aufbau der Lieferketten trotz umfangreicher Förderung an langen Genehmigungsverfahren oder unzureichender Raumplanung zu scheitern.

4.6 Permanentmagnete-Recycling in den Gesetzesplänen der Kommission

Die Europäische Kommission sieht in ihrem Vorschlag für ein Kritische-Rohstoffe-Gesetz verschiedene Maßnahmen zur Förderung von Recycling-Kapazitäten vor, die sich auch oder exklusiv auf Seltenerd-Permanentmagnete beziehen.⁸⁷ Zu den allgemeinen Maßnahmen zählen die vorgesehene Verpflichtung der Mitgliedstaaten, nationale Kreislaufwirtschaftsprogramme für kritische Rohstoffe zu entwickeln und umzusetzen. Dabei gibt sie keine konkreten Arten von regulatorischen Instrumenten vor, zählt aber auf, für welche Unterziele Maßnahmen zu ergreifen sind.⁸⁸ Dabei werden auch zwei der in Abschnitt 4.5 identifizierten spezifischen Problemfelder adressiert. So sollen Maßnahmen zur Erhöhung der Menge und Qualität von recyclebaren Abfallströmen als Input für Recycling-Anlagen ergriffen werden. Auch soll der Reifegrad von Recycling-Technologien erhöht werden. Beides wären mit Blick auf das Permanentmagnete-Recycling wichtige Schritte, um Kostensenkungen herbeizuführen und den Recycling-Output zu erhöhen.

Explizit die Problematik der Permanentmagnete nehmen die Art. 27 und 28 des Gesetzesvorschlags in den Blick. Darin sieht die Kommission ab drei Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung für eine Reihe von Produkten die Einführung verpflichtender Labels vor, die Auskunft darüber geben, ob das Produkt Permanentmagnete enthält, und wenn ja welchen der vier grundlegenden Klassen (siehe Abschnitt 4.1) diese entsprechen. Der Anwendungsbereich ist recht weit gefasst. Zu den genannten Produkten zählen nicht nur im Hinblick auf ihren Magnete-Gehalt besonders potenzialreiche Kapitalgüter (Windkraft-Generatoren, Elektromotoren und Industrieroboter), sondern auch Konsumgüter wie Wäschetrockner und Staubsauger. Ziel ist, ein effizienteres Sammel- und Sortiersystem für EoL-Produkte mit Blick auf die Wiederverwertung von Permanentmagneten aufzubauen. Da das Vorhandensein solcher Magnete in den Produkten nicht von außen einsehbar und in vielen Fällen auch nicht technologisch zwingend ist, wäre diese Informationspflicht ein erster wichtiger Schritt. Ein einheitliches Labelling-System ist Voraussetzung für eine Automatisierung des Sortier- sowie der anschließenden Verwertungsprozesse, und damit für den Weg Richtung Skalierung.⁸⁹

⁸⁶ Vgl. European Commission (2023a).

⁸⁷ Reichert, G., & Wolf, A. (2023). Kritische Rohstoffe. cepAnalyse Nr. 8/2023. <https://www.cep.eu/eu-themen/details/cep/kritische-rohstoffe-cepanalyse.html>

⁸⁸ Vgl. European Commission (2023a).

⁸⁹ Burkhardt, C., Lehmann, A., Podmiljsak, B., & Kobe, S. (2020). A systematic classification and labelling approach to support a circular economy ecosystem for NdFeB-type magnet. *Journal of Material Science and Engineering A*, 10, 125-133.

Darüber hinaus sollen auf oder innerhalb der betreffenden Produkte weitere relevante Informationen auf Datenträgern gespeichert werden. Dazu gehören Gewicht und genaue chemische Zusammensetzung der enthaltenen Permanentmagnete, sowie Informationen über die Beschaffenheit ihrer Hüllen und des Haftmaterials. Auch sollen genaue Anweisungen zum sachgerechten Vorgehen bei der Demontage enthalten sein, einschließlich der einzelnen Arbeitsschritte. Die Maßnahme zielt auf die Demontage-Betriebe ab. Sie soll eine bessere Einschätzung der ökonomischen Sinnhaftigkeit einer Separierung der Magnete im Wiederverwertungsprozess ermöglichen. Zugleich soll die Effizienz der Demontage erhöht und die Gefahr von Qualitätsverlusten infolge unsachgerechter Entnahme verringert werden. In Abwesenheit (produktspezifischer) Standards zur Verbauungstechnik von Magneten stellt dies einen sinnvollen Vorschlag dar, um einen Verlust von wertvollem Magnetmaterial beim Schreddern entsorgter Produkte zu vermeiden.

Weitere vorgesehene Informationspflichten beziehen sich auf den Recyclate-Anteil an den eingesetzten Rohstoffen in der Magnetproduktion. Das betrifft nicht nur die Seltenerdmetalle, sondern auch Bor, Kobalt und Nickel als weitere potenziell enthaltene kritische Rohstoffe. Diese Ausweisungspflicht soll gesondert ab einem Schwellenwert von 0,2 kg für das Gesamtgewicht der enthaltenen Permanentmagnete greifen. Diese Informationen sollen der allgemeinen Öffentlichkeit auf einer Website zugänglich gemacht werden. Da nicht die Hersteller oder Händler der Permanentmagnete selbst, sondern die Anbieter einer breiten Palette an Permanentmagnete enthaltende Produkte betroffen sein sollen, könnte hieraus ein erheblicher Informationsaufwand für das Downstream-Segment resultieren.

Zudem will sich die Kommission vorbehalten, für die Zeit ab 2031 eigenmächtig (per delegierten Rechtsakt) Vorgaben für Mindestquoten zum Einsatz von Recyclaten bei der Herstellung von Permanentmagneten machen. Diese Vorgaben sollen nicht nur für die EU-interne Produktion, sondern für sämtliche im Binnenmarkt gehandelte Permanentmagnete gelten. Klares Vorbild ist die entsprechende Regelung aus der Neufassung der EU-Batterieverordnung (siehe Abschnitt 3.3). Ziel ist es, über die Mindestquoten gezielt Nachfrage nach Recyclaten zu schaffen, die eine Überwälzung etwaiger Mehrkosten der Sekundärgewinnung auf die Abnehmer ermöglichen. Unsere bisherige Analyse lässt die Wirksamkeit einer solchen Maßnahme sehr zweifelhaft erscheinen. Es hat sich gezeigt, dass die Restriktion beim Aufbau von Recycling-Kapazitäten für Permanentmagnete wesentlich auf der Angebotsseite liegt, im Bereich der Sammlung und insbesondere der Demontage von Altmagneten. Und die Einführung von Recyclate-Quoten kann den langfristigen Anstieg im Angebot an Altmagneten, den die grüne Transformation mit sich bringt, nicht beschleunigen. Eine ehrgeizig gesetzte Mindestquote droht entweder schlicht nicht erfüllbar zu sein oder zu hohen Knappheitspreisen zu führen.

Sofern die Quotenregelung auch auf Importprodukte angewendet wird, besteht zwar zumindest für den Binnenmarkt die Chance auf ein Level Playing Field. Aber auch das gilt nur dann, wenn die EU beim Ausbau von Recycling-Kapazitäten (und damit bei der Kostendegression) nicht von Ländern wie China abgehängt wird. Speziell China investiert auch im Bereich der Sekundärproduktion global massiv.⁹⁰ Durch die Möglichkeit, die in der Primärproduktion massenhaft entstehenden Magnetabfälle zu nutzen, hat die Volksrepublik auch in diesem Segment vom Start weg einen Ressourcenvorteil. Primär auf der Nachfrageseite ansetzende Förderung droht so das industriepolitische Ziel der Europäischen Kommission, wettbewerbsfähige Kapazitäten im Downstream-Segment (Herstellung Permanentmagnete, Windkraft-Turbinen, Elektromotoren) aufzubauen, zu konterkarieren.

⁹⁰ <https://www.yicai.com/news/china-ji-mag-to-build-usd100-million-rare-earth-magnet-recycling-facility-in-mexico>

5 Fazit

Eine Kreislaufwirtschaft im Bereich grüner Technologien ist für Europas „Green Deal“ das noch fehlende Teil des Puzzles. Sie kann das Spannungsfeld zwischen Klimaneutralität und Versorgungssicherheit langfristig aufheben, indem sie für grüne Technologien notwendige Rohstoffe wie Lithium und Seltenerdmetalle auf umweltschonende Weise aus EU-internen und theoretisch nie versiegenden Quellen bezieht. In Konkurrenz zu auf Ressourcenausbeutung und weltumspannende Transportnetzwerke setzende Mächte stellt eine Recycling-Ökonomie wirtschaftlich wie geopolitisch für Europas ein entscheidendes Asset dar. Auf dem Weg dorthin braucht die EU aber einen langen Atem. Recycling-Kapazitäten und -Infrastruktur existieren für die betroffenen kritischen Mineralrohstoffe bislang lediglich in Ansätzen, einige der Rohstoffe werden derzeit noch gar nicht im kommerziellen Maßstab wiederverwertet.

Vor diesem Hintergrund analysiert der vorliegende cepInput Recycling-Potenziale und bestehende Hemmnisse, mit einem Fokus auf die für Windkraft und Elektromobilität zukünftig unverzichtbaren Seltenerd-Permanentmagnete. Wir argumentieren, dass angebotsseitige Faktoren die entscheidenden Hindernisse auf dem Weg zu einem schnellen Aufbau von Recycling-Märkten für Permanentmagnete sind. Das betrifft zum einen die lange Nutzungsdauer der Endprodukte, die trotz stark steigender Nachfrage in den nächsten Jahren nur sehr zeitverzögert ein hohes Angebot an Altmagneten hervorbringt. Ein weiteres, in seinem Ausmaß produktabhängiges Problem sind technische Schwierigkeiten und mangelnde Transparenz bei der Demontage von Magneten aus Endprodukten. Schließlich stellen auch die Recycling-Technologien selbst durch ihren derzeit noch unsicheren Entwicklungspfad und ihre hohen Fixkosten ein Hemmnis für eine schnelle Skalierung dar.

Unsere zentralen Empfehlungen an die EU sind zum einen Vorgaben zur Einführung von Informationsschnittstellen zwischen den Akteuren in den Lieferketten. Das verringert die Unsicherheit über Produkteigenschaften (insb. Magnetchemie und Verbauung im Produkt) und trägt so zur Erhöhung der Sammel- und Demontagequoten bei. Mittelfristig kann dies zur Grundlage für Demontagesenkende Standardisierungsprozesse werden. Des Weiteren empfehlen wir den Aufbau eines neuartigen Prämiensystems, das in einer Übergangsphase Recycling-Unternehmen für die anfänglich hohen fixen Stückkosten des Recyclings kompensiert. Das System sollte in Form kompetitiver Ausschreibungen gestaltet sein, um die Kosten zu begrenzen und die Selektion zukunftsfähiger Recycling-Verfahren zu fördern. Der von der Kommission ins Auge gefasste Weg, über Beschaffungsvorgaben Nachfrage nach Recyclaten zu erzeugen, droht dagegen die globale Wettbewerbsfähigkeit europäischer Zukunftsin dustrien kostenseitig zu belasten und damit das Ziel der Versorgungssicherheit zu konterkarieren.

Grundsätzlich sollte bei der staatlichen Förderung von Recycling-Technologien immer der Portfolio-Gedanke im Mittelpunkt stehen. Die gegenwärtig erforschten und weiterentwickelten Lösungen offenbaren klare Trade-offs zwischen Kosteneffizienz, Flexibilität sowie lokalen und globalen Umweltwirkungen. Am offensichtlichsten wird dies bei der Gegenüberstellung von direkten und elementaren Recycling-Verfahren. Es wird sich deshalb im Technologierenen höchstwahrscheinlich nicht eine produktübergreifend ideale Lösung herausbilden. Technologieoffenheit im Design von Fördersystemen wird so auch beim Permanentmagnete-Recycling zur zentralen Maßgabe.

**Autor:**

Dr. André Wolf

Leiter Fachbereich Technologische Innovation, Infrastruktur und industrielle Entwicklung

wolf@cep.eu

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Freiburg

Schiffbauerdamm 40 Räume 4205/06 | D-10117 Berlin

Tel. + 49 761 38693-0

Das **Centrum für Europäische Politik** FREIBURG | BERLIN, das **Centre de Politique Européenne** PARIS, und das **Centro Politiche Europee** ROMA bilden das **Centres for European Policy Network** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Das gemeinnützige Centrum für Europäische Politik analysiert und bewertet die Politik der Europäischen Union unabhängig von Partikular- und parteipolitischen Interessen in grundsätzlich integrationsfreundlicher Ausrichtung und auf Basis der ordnungspolitischen Grundsätze einer freiheitlichen und marktwirtschaftlichen Ordnung.