

Wolf, André

Article

Recycling seltener Metalle: Ein Weg zu resilienten grünen Lieferketten

Wirtschaftsdienst

Suggested Citation: Wolf, André (2023) : Recycling seltener Metalle: Ein Weg zu resilienten grünen Lieferketten, Wirtschaftsdienst, ISSN 1613-978X, Sciendo, Warsaw, Vol. 103, Iss. 12, pp. 832-363,
<https://doi.org/10.2478/wd-2023-0228>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/284424>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

André Wolf

Recycling seltener Metalle: ein Weg zu resilienten grünen Lieferketten

Zukunftstechnologien, wie Elektromotoren und Windkraft-Turbinen, enthalten wertvolle seltene Metalle, deren Recycling einen wichtigen Schritt zu einer grünen Kreislaufwirtschaft darstellen würde. Doch ein Aufbau von Lieferketten für recycelte Metalle ist mit Schwierigkeiten, wie mangelnder technischer Standardisierung, geringer Sammelquoten von Altprodukten und niedriger Effizienz von Recycling-Technologien konfrontiert.

Grüne Wertschöpfungsketten werden für Europa nur dann zur Erfolgsgeschichte, wenn sie es ermöglichen, Klimaschutz mit einem Zugewinn an Versorgungssicherheit zu verbinden. Voraussetzung ist eine eigene wettbewerbsfähige Produktion von Zukunftstechnologien, die für die Dekarbonisierung zentral sind, wie Lithium-Batterien, Elektromotoren oder Windkraft-Turbinen. Das erfordert einen gesicherten Zugang zu schonend gewonnenen und zugleich bezahlbaren Ressourcen. Die EU-Kommission hat unlängst mit ihren Vorschlägen für einen Critical Raw Materials Act (EU-Kommission, 2023a) sowie einen Net Zero Industry Act (EU-Kommission, 2023b) wichtige Impulse in diese Richtung gesetzt. Das Recycling der in Zukunftstechnologien enthaltenen seltenen Metalle, wie Lithium, Kobalt oder der Gruppe der Seltenerdmetalle, kann hierfür langfristig einen entscheidenden Beitrag 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.

Der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft für grüne Zukunftstechnologien steckt derzeit noch in den Kinderschuhen.

© Der/die Autor:in 2023. Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht (creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de).

Open Access wird durch die ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft gefördert.

EU-Schätzungen zur End-of-Life-Recycling-Input-Rate¹ zeigen, dass bei Zukunftsrohstoffen, die in strategischen Technologien eingesetzt werden, der Anteil EU-interner Sekundärgewinnung am Rohstoffverbrauch gegenwärtig mit wenigen Ausnahmen (Kupfer, Kobalt, Nickel) gering bis sehr gering ausgeprägt ist. Bei fünf Rohstoffen (Gallium, Lithium, Niobium, Phosphor, Strontium) wird er sogar auf null geschätzt. Auch bei den vielfältig eingesetzten Seltenerdmetallen ist er nahezu bedeutungslos. Die geringsten Recycling-Aktivitäten werden für solche Rohstoffe gemessen, bei denen auch allgemein die Importabhängigkeit besonders stark ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 1).

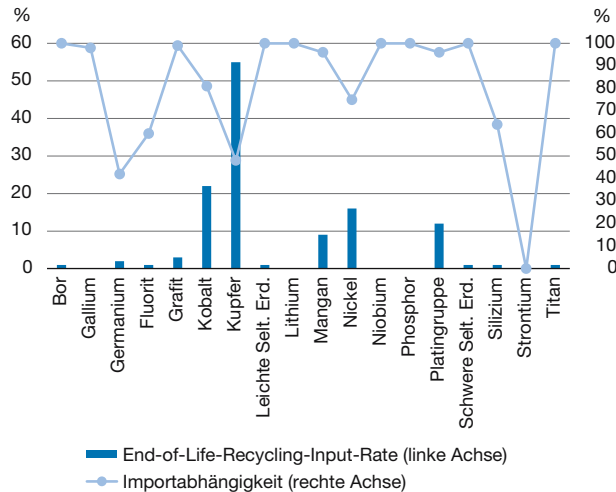
Vermeidung externer Kosten

Ein wesentliches Argument für die staatliche Förderung eines Recycling-Systems bei grünen Zukunftstechnologien stellt die Vermeidung externer Kosten dar. In erster Linie sind hier die Umweltschäden aus Abbau und Verhüttung von Primärrohstoffen zu nennen. Das betrifft im besonderen Maße kritische Rohstoffe, wie Lithium und Seltenerdmetalle. So können mit den Vorkommen häufig vergesellschaftete Giftstoffe, wie Arsen oder Quecksilber, ein Umweltrisiko darstellen, vor allem wenn eine Kontamination des Grundwassers nicht ausgeschlossen werden kann (Kaunda, 2020). Im Fall von Lithium kann je nach geologischen Bedingungen auch ein hoher Wasserverbrauch als Problem hinzukommen (Bustos-Gallardo et al., 2021). Umweltanalysen des chinesischen Seltene-Erden-Bergbaus identifizieren als Probleme die Entstehung von Giftmüll durch Nutzung chemischer Reaktionsmittel, die Radioaktivität des freigesetzten Thoriums

¹ Die End-of-Life-Recycling-Input-Rate drückt den Anteil der gesamten EU-Nachfrage nach einem Rohstoff aus, 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 Rohstoffimporte in die EU gemessen.

Dr. André Wolf ist Fachbereichsleiter am Centrum für Europäische Politik in Berlin.

Abbildung 1
EU Recycling-Input-Raten und Importabhängigkeit bei kritischen Mineralrohstoffen



Quelle: EU-Kommission (2023c); eigene Darstellung.

sowie die Emission von CO₂, Schwefeldioxid und Ammoniak (Zhou et al., 2016). Ein Versuch, diese Vielfalt an Effekten in einen Wohlfahrtsschaden umzurechnen, kommt immerhin auf eine Größenordnung von umgerechnet 4 Euro bis 5 Euro pro Kilogramm Seltenerdmetalle (Zhou et al., 2017). Das ist eine in Relation zu den Marktpreisniveaus vieler Seltenelemente beträchtliche Summe (SMM, 2023). Vergleichende Untersuchungen zu den Umweltwirkungen der Primär- und Sekundärgewinnung kritischer Rohstoffe kommen auf deutlich geringere Umweltschäden bei der Sekundärgewinnung (Jin et al., 2016).

Eine weitere, deutlich schwerer greifbare Form von vermiedenen sozialen Kosten betrifft die Versorgungssicherheit. Die Förderung einer heimischen Recycling-Wirtschaft verringert die Abhängigkeit von externen Rohstofflieferanten. Dabei handelt es sich im Bereich der kritischen Rohstoffe in vielen Fällen um monopolistische Strukturen (Wolf, 2023). Sie machen Europas Lieferketten im Bereich der Zukunftstechnologien anfällig für natürliche (Katastropheneignisse) oder menschlich verursachte (Veränderungen in der Rohstoff- und Handelspolitik) Ausfälle der Rohstofflieferungen einzelner Länder. Dieses Ausfallrisiko ist für sich betrachtet noch kein externer Effekt. 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. Sie führt zu einer starken positiven Korrelation der rohstoffbezogenen Risiken mit den Ertragsrisiken anderer Branchen.

Potenzielle Hindernisse beim Aufbau einer Recyclingwirtschaft

Grundsätzlich lassen sich produktübergreifend vier potenzielle Problembereiche für den schnellen Aufbau einer Recyclingwirtschaft identifizieren:

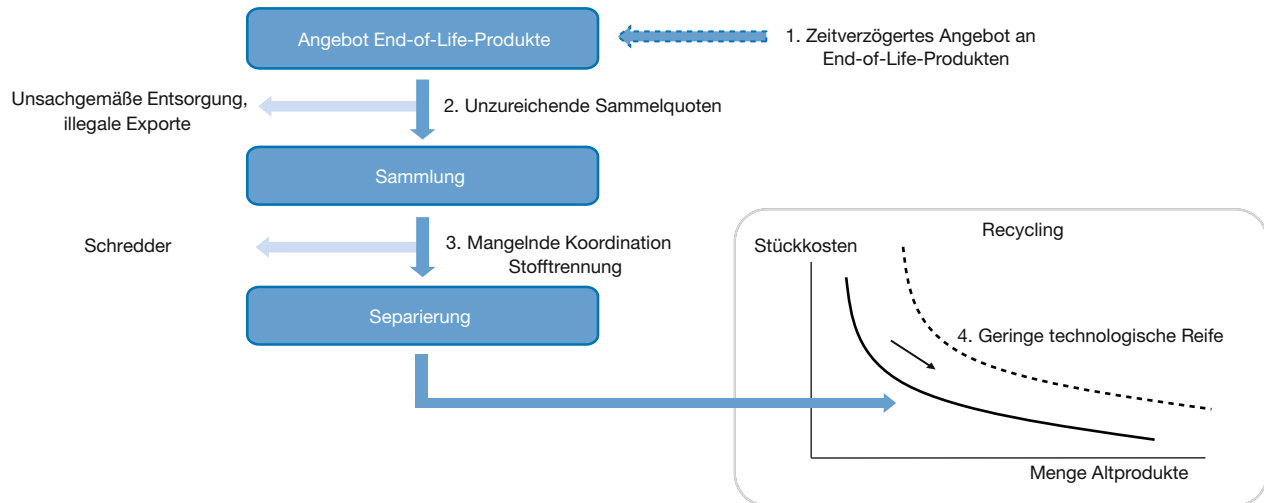
- Das Angebot an End-of-Life (EoL)-Produkten,
- die Sammlung und Übermittlung der EoL-Produkte in die Systeme der Wiederverwertung,
- die angemessene Sortierung und Allokation der in den Produkten enthaltenen kritischen Rohmaterialien sowie
- die ökonomische Effizienz der Wiederverwertung (vgl. Abbildung 2).

Grüne Zukunftstechnologien finden sich produktseitig in relativ langlebigen Gebrauchsgütern. Das starke Nachfragewachstum, das für viele dieser Produkte prognostiziert wird (Marscheider-Weidemann et al., 2021), schlägt sich erst mit teilweise deutlicher Verzögerung in einem wachsenden Angebot an EoL-Produkten nieder. Rizos et al. (2022) schätzen für das Beispiel der Seltenerd-Permanentmagnete, dass auch bei zügigem Aufbau von Recyclingketten recycelte Magneten im Jahr 2030 nur einen Anteil von 8% bis maximal 19% der EU-weiten Nachfrage decken können. Die Wiederverwertung kann zu Anfang also nur wenig zur Befriedigung der rasch steigenden Nachfrage beitragen. Das birgt die Gefahr, dass im Interesse einer schnellen Abhilfe Kapital zunächst relativ einseitig in andere, auf Primärrohstoffe setzende, Versorgungswege gelenkt wird.

Die erste praktische Herausforderung bei der Verwertung ist die Sicherung von Produkten mit Zukunftstechnologien am Ende 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 (Otto et al., 2015). Mit der aktuellen Fassung der Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)-Richtlinie 2012/19/EU hat die EU den Mitgliedstaaten das Ziel aufgetragen, die Sammelquoten² bei Elektroschrott zu erhö-

² 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.

Abbildung 2
Bestehende Hürden in der Recyclingkette von seltenen Metallen



Quelle: eigene Darstellung.

hen, ab 2019 auf einen Wert von mindestens 65 % (EU, 2018). Dieser Wert wurde beim jüngsten Messzeitpunkt (2020) im EU-Durchschnitt deutlich verfehlt (46 %), lediglich drei Mitgliedstaaten (Bulgarien, Finnland, Kroatien) überschritten die 65 %-Marke (Eurostat, 2023). Neben der unsachgemäßen heimischen Entsorgung macht der illegale Export von Elektronikschrott zur billigen Entsorgung in Länder wie China einen Teil des Problems aus (Illés und Geeraerts, 2016).

Die technischen Hürden und Kostenhemmnisse, die beim anschließenden Schritt der Separierung von Materialien auftreten, sind stark produktspezifisch. Vielfalt im Produktdesign und unzureichender Informationsaustausch über Produkteigenschaften stellen Unsicherheitsfaktoren dar und können zum Kostentreiber in der Separierung werden. 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 bzw. Reinheitsgrad (Elwert et al., 2015).

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 (Lander et al., 2021). Das erschwert die Standardisierung von Recycling-Prozessen. In Verbindung mit der Kostenstruktur von Recycling-Verfahren führt das zu einem Wirtschaftlichkeitsproblem. Sie sind typischerweise durch hohe Fixkosten (Arbeit, Kapital) gekennzeich-

net, was starke Größenvorteile impliziert (Gregoir und van Acker, 2022). Zusätzlich erschwert wird das Upscaling durch die technologische Vielfalt bei den Recycling-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 (Lander et al., 2021). 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, z. B. die Senkung der Kobaltintensität von Lithium-Ionen-Batterien (Ganesh et al., 2021), besondere Risikofaktoren für Recycling-Unternehmen dar.

Die in den einzelnen Stufen bestehenden Probleme verstärken sich über den Kostenzusammenhang zum Teil wechselseitig. Dahinter steht die klassische Henne-Ei-Problematik. Ohne eine etablierte Infrastruktur der Kreislaufwirtschaft gelangen zu geringe Mengen an EoL-Produkten zu spezialisierten Recycling-Unternehmen, was Recycling unrentabel macht. Das hemmt wiederum die technologische Entwicklung geeigneter Recycling-Verfahren (geringer Erfahrungsgewinn, wenig Anreize zur F&E-Investition). Das zeigt, dass die finanzielle Förderung von Recycling-Kapazitäten allein als Politikansatz nicht ausreichend ist. Die Regulatorik muss die gesamte Verarbeitungskette in den Blick nehmen, angefangen bei der Sammlung von Altprodukten bis hin zur Endverwertung der Recyclate.

Unterstützende Maßnahmen für den Aufbau eines Recyclingprozesses

Ein wichtiger Baustein ist eine intensive Koordination der Akteure entlang der zum Teil stark desintegrierten Verarbeitungsketten (van Nielen et al., 2023). Informationen über technische Produkteigenschaften und Anforderungen müssen zeitnah ausgetauscht werden. Das erlaubt Recycling-Betrieben, die Erlöspotenziale genauer einschätzen zu können und ihre Technologien zu optimieren. Produzenten, die Sekundärrohstoffe in ihrer Produktion einsetzen, sollten wiederum zertifizierte Informationen über Art und Umfang der recycelten Materialien sowie die verwendete Recycling-Technologie an ihre Käufer übermitteln. Das eröffnet ihnen 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 Technologien in einem günstigen Verhältnis zum erwarteten Recycling-Ertrag. In der Aufbauphase sollte es deshalb auf Produkte mit besonders hohem Potenzial an kritischen Rohstoffen begrenzt sein.

Auf der Ebene des Recyclingprozesses sollten die Anstrengungen darauf abzielen, den technologischen Reifegrad der gegenwärtig erforschten Lösungen zügig zu erhöhen. Staatliche Forschungsförderung sollte dabei möglichst diversifiziert angelegt 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-Produkten – rechtfertigt auch übergangsweise eine über den FuE-Bereich hinausgehende finanzielle Förderung. Damit Europa den in 15 bis 20 Jahren zu erwartenden sprunghaften Anstieg im Angebot von Sekundärrohstoffen aus Elektromobilen und Windkraftturbinen nutzen 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, könnte die Förderung die Form einer wettbewerblich fixierten Prämienzahlung annehmen. Die gegenwärtig in die Umsetzungsphase gehende Europäische Wasserstoffbank (EU-Kommission, 2023d) 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 wettbe-

werblich 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 EoL-Produkten und zunehmender Realisierung von Größenvorteilen sinkt die notwendige Kostenkompensation und damit sinken 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, d. h. eine Förderung erfolgreicher Bieter in Höhe ihrer individuellen Gebote, 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 Rohstoffmärkten 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 Erschließung neuer Anwendungsgebiete blieben 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 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 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.

Literatur

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

- Elwert, T., D. Goldmann, F. Römer, M. Buchert, C. Merz, D. Schueler und J. Sutter (2015), Current developments and challenges in the recycling of key components of (hybrid) electric vehicles, *Recycling*, 1(1), 25-60.
- EU-Kommission (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> (8. November 2023).
- EU-Kommission (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> (8. November 2023).
- EU-Kommission (2023c), 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> (8. November 2023).
- EU-Kommission (2023d), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the European Hydrogen Bank (COM/2023/156 final), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0156> (8. November 2023).
- EU (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> (8. November 2023).
- 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 (8. November 2023).
- Ganesh, A., P. Subramaniam, A. Kaur und L. Vaidyanathan (2021), Comparison of hydrometallurgical and hybrid recycling processes for lithium-ion battery: an environmental and cost analysis, *Working paper*.
- Gregoir, L. und K. van Acker (2022), Metals for clean energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, *Report for Eurometaux*, KU Leuven.
- Illés, A. und K. Geeraerts (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.
- Jin, H., P. Afiuny, T. McIntyre, Y. Yih und J. W. Sutherland (2016), Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: virgin production versus magnet-to-magnet recycling, *Procedia CIRP*, 48, 45-50.
- Kaunda, R. B. (2020), Potential environmental impacts of lithium mining, *Journal of energy & natural resources law*, 38(3), 237-244.
- Lander, L. et al. (2021), Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling, *Isience*, 24(7), 102787.
- Marscheider-Weidemann, F., S. Langkau, S.-J. Baur, M. Billaud, O. Deubzer, E. Eberling, L. Erdmann, M. Haendel, M. Krail, A. Loibl, F. Maisel, M. Marwede, C. Neef, M. Neuwirth, L. Rostek, J. Rückschloss, S. Shirinzadeh, D. Stijepic, L. Tercero Espinoza und M. Tippner (2021), Raw materials for future technologies 2021, *DERA Rohstoffinformationen*, 50.
- Otto, S., L. Henn, O. Arnold und A. Kibbe (2015), Die Psychologie des Recyclingverhaltens, *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 8, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- Rizos, V., E. Righetti und A. Kassab (2022), Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU, *CEPS in-depth analysis*, 07/2022.
- SMM – Shanghai Metals Market (2023), Latest Update in the SMM Rare Earth Metals Market, <https://www.metal.com/Rare-Earth-Metals> (8. November 2023).
- van Nielen, S. S., B. Sprecher, T. J. Verhagen und R. Kleijn (2023), Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows, *Journal of Cleaner Production*, 394, 136252.
- Wolf, A. (2023), Ressourcenpartnerschaften für mehr Rohstoffsicherheit, *Wirtschaftsdienst*, 103(4), 264-268, <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2023/heft/4/beitrag/ressourcenpartnerschaften-fuer-mehr-rohstoffsicherheit.html> (20. November 2023).
- Zhou, B. L., Z. X. Li, Y. Q. Zhao und S. Q. Wang (2016), The life cycle assessment of rare earth oxides production in Bayan Obo, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 39(2), 832-839.
- Zhou, B., Z. Li und Y. Zhao (2017), Evaluation of externalities associated with rare earth exploitation at Bayan Obo, *Geo-Resources Environment and Engineering (GREE)*, 2, 35-40.

Title: *Recycling of Rare Metals: A Pathway Towards Resilient Green Supply Chains*

Abstract: Green technologies, like electric motors, contain valuable rare metals. Recycling these would represent an important step towards a green circular economy. However, the development of supply chains for recycled metals faces difficulties such as a lack of technical standardisation, low collection rates of end-of-life products and low efficiency of recycling technologies. European policymakers must address these obstacles by a targeted approach, combining requirements on data transparency and supply chain cooperation with new support schemes to accelerate the upscaling of recycling capacities. An auction-based production premium for recyclers can help to overcome the funding gap in the early stages of capacity development.